تست ترانسفورماتورهای قدرت

POWEREN.IR

ایران ترانسفو

تست ترانسفورماتورهای قدرت

تست های روتین ، تایپ و ویژه

تست ترانسفورماتورهای قدرت

تست های روتین ، تایپ و ویژه

تهیه کننده

محمد خارزی

آزمایشگاه فشارقوی
ترانسفورماتورهای قدرت
شرکت ایران ترانسفو

ویرایش اول آبان ۸۴

منتشر شده توسط
شرکت ایران ترانسفو

پیشگفتار :

کتاب حاضر ترجمة کتاب زیر است :

Testing of Power Transformers
Routine tests, Type tests and Special tests

ABB Business Area Power Transformers

کتاب اصلی با پشتوانة تجربة ۱۰۰ سالة ABB در زمینة تست ترانسفورماتور ، انتشار یافته است .

این کتاب برای طراحان ترانسفورماتور ، مهندسین آزمایشگاه ، بازرسان ، مشاوران ، مدرسان و دانشجویان و سایر کسانی که به نحوی درگیر تست و بهره برداری ترانسفورماتور می باشند کاربرد دارد .

صفحه آرایی متن فارسی دقیقاً مشابه نسخة انگلیسی انجام شده تا براحتی بتوان ابهامات را با مراجعه به منبع اصلی برطرف کرد .

در اینجا لازم است از افراد زیر قدردانی به عمل آید :

متخصّصین شرکت ABB برای تألیف کتاب اصلی

آقایان مهندسین سلیمی ، محمودی ، عسگری و انصاری برای کمک در ترجمة کتاب

آقایان مهندسین ابراهیمی موقر و صفاری از مجموعة ایران ترانسفو برای ویرایش متن

آقای دکتر اکبری از دانشگاه خواجه نصیر و آقای مهندس علی موسوی از دانشگاه زنجان برای کمک در ویرایش فنی

آقای مهندس مهدوی مدیریت محترم کارخانة قدرت برای تشویق و پشتیبانی

و آقای **بهروز بیات** برای قبول زحمت صفحه آرایی و تایپ

کتاب حاضر به مدیریت محترم عامل شرکت ایران ترانسفو جناب آقای مهندس میرزایی به خاطر زحمات ایشان در راستای توسعة صنعت برق در زیر مجموعة این شرکت و در استان زنجان تقدیم می گردد .

لطفاً پیشنهادات خود را جهت اصلاح کتاب از طریق شمارة تلفن ۵- ۰۲۴۱۷۲۹۰۷۶۱ با ما در میان بگذارید .

هرگونه کپی برداری بدون هماهنگی قبلی با ناشر ممنوع است .

بهار سال ۱۳۸۴
آزمایشگاه فشارقوی شرکت ایران ترانسفو
محمد خارزی

	پیشگفتار	**۷**
	فهرست مطالب	**۸**
۱	**مقدمه**	**۱۳**
۱ -۱	چرا بایستی ترانسفورماتور تست گردد؟	۱۴
۱ -۲	انواع تست ها	۱۴
۱ -۳	توالی انجام تست ها	۱۵
۱ -۴	توضیحاتی دربارهٔ این کتاب	۱۷
۲	**صحت عایق بندی و اثبات آن**	**۱۹**
۲- ۱	مراجع / استاندارد	۲۰
۲- ۲	کلیات	۲۰
۲- ۳	ولتاژهای بالاتر از ولتاژ نامی	۲۱
۲- ۴	اثبات استقامت الکتریکی عایق بندی اصلی ترانسفورماتور	۲۳
۲- ۵	ولتاژهای تست	۲۳
۲- ۶	الزامات تست	۲۵
۲- ۷	مثال در مورد تست های عایقی روتین	۲۷
ض ۲	**ضمیمه**	**۲۸**
ض۲- ۱	مثال ها	۲۸
۳	**اندازه گیری مقاومت سیم پیچ**	**۳۱**
۳- ۱	مراجع / استانداردها	۳۲
۳- ۲	منظور از تست	۳۲
۳- ۳	کلیات	۳۲
۳- ۴	اصول و روش های اندازه گیری مقاومت	۳۴
۳- ۵	فرآیند اندازه گیری	۳۵
۳- ۶	تفسیر مقادیر اندازه گیری شده	۳۶
۳- ۷	مثال ها	۳۶
۳- ۸	عدم قطعیت در اندازه گیری های مقاومت	۳۶
ض ۳	**ضمیمه**	**۳۷**
ض۳- ۱	الزامات کلی برا ی تجهیزات	۳۷
ض۳- ۲	مقدار جریان DC اندازه گیری	۳۸
ض۳- ۳	مدار اندازه گیری کلوین (تامسون)	۳۹
ض۳- ۴	مثال ها	۳۹
۴	**تست نسبت تبدیل ولتاژ و گروه برداری یا جابجایی فاز**	**۴۱**
۴- ۱	مراجع / استانداردها	۴۲
۴- ۲	منظور از اندازه گیری	۴۲
۴- ۳	کلیات	۴۲
۴- ۴	اندازه گیری نسبت ولتاژ	۴۳
۴- ۵	مدار تست	۴۴
۴- ۶	فرآیند اندازه گیری	۴۹
۴- ۷	عدم قطعیت اندازه گیری	۵۱
ض ۴	**ضمیمه**	**۵۲**
ض ۴- ۱	تعیین و مکان یابی خطاها	۵۲
۵	**اندازه گیری امپدانس یا ولتاژ اتصال - کوتاه و تلفات بار**	**۵۵**
۵- ۱	مراجع / استانداردها	۵۶
۵- ۲	منظور از آزمایش	۵۶
۵- ۳	کلیات	۵۶
۵- ۴	مدار اندازه گیری	۶۱
۵- ۵	روش اندازه گیری	۶۲
۵- ۶	ارزیابی نتایج اندازه گیری	۶۵
۵- ۷	عدم قطعیت اندازه گیری	۶۵
ض ۵	**ضمیمه**	**۶۶**
ض۵- ۱	**رابطهٔ ولتاژ اتّصال کوتاه نسبی (یا ولتاژ اتّصال کوتاه) و دمای سیم پیچ**	**۶۶**
ض۵- ۲	جداسازی تلفات بار زمانی که مقاومت های سیم پیچ معلوم نباشند	۶۷
ض۵- ۳	نیازمندی های دستگاههای اندازه گیری	۶۷
ض۵- ۴	تصحیح خطای دستگاه اندازه گیری	۶۹
ض۵- ۵	تصحیح خطای ترانسفورماتور اندازه گیری	۶۹
ض۵- ۶	اندازه گیری ولتاژ اتّصال کوتاه برای ترانسفورماتورهای راه انداز با فاصلهٔ هوایی	۷۲
ض۵- ۷	اتّصالات برای آزمایش های عیب یابی	۷۲
ض۵- ۸	مثال ها	۷۳
۶	**اندازه گیری تلفات بی باری و جریان بی باری**	**۷۹**
۶- ۱	مراجع / استانداردها	۸۰
۶- ۲	منظور از اندازه گیری	۸۰
۶- ۳	کلیات	۸۰
۶- ۴	مدار اندازه گیری	۸۶
۶- ۵	روش اندازه گیری	۸۹
۶- ۶	بررسی نتایج اندازه گیری	۹۰
۶- ۷	عدم قطعیت اندازه گیری	۹۱

ض ۶	**ضمیمه**	**۹۲**
ض۶- ۱	مشخّصات تجهیزات اندازه گیری	۹۲
ض۶- ۲	تعیین مؤلفه های تلفات جریان های گردابی و هیسترزیس	۹۲
ض۶- ۳	اندازه گیری های اولیة هستة آهنی	۹۳
ض۶- ۴	مدارهای اندازه گیری ویژه	۹۴
ض۶- ۵	مثال	۹۵
۷	**تست ولتاژ استقامت AC با منبع جداگانه یا تست ولتاژ اعمالی**	**۹۷**
۷- ۱	مراجع/ استانداردها	۹۸
۷- ۲	منظور از تست	۹۸
۷- ۳	کلّیات	۹۸
۷- ۴	اصول و مدار اندازه گیری	۹۹
۷- ۵	روش اندازه گیری	۹۹
۷- ۶	عدم قطعیت اندازه گیری	۱۰۰
ض ۷	**تست ولتاژ اعمالی**	**۱۰۱**
ض۷- ۱	محاسبات ملزومات جبران سازی بار خازنی	۱۰۱
ض۷- ۲	الزامات کلّی برای تجهیزات اندازه گیری	۱۰۲
۸	**تست ولتاژ القایی**	**۱۰۵**
۸- ۱	مراجع/ استانداردها	۱۰۶
۸- ۲	منظور از تست	۱۰۶
۸- ۳	کلیات	۱۰۶
۸- ۴	اصول اولیه و مدار تست	۱۰۷
۸- ۵	فرآیند اندازه گیری	۱۰۹
۸- ۶	عدم قطعیت اندازه گیری	۱۱۴
ض ۸	**ضمیمه**	**۱۱۵**
ض۸- ۱	محاسبه بار برای تست ولتاژ القایی	۱۱۵
ض۸- ۲	الزامات عمومی تجهیزات اندازه گیری	۱۱۷
ض۸- ۳	اصلاح افت ولتاژ بر سر مقاومت حفاظتی جفت- گوی	۱۱۸
۹	**اندازه گیری تخلیه جزئی**	**۱۱۹**
۹- ۱	مراجع/ استاندارد	۱۲۰
۹- ۲	منظور از اندازه گیری	۱۲۰
۹- ۳	کلّیات	۱۲۰
۹- ۴	اصول اولیه اندازه گیری PD	۱۲۱
۹- ۵	اندازه گیری PD برای ترانسفورماتور	۱۲۳
۹- ۶	فرآیند اندازه گیری PD	۱۲۶
۹- ۷	فرآیند جستجوی منبع PD	۱۲۸
۹- ۸	آشکار سازی سیگنال های صوتی	۱۳۳
۹- ۹	جستجوی دقیق منبع PD	۱۳۴
۹- ۱۰	عدم قطعیت اندازه گیری	۱۳۹
ض ۹	**ضمیمه**	**۱۴۰**
ض۹- ۱	فیزیک تخلیة جزئی	۱۴۰
ض۹- ۲	اساس شبه انتگرال گیری	۱۴۳
ض۹- ۳	بار واقعی ، بار ظاهری و بار قابل اندازه گیری	۱۴۷
ض۹- ۴	نمونه های منابع نویز خارجی	۱۴۹
ض۹- ۵	سیستم PD پیشرفته	۱۵۱
ض۹- ۶	آشکارسازی سیگنال های صوتی PD	۱۵۴
ض۹- ۷	مکان یابی منبع PD با استفاده از آنالیز سیگنال های الکتریکی	۱۵۷
ض۹- ۸	حذف کرونا	۱۶۰
۱۰	**تست ضربة صاعقه و ضربة کلید زنی**	**۱۶۱**
۱۰- ۱	مراجع/ استانداردها	۱۶۲
۱۰- ۲	منظور از تست	۱۶۲
۱۰- ۳	کلیات	۱۶۳
۱۰- ۴	شکل ضربه	۱۶۵
۱۰- ۵	اتصالات تست	۱۶۷
۱۰- ۶	فرآیند تست / ضبط شکل موج ها	۱۷۱
۱۰- ۷	ارزیابی نتایج تست و آشکارسازی عیب	۱۷۴
۱۰- ۸	کالیبراسیون سیستم اندازه گیری ضربه / عدم قطعیت اندازه گیری	۱۷۵
ض ۱۰	**ضمیمه**	**۱۷۶**
ض۱۰- ۱	شکل موج و ارزیابی آن	۱۷۶
ض۱۰- ۲	تولید ولتاژ ضربه با دامنة زیاد	۱۷۷
ض۱۰- ۳	محاسبة شکل موج ضربه از پیش	۱۸۰
ض۱۰- ۴	پارامترهای مدار تست ضربة کلیدزنی	۱۸۳
ض۱۰- ۵	اندازه گیری ولتاژ ضربه با دامنة زیاد	۱۸۳
ض۱۰- ۶	کالیبراسیون نسبت مقسم ولتاژ ضربه	۱۹۰
ض۱۰- ۷	استفاده از جفت گوی برای کنترل ضریب مقیاس پیک ولتمتر ضربه	۱۹۰
ض۱۰- ۸	اندازه گیری جریان ضربه	۱۹۳
ض۱۰- ۹	زمین کردن مدار ضربه	۱۹۴

فهرست

ض۱۰- ۱۰	شکل موج ضربهٔ کلید زنی	۱۹۵
ض۱۰- ۱۱	استقامت الکتریکی هوا	۱۹۶
ض۱۰- ۱۲	تنش ولتاژ ضربه بر ترانسفورماتورهای قدرت	۱۹۶
۱۱	**تست حرارتی**	**۱۹۹**
۱۱- ۱	مراجع / استانداردها	۲۰۰
۱۱- ۲	منظور از تست	۲۰۰
۱۱- ۳	دما / جهش حرارتی	۲۰۰
۱۱- ۴	اندازه گیری های دما	۲۰۱
۱۱- ۵	اصول و روش های تست	۲۰۱
۱۱- ۶	فرآیند و مدار اندازه گیری	۲۰۳
۱۱- ۷	دمای نقطهٔ داغ	۲۰۹
۱۱- ۸	مثال های واقعی و تحلیل مقادیر اندازه گیری شده	۲۱۰
۱۱- ۹	عدم قطعیت اندازه گیری	۲۱۰
ض ۱۱	**ضمیمه**	**۲۱۱**
ض ۱۱- ۱	تعاریف ، دما و جهش حرارتی	۲۱۱
ض ۱۱- ۲	سایر روش ها برای تست حرارتی	۲۱۲
ض ۱۱- ۳	تخمین مدت زمان تست حرارتی [2]	۲۱۳
ض ۱۱- ۴	برون یابی از روی منحنی برای ماکزیمم جهش حرارتی [2]	۲۱۴
ض ۱۱- ۵	اندازه گیری دمای روغن با سنجش دمای سطح بدنه [61]	۲۱۴
ض ۱۱- ۶	اصلاح لازم در صورت تزریق جریان با فرکانسی غیر از نامی	۲۱۴
ض ۱۱- ۷	ضرایب تصحیح مطابق IEEE Std C57.12.90 [51]	۲۱۵
ض ۱۱- ۸	تطابق جهش حرارتی متوسط اندازه گیری شدهٔ سیم پیچ با جهش حرارتی واقعی در طی بهره برداری	۲۱۵
ض ۱۱- ۹	مثال هاي واقعی و تحلیل مقادیر اندازه گیری شده	۲۱۶
۱۲	**اندازه گیری امپدانس(های) توالی صفر درترانسفورماتورهای قدرت**	**۲۲۵**
۱۲- ۱	مراجع/ استانداردها	۲۲۶
۱۲- ۲	منظور از تست	۲۲۶
۱۲- ۳	کلیات	۲۲۶
۱۲- ۴	تعریف امپدانس توالی صفر	۲۲۷
۱۲- ۵	فرآیند اندازه گیری	۲۲۸
ض ۱۲	**ضمیمه**	**۲۳۰**
ض۱۲- ۱	مثال برای یک سیستم سه فاز نامتعادل	۲۳۰
ض۱۲- ۲	انواع امپدانس توالی صفر	۲۳۰
ض۱۲- ۳	تأثیر گروه اتّصال و طراحی ترانسفورماتور	۲۳۱
ض۱۲- ۴	مثال ها و تفسیر	۲۳۴
۱۳	**تست تحمل اتصال کوتاه**	**۲۳۷**
۱۳- ۱	مراجع / استانداردها	۲۳۸
۱۳- ۲	منظور از تست	۲۳۸
۱۳- ۳	کلیات	۲۳۸
۱۳- ۴	شرایط ، روش ها و اتصالات تست	۲۳۹
ض ۱۳	**ضمیمه**	**۲۴۴**
ض۱۳- ۱	اختلاف بین روش های تست (اتّصال کوتاه بعداً ایجاد شده و اتّصال کوتاه از قبل ایجاد شده) [105]	۲۴۴
ض۱۳- ۲	مثال های اتصالات تست تک فاز ، برای ترانسفورماتورهای سه فاز	۲۴۴
ض۱۳- ۳	محاسبات جریان اتصال- کوتاهِ متقارن بر اساس IEC 60076-5	۲۴۵
ض۱۳- ۴	محاسبهٔ جریان اتصال کوتاه متقارن I_{SC} بر اساس IEEE Std C57.12.00	۲۴۶
ض۱۳- ۵	روش موج تکراری با ولتاژ پایین	۲۴۶

۱۴	اندازه گیری سطح صدا	۲۴۷
۱۴- ۱	مراجع / استانداردها	۲۴۸
۱۴- ۲	منظور از اندازه گیری	۲۴۸
۱۴- ۳	کلّیات [7] ، [51] ، [106]	۲۴۸
۱۴- ۴	اندازه گیری و مدار اندازه گیری	۲۴۹
۱۴- ۵	فرآیند اندازه گیری	۲۵۰
۱۴- ۶	عدم قطعیت اندازه گیری	۲۵۴
ض ۱۴	**ضمیمه**	**۲۵۵**
ض۱۴- ۱	حس شنوایی انسان [106]	۲۵۵
ض۱۴- ۲	تخمین سطح توان صدای بار و تأثیر میزان بارگذاری بر آن [7]	۲۵۵
ض۱۴- ۳	ترکیب صدای بی باری و صدای بار [7]	۲۵۶
ض۱۴- ۴	۱۴- ۴ تعاریف [7]	۲۵۶
ض۱۴- ۵	محاسبهٔ ضریب تصحیح محیط K [51]	۲۵۸
ض۱۴- ۶	محاسبهٔ سطح توان صدا ، مثال	۲۵۹
ض۱۴- ۷	محاسبات محل نصب	۲۶۰
۱۵	تست کلید تنظیم ولتاژ زیر بار و سایر تجهیزات جانبی	۲۶۱
۱۵- ۱	مراجع / استانداردها	۲۶۲
۱۵- ۲	منظور از تست / کلّیات	۲۶۲
۱۵- ۳	روش تست [1] / مدار تست	۲۶۲
۱۵- ۴	تست تجهیزات جانبی [50] , [3]	۲۶۳
۱۶	اندازه گیری هارمونیک های جریان بی باری	۲۶۵
۱۶- ۱	مراجع / استانداردها	۲۶۶
۱۶- ۲	منظور از اندازه گیری	۲۶۶
۱۶- ۳	کلّیات	۲۶۶
۱۶- ۴	مدار اندازه گیری [100]	۲۶۷
۱۶- ۵	فرآیند اندازه گیری	۲۶۷
۱۶- ۶	چند مثال	۲۶۷
ض ۱۶	**ضمیمه**	**۲۶۸**
ض۱۶- ۱	ارتباط چگالی شار ، جریان بی باری و میزان هارمونیک ها [106]	۲۶۸
ض۱۶- ۲	مثال	۲۶۸
۱۷	اندازه گیری مقاومت عایقی	۲۷۱
۱۷- ۱	مراجع / استانداردها	۲۷۲
۱۷- ۲	منظور از اندازه گیری	۲۷۲
۱۷- ۳	کلّیات	۲۷۲
۱۷- ۴	مدار اندازه گیری / فرآیند اندازه گیری [51]	۲۷۳
ض ۱۷	**ضمیمه**	**۲۷۴**
۱۸	اندازه گیری ضریب تلفات $\tan\delta$ خازن های سیستم عایق بندی	۲۷۵
۱۸- ۱	مراجع / استانداردها	۲۷۶
۱۸- ۲	منظور از تست	۲۷۶
۱۸- ۳	کلّیات	۲۷۶
۱۸- ۴	مدار اندازه گیری / فرآیند اندازه گیری [51]	۲۷۷
ض ۱۸	**ضمیمه**	**۲۸۰**
ض ۱۸- ۱	چند مثال	۲۸۰
	واژه نامه انگلیسی	۲۸۳
	مراجع	**۲۸۹**
	استانداردها	۲۹۰
	IEC	۲۹۰
	IEEE / ANSI	۲۹۱
	کتب	۲۹۱
	مقالات فنی	۲۹۲
	واژه نامه فارسی	۲۹۳

تست ترانسفورماتورهای قدرت

۱- مقدمه

۱-۱ چرا بایستی ترانسفورماتور تست گردد؟

با انجام تست ها ، میزان دست یابی به نیازمندي های مشتری معین می گردد . به عنوان مثال :

- قابلیت بارگیری
- تحمل عایقی
- سایر مشخصه های بهره برداری

علاوه بر این ، تست ها بخشی از برنامهٔ داخلی هر سازنده در راستای تضمین مرغوبیت محصول است . علاوه بر نیازمندی های مشتری و استانداردهای موجود ، باید معیارهای سازنده نیز بر آورده شود .

الزامات مختلف عموماً با هم ترکیب شده و به عنوان استاندارد های ملّی و بین المللی منتشر می گردند . سازمان های اصلی استاندارد عبارتند از IEC و ANSI . این استانداردها غالباً برای پی ریزی استانداردهای ملّی به کار گرفته می شوند . IEC مخفف International Electro-technical Commission و ANSI مخفف American National Standard Institute می باشد .

در زمینهٔ صنعت برق ، ANSI وقت زیادی را صرف تدوین و نشر استانداردها برای IEEE ، Institue of electric and Electronics Engineers, Inc کرده است .

استاندارد های IEC و IEEE تست های لازم جهت برآورده نمودن الزامات فوق الذکر را مشخص می نمایند ؛ برای مثال :

تست جهش حرارتی برای اثبات قابلیت بارگیری ، بخش ۱۱ را ببینید .

تست های عایقی جهت نشان دادن قدرت ایستادگی در برابر تنش های الکتریکی و اضافه ولتاژ های احتمالی که ممکن است در هنگام کار عادی به ترانسفورماتور اعمال شود . بخش ۲ را ببینید .

اندازه گیری تلفات بار و بی باری ، اندازه گیری امپدانس اتصال کوتاه و غیره جهت تأیید سایر مشخصه های بهره برداری .

۲- ۱ انواع تست ها

استانداردهای IEC60076-1 [1] و IEEE Std C57.12.00 [50] تست ها را به انواع زیر تقسیم کرده اند :

- تست های روتین (routine)
- تست های تایپ یا طراحی [۱] (type or design)
- تست های ویژه یا دیگر [۱] (special or other)

۱ *اصطلاح به کار رفته در استاندارد IEEE [51] , [50]*

۲ *"نماینده" به معنی یکسان بودن از نظر مقادیر نامی و ساختار می باشد . ممکن است ترانسفورماتورهای نماینده از نظر مقادیر نامی و سایر مشخصه ها ، اختلاف کمی با سایر ترانسفورماتورها داشته باشد .*

تست های روتین

تست های روتین عبارتند از تست هایی که لازم است برای همهٔ ترانسفورماتورها انجام شود .

مثال :
اندازه گیری مقاومت اهمی ، نسبت تبدیل ولتاژ ، اندازه گیری تلفات و غیره .

تست تایپ یا طراحی

تست تایپ یا طراحی [1] روی ترانسفورماتوری انجام می شود که از لحاظ مشخصه ها ی الکتریکی نمایندهٔ [2] نوع خاصی از ترانسفورماتورها بوده و هدف از این تست اطمینان از دست یابی به الزاماتی است که تست های روتین آنها را پوشش نمی دهد .

مثال :
تست جهش حرارتی

تست ویژه یا دیگر

تست های ویژه یا دیگر [1] عبارتند از تست های توافق شده بین سازنده و خریدار که جزء تست های روتین یا تایپ نمی باشند .

مثال :
اندازه گیری امپدانس توالی صفر ، اندازه گیری سطح صدا و غیره .

توجه :

متناسب با استاندارد مربوطه و ماکزیمم ولتاژ سیستم ، تست عایقی معینی مثل تست ضربهٔ صاعقه ممکن است تست روتین ، تایپ یا ویژه تلقی شود . جدول ۱ و ۲ بخش ۲ را ببینید) . همین قاعده در مورد تست ضربهٔ کلید زنی نیز صادق می باشد .

۱- ۳ توالی انجام تست ها

چون استانداردها ، الزامی برای توالی انجام تست ها وضع نکرده اند ، این موضوع باعث ایجاد بحث های فراوان میان مشتری و سازنده می گردد .

اما توالی انجام تست های عایقی در استانداردهای IEC و IEEE معین گردیده است .

توصیه ها و قواعد موجود در استاندارد در این زمینه و همچنین توصیه های مؤلف به شرح زیر می باشد .

۱- ۳- ۱ استانداردهای IEC

استاندارد IEC 60076-3(2000) [3] بند 7.3

" توالی انجام تست های عایقی ، در صورت لزوم انجام به شرح زیر است ؛ مگر اینکه توافق دیگری انجام شده باشد :

- تست ضربهٔ کلید زنی
- تست ضربهٔ صاعقه (ترمینال های خط)
- تست ضربهٔ صاعقه (ترمینال نوترال)
- تست عایقی با منبع AC جداگانه (تست عایقی با ولتاژ اعمالی ، applied)
- تست عایقی کوتاه مدت با ولتاژ القایی(ACSD) به همراه اندازه گیری تخلیهٔ جزئی
- تست عایقی بلند مدت با ولتاژ القایی (ACLD)به همراه اندازه گیری تخلیهٔ جزئی "

گرچه این توالی تست در اصل الزامی است ولی امکان توافق دیگری نیز بین مشتری و سازنده وجود دارد .

IEC 60076-1(2000) [1] بند 10.5

" هنگام تصمیم گیری برای قرار دادن تست بی باری در توالی کامل تست ، بایستی توجه شود که اندازه گیری بی باری که قبل از تست های ضربه یا حرارتی انجام می گیرد معرف میزان متوسط تلفات در زمان بهره برداری طولانی می باشد . این اندازه گیری پس از تست های دیگر در بعضی از مواقع به خاطر اثرات قوس در لبه های ورق هسته ، در تست ضربهٔ صاعقه یا غیره ، مقادیر بالاتری نشان می دهد . بنابراین بهتر است اندازه گیری اخیر ملاک قضاوت قرار نگیرد . "

این توالی یک توصیه بوده و اجباری نیست .

۱- ۳- ۲ استانداردهای IEEE

IEEE Std C57.12.90 [51] بند 4.3

" به منظور به حداقل رساندن آسیب جدی به ترانسفورماتور در هنگام تست های عایقی بایستی تست های مقاومت اهمی ، پلاریته ، گروه برداری ، نسبت ولتاژ ، تلفات بی باری و جریان تحریک ، امپدانس اتصال کوتاه ، و تست تلفات بار (و نیز تست حرارتی در صورت لزوم انجام) قبلاً انجام شده باشند . با این توالی ، تست های اولیه با ولتاژ و جریان هایی به مراتب کمتر از مقادیر نامی انجام می شود و بنابراین اثرات مخرب کمتری روی ترانسفورماتور دارد . "

این توالی نیز یک توصیه بوده و اجباری نمی باشد .

IEEE Std C57.12.90 [51] بند 10.1.5.1

" در صورت الزام انجام ، تست ولتاژ ضربهٔ صاعقه بایستی مقدم بر تست های فرکانس پائین باشد . همچنین تست ولتاژ ضربهٔ کلید زنی بایستی پیش از تست های فرکانس پائین صورت گیرد .

برای ترانسفورماتورهای کلاس II (طبقه بندی شده طبق استاندارد) ، تست اضافه ولتاژ القایی باید آخرین تست عایقی باشد که انجام می شود . "

این توالی انجام تست اجباری می باشد .

۱- ۳- ۳ توصیة مؤلفان

با در نظر گرفتن قواعد موجود در استانداردهای IEC و IEEE مؤلفان بر اساس تجربه ، توالی تست زیر را پیشنهاد می دهند :

- نسبت تبدیل ، پلاریته و گروه برداری
- اندازه گیری مقاومت اهمی
- تست بی باری (و بدنبال آن در صورت لزوم تست صدا)
- تلفات بار و امپدانس
- امپدانس توالی صفر (در صورت لزوم)
- تست های عایقی :
  - تست ضربة کلید زنی (در صورت لزوم)
  - تست ضربة صاعقه (در صورت لزوم)
  - تست ولتاژ AC با منبع جداگانه
  - تست اضافه ولتاژ القایی به همراه اندازه گیری تخلیة جزئی .

توالی انجام تست های قبل از تست های عایقی ، در صورت محدودیت های آزمایشگاه یا سایر دلایل عملی می تواند اندکی تغییر یابد .

۱- ۴ توضیحاتی دربارة این کتاب

از آنجائیکه نتیجة موفقیت آمیز انجام تست های عایقی نشان دهندة صحت عایقی ترانسفورماتور می باشد ، فصل ابتدایی این کتاب به طور کلی اختصاص به مبحث صحت عایقی دارد ، (بخش ۲) . در سایر فصل ها هر یک از تست ها به طور مجزا تشریح می گردد .

جزئیات تست ها و اندازه گیری ها به طور مفصل در بخش های زیر (از بخش ۳ الی ۱۸) ارائه می گردد :

- اندازه گیری مقاومت اهمی سیم پیچ (R ، روتین) ، بخش ۳ .
- اندازه گیری نسبت ولتاژ و کنترل گروه برداری (جابجایی فاز) (R) ، بخش ۴ .
- اندازه گیری تلفات بار و امپدانس (R) ، بخش ۵ .
- اندازه گیری تلفات بی باری و جریان بی باری (R) بخش ۶ .
- تست ایستادگی عایقی با ولتاژ AC توسط منبع جداگانه (R) ، بخش ۷ .
- تست اضافه ولتاژ القایی (R و یا بعضاً S ، ویژه) ، بخش ۸ .
- تست تخلیة جزئي (R و یا بعضاً S) ، بخش ۹ .
- تست ضربه (R و T ، تایپ) ، بخش ۱۰ .
- تست حرارتی (T) ، بخش ۱۱ .

- اندازه گیری امپدانس های توالی صفر (S) بخش ۱۲ .
- تست ایستادگی در برابر اتصال کوتاه (S) ، بخش ۱۳ .
- اندازه گیری سطح صدا (S) ، بخش ۱۴ .
- تست روی کلید ها ی تنظیم ولتاژ زیر بار و تست های عایقی تجهیزات جانبی (R) ، بخش ۱۵ .
- اندازه گیری هارمونیک های جریان بی باری (S) ، بخش ۱۶ .
- اندازه گیری مقاومت عایقی (S) ، بخش ۱۷ .
- اندازه گیری ضریب تلفات عایقی (δ tan) ظرفیت های خازنی سیستم عایق بندی یا تست ضریب توان عایقی (ϕ cos) (S) ، بخش ۱۸ .

توجه :

R = تست روتین
T = تست تایپ
S = تست ویژه

هر یک از موارد تست ممکن است به عنوان بخشی از یک تست ترکیبی و به منظور تعیین مشخصه های ویژه ای انجام شود . به عنوان مثال از اندازه گیری مقاومت اهمی می توان نام برد .

تست ها و فرآیندهای تست از چندین جنبه مورد بررسی قرار گرفته است ، از آن جمله :

- منظور از تست و اینکه هدف انجام یک تست خاص چیست .
- تجهیزات لازم جهت تأمین ولتاژ و جریان تست .
- تجهیزات لازم جهت اندازه گیری و نیز ثبت پاسخ ترانسفورماتور .
- اقدامات لازم جهت اطمینان از سالم بودن ترانسفورماتور .
- تجهیزات لازم جهت اثبات بروز یا عدم بروز خرابی برای ترانسفورماتور مورد آزمایش.

علائم و اختصارات به کار رفته در این کتاب تست ، از قواعد استانداردهای موجود IEC تبعیت می کند .

POWEREN.IR

تست ترانسفورماتورهای قدرت

۲- صحت عایق بندی و اثبات آن

۲- صحت عایق بندی و اثبات آن

تست های عایقی ، برای اثبات استقامت الکتریکی ترانسفورماتور در برابر تنش های ولتاژی بر آن انجام می شود . این تنش ها ممکن است هنگام بهره برداری عادی و یا در وضعیت های غیر عادی بهره برداری پیش آید .

بهره برداری عادی به معنی وجود ولتاژی نزدیک به ولتاژ نامی در ترمینال های ترانسفورماتور در مدتی طولانی به همراه اضافه ولتاژهای گذرای احتمالی است .

اضافه ولتاژها عموماً به سه نوع تقسیم می شوند :

- اضافه ولتاژ با فرکانس نامی با مدت زمانی در حدود چند ثانیه .
- اضافه ولتاژ کلید زنی با مدت زمانی در حدود کسری از ثانیه .
- اضافه ولتاژ صاعقه با مدت زمانی در حدود چند میکرو ثانیه .

در مجموعهٔ قوانین تست ، چندین گروه متفاوت از اضافه ولتاژها در نظر گرفته شده و بر اساس آن یک یا چند تست تعریف گردیده است . این تست ها ممکن است بصورت تکی یا ترکیبی انجام شود . قانون تست مربوط به یک مورد آزمایش خاص به توان و ولتاژهای نامی آن و استاندارد اختصاص یافته برای ترانسفورماتور بستگی دارد .

۲-۱ مراجع / استانداردها

- IEC 60076-3 (2000): Power transformers - Part 3 : "Insulation levels, dielectric tests and external clearances in air" [3].
- IEEE C57.12.90-1999: IEEE Standard Test Code for Liquid- Immersed Distribution, Power and Regulating Transformers, clause 10: "Dielectric tests" [51].
- IEEE C57.12.00-2000: IEEE Standard General Requirements for Liquid-Immersed Distribution, Power, and Regulating transformers [50].

۲-۲ کلّیات

ولتاژهای تست یا سینوسی AC و یا ضربهٔ گذرا می باشند . برای تست ترانسفورماتورهای مربوط به یکسو سازها (برای مثال ترانسفورماتورهای HVDC) ممکن است از ولتاژ DC نیز استفاده شود که این نوع تست ها در این کتاب مورد بررسی قرار نمی گیرد .

روش های سابق تست از قوانینی بر اساس تست های کوتاه مدت AC با ولتاژی بسیار بالاتر از ولتاژ کار عادی ریشه می گرفتند . بعدها کشف شد که سایر اشکال ولتاژ همچون صاعقه و کلید زنی که ماهیت گذرا دارند ، تنش های وارده در شرایط غیر عادی را بهتر شبیه سازی می کنند .

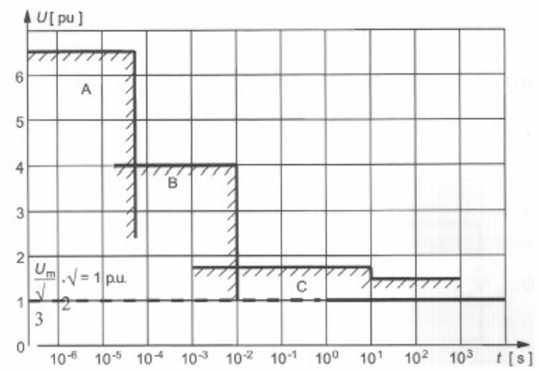
در ابتدا تست های عایقی شبیه تست های آری/ خیر (go/no-go) بود و در طی آن یا مورد آزمایش با موفقیت تست را می گذراند و یا دچار شکست الکتریکی می شد . بعدها ابزارهای تشخیص پیشرفته تری شناخته شد و امروزه اندازه گیری تخلیه جزیی ابزاری اجتناب ناپذیر برای تست ترانسفورماتور می باشد .

۲-۳ ولتاژهای بالاتر از ولتاژ نامی

به هر ترانسفورماتور علاوه بر ولتاژ بهره برداری عادی خود که بسیار نزدیک به ولتاژ نامی آن می باشد ، انواع مختلف اضافه ولتاژها نیز وارد می گردد . بسته به مدت زمان اضافه ولتاژ ، اسامی زیر بکار برده می شود :

- اضافه ولتاژ صاعقه
- اضافه ولتاژ کلید زنی
- اضافه ولتاژ موقّت

اندازه و مدت زمان هر نوع در شکل ۲- ۱ نشان داده شده است .



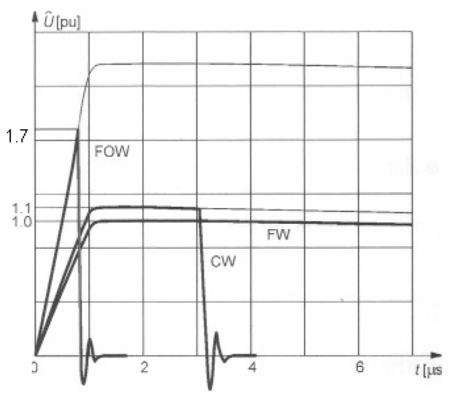
A = اضافه ولتاژ صاعقه
B = اضافه ولتاژ کلید زنی
C = اضافه ولتاژ گذرا

شکل ۲- ۱ : اضافه ولتاژ در شبکه های فشار قوی

۲-۳-۱ اضافه ولتاژهای صاعقه

دامنهٔ اضافه ولتاژ ناشی از صاعقه تابعی از جریان صاعقه و امپدانس ضربه محل اصابت است . امواج در طول خط انتقال از محل اصابت ولتاژ شروع و منتشر می شوند . از دید یک ناظر در طول خط ، موج ضربه صاعقه ، موجی یک جهته است که در طی چند میکرو ثانیه (پیشانی موج) تا مقدار پیک افزایش یافته و طی حدود صد میکرو ثانیه به طرف صفر میرا می شود .

امواج سیار در طول انتشار خود بدلیل امپدانس خط و تخلیه کرونا تغییر شکل داده و میرا می شوند . تجهیزات حفاظتی همچون برق گیرها یا شاخک های جرقه گیر به تنهایی یا به شکل ترکیبی از ورود امواج با دامنهٔ غیر مجاز به دستگاههای محافظت شده همچون ترانسفورماتورها جلوگیری می کنند . در همان حال وجود برق گیر یا شاخک جرقه گیر ممکن است موجب شکست ولتاژ با شیب زیاد شود که بر روی ترمینالهای ترانسفورماتور به شکل ضربه صاعقهٔ بریده (chopped wave) وارد می شود . موج های ضربه صاعقه در شکل ۲- ۲ نشان داده شده است .



FW = موج کامل
CW = موج پشت - بریده
FOW = موج پیشانی - بریده

شکل ۲- ۲ : شکل موج های ضربهٔ صاعقه

۲-۳-۲ اضافه ولتاژهای کلیدزنی

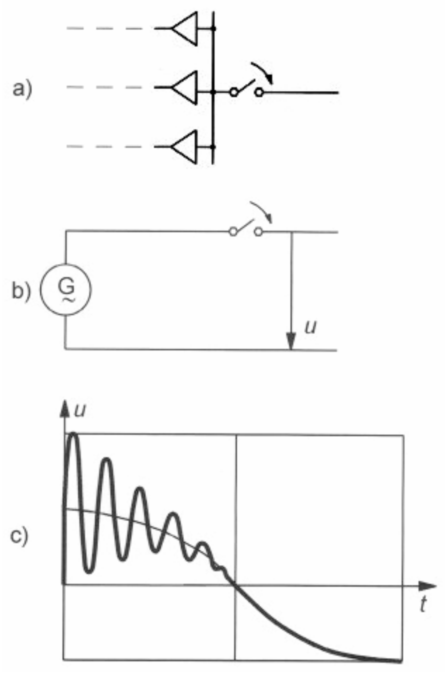
عملیات کلیدزنی در شبکه های فشار قوی موجب پدیده هایی گذرا و به دنبال آن ایجاد اضافه- ولتاژ می گردد . شکل ۲- ۳ مثالی برای اضافه ولتاژ ضربه کلید زنی هنگام عملیات کلید زنی در یک خط هوایی است .

شکل و مدت زمان اضافه ولتاژ ضربه کلید زنی بسته به نوع عملیات کلید زنی و وضعیت شبکه متغیر است .

۲-۳-۳ اضافه ولتاژهای موقّت

دلایل وقوع اضافه ولتاژهای موقّت در حین بهره برداری و شرایط غیر عادی به شرح زیر است :

- قطع ناگهانی بار
  اضافه ولتاژ از ۱/۱ تا ۱/۴ pu ، به مدت چندین ثانیه
- اتّصال کوتاه تک فاز
  اضافه ولتاژ از ۱/۲ تا ۱/۷۳ pu بسته به وضعیت اتّصال نقطة نوترال
- تشدید مربوط به هستة ترانسفورماتور (Ferro resonance) (نوسانات دندانه اره ای)
- اثر فرانتی (Ferranti)
- سایر نوسانات تشدیدی



a) ترکیب شبکه
b) مدار معادل
c) منحنی ولتاژ ضربة کلید زنی

شکل ۲- ۳ : اضافه ولتاژ کلید زنی هنگام وصل خط هوایی

برای مثال:

اضافه ولتاژ کلید زنی	نوع عملیات کلید زنی
پیشانی تیز	کلید زنی در پست HV
شدیداً میرا مدت ۱۰۰۰ تا ۲۰۰۰μs	کلیدزنی برای خروج ترانسفورماتور بدون بار
تدریجاً میرا مدت ۱۰۰ تا ۱۰۰۰μs	کلید زنی خط هوایی HV بدون بار

۲-۴ اثبات استقامت الکتریکی عایق بندی اصلی ترانسفورماتور

منحنی های ساده شدۀ ولتاژ ایستادگی (withstand) عایق هادی ها نسبت به زمین به صورت تابعی از مدت زمان اعمال اضافه ولتاژ در شکل ۲- ۴ ملاحظه می شود .

منحنی I نشان دهندۀ الگوی رفتار عایق بندی اصلی ترانسفورماتور (نسبت به زمین) است . استقامت الکتریکی و بدنبال آن عمر عایق با ادامه یافتن تنش ولتاژ AC کاهش می یابد . البته ، عمر واقعی به عوامل دیگری همچون ساختمان عایق بندی ، خلوص روغن ، دما ، تخلیه جزئی و غیره بستگی دارد . برای هر بازۀ زمانی A ، B و C یک تست اختصاص یافته است :

بازۀ A

ایستادگی در برابر ولتاژ ضربه صاعقه ۱/۲ / ۵۰ µs

بازۀ B

اثبات ایستادگی در برابر ولتاژ ضربه کلید زنی ۱۰۰۰≤ / ۱۰۰≤ µs

بازۀ C

اثبات ایستادگی در برابر ولتاژ تست AC ۶۰ s (بخش های ۷ و ۸ را ببینید)

سه ولتاژ تست برای منحنی I شکل ۲- ۴ نشان داده شده است . دامنۀ ولتاژهای ایستادگی (ولتاژهای تست) به بالاترین ولتاژ دستگاه U_m (Highest voltage for equipment) بستگی دارد و مقادیر آنها در IEC و IEEE تعیین شده است .

برای مقایسه ، منحنی II شکل ۲- ۴ مشخصۀ ولتاژ ایستادگی فواصل عایقی هوایی در شبکه های با $U_m \geq$ ۲۴۵ kV نشان می دهد . کاهش زیاد ولتاژ ایستادگی در بازۀ اضافه ولتاژهای کلید زنی و بدنبال آن ، تنش بیشتر در فرکانس نامی قابل توجه است .

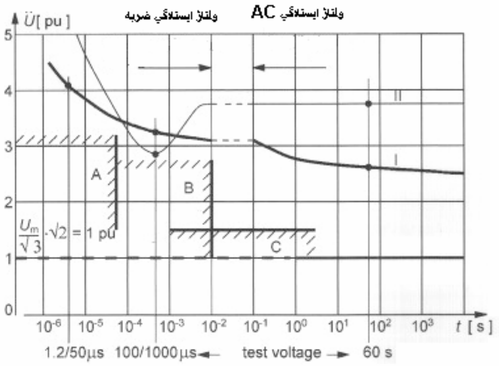
بدین ترتیب تست ضربۀ کلید زنی همیشه لازم بوده ولی تست ولتاژ AC ضروری نیست .

۲-۵ ولتاژهای تست

استانداردهای تست موجود مقادیر ولتاژ تست متناوب و نیز ولتاژ گذرای ضربه را معین می کنند .

۲- ۵- ۱ ولتاژهای متناوب

ولتاژ تست به دو روش اعمال می شود . روش اول توسط منبع ولتاژ AC جداگانه با اعمال ولتاژ به یک الکترود (طرف فشار قوی یا فشار ضعیف) و زمین کردن الکترود دیگر . در بیان استاندارد به این *روش ، تست با منبع جداگانه* (separate source) گفته می شود . روش دوم القای ولتاژ بین دو ترمینال یک سیم پیچ می باشد که به این روش ، *تست ولتاژ القایی* گویند .



A = اضافه ولتاژ ضربه صاعقه

B = اضافه ولتاژ ضربه کلید زنی

C = اضافه ولتاژ AC

دیاگرام I = عایق روغن

دیاگرام II = عایق هوا

شکل ۲- ۴ : نمایش ساده شدۀ ولتاژ های ایستادگی

مدت زمان تست با ولتاژ متناوب تست از ابتدا یک دقیقه بوده است و اصطلاحاً آن را تست یک دقیقه با فرکانس پایین (فرکانسی نزدیک به فرکانس توان) نامیده اند . طی تست ولتاژ القایی ، که ولتاژ بسیار بالاتر از ولتاژ نامی است ، اگر چنانچه فرکانس افزایش داده نشود هسته اشباع خواهد شد . با افزایش فرکانس ، مدت زمان تست متناسباً کاهش می یابد . این عمل بر این فلسفه استوار است که تنش مجاز نه تنها به مدت زمان تست بلکه به تعداد دفعات اعمال پیک های موج ولتاژ بستگی دارد .

در مورد ترانسفورماتور قدرت بزرگ که ولتاژ نامی بالایی نیز دارند ، اخیراً به جای تست کوتاه مدت ولتاژ القایی ترکیبی از تست بلند مدت ولتاژ القایی همراه با اندازه گیری تخلیه جزیی و تست ضربهٔ کلید زنی انجام می شود . در این صورت ضربهٔ کلید زنی نشان دهندهٔ استقامت الکتریکی عایق بندی است در حالیکه مقدار تخلیه های جزیی معیاری در مورد کیفیت عایق بندی می باشد .

۲- ۵- ۲ ولتاژهای ضربه

اساساً دو نوع ولتاژ ضربه گذرا وجود دارد ؛ *ضربهٔ صاعقه* با مدت زمان کوتاه و *ضربهٔ کلید زنی* با مدت زمان بلند . افزایش ولتاژ با شیب زیاد و میرایی نسبتاً سریع کلاً در مدت زمانی در حدود صد میکرو ثانیه مشخصه ضربهٔ صاعقه می باشد . در مقایسه ، زمان پیشانی ضربهٔ کلید زنی صد برابر بلندتر از زمان پیشانی ضربهٔ صاعقه است . طول مدت زمان ضربهٔ کلید زنی معمولاً ده تا بیست برابر بلندتر از ضربهٔ صاعقه است .

برای ضربهٔ صاعقه ، طول هادی سیم پیچ در مقایسه با سرعت انتشار ضربه در طول هادی بلندتر است . مشخّصات موجی سیم پیچ بایستی در نظر گرفته شود . برای ضربهٔ کلید زنی، نرخ تغییر ولتاژ آنقدر کم است که مدل موجی سیم پیچ در نظر گرفته نشده ، و رفتار ترانسفورماتور مشابه حالت آن در شرایط ولتاژ AC و فرکانس توان (power frequency) است .

پلاریتهٔ (polarity) ضربه معمولاً منفی انتخاب می شود تا احتمال شکست الکتریکی اتفاقی در بیرون از ترانسفورماتور و از سر بوشینگ ها به بدنه کاهش یابد . در فضای اطراف ترمینال های بیرونی ، با میدان الکتریکی کاملاً غیر یکنواخت ، احتمال شکست الکتریکی در صورت اعمال ضربه ای با پلاریتهٔ مثبت بسیار بالاست .

۲-۶ الزامات تست

۲-۶-۱ منطق - IEC

IEC 60076-3 [3] تست های عایقی زیر را تعریف می کند و بایستی با توالی زیر انجام شوند .

- تست ضربه کلید زنی (SI) برای ترمینال های خط (بخش ۱۰ *)
- تست ضربه صاعقه (LI) برای ترمینال های خط (بخش ۱۰ *)
- تست ضربه صاعقه (LI) برای نوترال (بخش ۱۰ *)
- تست ایستادگی AC اعمالی با منبع جداگانه (Applied potential test) (بخش ۷ *)
- تست ایستادگی AC القایی کوتاه مدت (ACSD) (بخش ۸ را ببینید*)
- تست ایستادگی AC القایی بلند مدت (ACLD) (بخش ۸ و ۹ را ببینید*)

این تست برای صحه گذاری طراحی نیست ، بلکـه تسـتی بـرای کنتـرل کیفیـت است . این تست عدم وجود تخلیة جزیی در شـرایط کـار عـادی ترانسـفورماتور را اثبات می نماید .

الزامات و تست های انواع مختلف سیم پیچ ها در استاندارد IEC فوق الـذکر معـین شـده است (جدول ۱ را ببینید) .

* شماره مرجع مربوط به استاندارد IEC نیست و مربوط به همین کتاب است.

جدول ۱ : الزامات و تست های انواع مختلف سیم پیچ ها اقتباس از IEC60076-3 [3]

نوع سیم پیچ	بالاترین ولتاژ دستگاه U_m [kV]	تست ها					
		AC	ACSD		ACLD	SI	LI
		تست با منبع جداگانه	تست فاز به فازسه فاز	فازبه زمین تک فاز			
عایق بندی یکنواخت	≤۷۲/۵	R	R	NA	NA*	NA	T*
	۷۲/۵< U_m <۱۷۰	R	R	NA	S	NA	R
	۱۷۰< U_m <۳۰۰	R	S**	NA	R	R**	R
	≥۳۰۰	R	S	NA	R	R	R
عایق بندی غیر یکنواخت	۷۲/۵< U_m <۱۷۰	R	R	R	S	NA	R
	۱۷۰< U_m <۳۰۰	R	S**	S**	R	R**	R
	≥۳۰۰	R	S	S	R	R	R

علائم : R تست روتین (routine) T تست تایپ (type)
S تست ویژه (special) NA غیر قابل اعمال

۲-۶-۲ منطق IEEE / ANSI [51]

طراحی ترانسفورماتور بایستی بر اساس سطوح عایقی هماهنگ شدة ضربه و فرکانس پایین برای ترمینال های خط و سطح عایقی فرکانس پایین برای ترمینال نوترال انجام شود ، تعیین اولیه مجموعه سطوح عایقی هماهنگ از روی سطح پایه عایقی ضربه صاعقه (BIL) انجام می شود .

در استانداردهای IEEE ، ترانسفورماتورهای قدرت به تناسب ولتاژ سیستم به دو دسته تقسیم می شوند و سطوح عایقی و فرآیند تست به نوع ترانسفورماتور بستگی دارد :

- دسته I : ترانسفورماتورهای قدرت با سیم پیچ فشار قوی ۶۹ kV و پایین تر
- دسته II : ترانسفورماتورهای قدرت با سیم پیچ فشار قوی ۱۱۵ تا ۷۶۵ kV

تست های عایقی زیر تعریف شده است :

- تست ضربة کلید زنی (بخش ۱۰ *)
- تست ضربة صاعقه برای ترمینال های خط و برای نوترال ترانسفورماتور (شکل ۱۰ *)
- تست ولتاژ اعمالی (applied) (بخش ۷ *)
- تست ولتاژ القایی (بخش ۸ *)
- اندازه گیری PD (بخش ۹ *)
- تست ضریب توان عایقی (بخش ۱۸ *)
- تست مقاومت عایقی (تست مگر) (بخش ۱۷ *)

* شماره مرجع مربوط به استاندارد IEEE نیست و مربوط به همین کتاب است .

توجه:

* در برخی کشورها ، برای ترانسفورماتورهای U_m >۷۲/۵، تست LI به عنوان تست روتین تلقی می شود و تست ACLD به عنوان تست روتین یا تایپ محسوب می شود.

** اگر تست ACSD تعیین گردد ، تست SI لازم نیست. این مطلب بایستی بطور واضح در مدارک سفارش بیان گردد .

جدول ۲ : الزامات و تست های انواع مختلف سیم پیچ ها اقتباس از IEEE C57.12.00 [50] و IEEE C57.12.90 [51]

نوع سیم پیچ	بالاترین ولتاژ سیستم [kV]$_{rms}$	تست ها							
		تست ولتاژ اعمالی	کوتاه مدت تست AC فاز-به-زمین تک-فاز	تست فاز-به-فاز سه- فاز	بلند مدت AC با تست PD	ضربه کلیدزنی فاز-به-زمین	ضربه صاعقه پیشانی موج	ضربه صاعقه موج بریده	ضربه صاعقه تست موج کامل
دسته I عایق بندی یکنواخت	<۱۱۵	R	NA	R	NA	O	O	D/O	D/O
دسته I عایق بندی غیر یکنواخت		R	R	R	NA	O	O	D/O	D/O
دسته II	≥ ۱۱۵ < ۳۴۵	R	NA	NA	R	O	O	R	R
	۳۴۵ و بالاتر	R	NA	NA	R	R	O	R	R

علائم :

R	تست روتین
D	تست طرح (design)
O	تست دیگر (other)
NA	غیر قابل اعمال

IEEE [51] توالی تست ها را به شرح زیر معین کرده است :

تست ضربه صاعقه ، در صورت وجود ، بایستی مقدم بر تست های فرکانس پایین (تست های ولتاژ AC) باشد . تست ضربه کلید زنی در صورت وجود ، بایستی مقدم بر تست های فرکانس پایین باشد .

برای ترانسفورماتورهای قدرت دسته II ، تست ولتاژ القایی بایستی آخرین تست باشد .

الزامات و تست های انواع مختلف سیم پیچ ها در استاندارد IEEE فوق الذکر معین شده است (جدول ۲ را ببینید) .

۲- ۶- ۳ تکرار تست های عایقی [3]

تکرار تست عایقی ترانسفورماتورهایی که در حال کار بوده و اکنون بازسازی یا بهسازی شده اند بایستی با ۸۰ % مقدار اولیه انجام گیرد . مطابق IEC تنها استثنا برای این قانون تست القایی بلند مدت AC (ACLD) است که همیشه بایستی با ۱۰۰ % مقدار اولیه تکرار گردد .

تست هایی که جهت اطمینان از عدم آسیب دیدگی عایق بر روی ترانسفورماتورهای تازه تولید شده و تست شده در کارخانه سازنده انجام می گردد ، لازم است با ۱۰۰ % مقدار اولیه تکرار گردد .

۲-۷ مثال در مورد تست های عایقی روتین

مثال هایی در مورد تست های عایقی روتین (routine) در ضمیمه ۲ ارائه شده است .

ضمیمهٔ ۲ :

صحت عایق بندی و اثبات آن

ضمیمه ۲-۱ مثال ها

مثال ۱

برای ترانسفورماتوری سه فاز مطابق IEC [1] و [3] :

ولتاژ نامی 65/15 kV ؛ هر دو سیم پیچ با عایق بندی یکنواخت ؛ با اتّصال YNyn

HV U_m = ۷۲/۵ kV؛ LV U_m = ۱۷/۵ kV

سطوح عایقی :

- HV و نوترال HV : LI/AC ۳۲۵/۱۴۰kV
- LV و نوترال LV : LI/AC ۹۵/۳۸ kV

تست های روتین :

- تست ولتاژ اعمالی : (بخش ۷ را ببینید)
  - HV و نوترالHV : ۱۴۰ kV
  - LV و نوترالLV : ۳۸ kV
- تست ولتاژ القایی : (بخش ۸ را ببینید)
  تست سه- فاز (فاز به فاز)

  تغذیه سه فاز LV با :
  ۳۲ kV (= ۲/۱۵ * ۱۵) برای رسیدن به ۱۴۰kV فاز به فاز ؛ مساوی ۲/۱۵ برابر ولتاژ حلقه- به- حلقه
- تست LI فقط به عنوان تست تایپ

مثال۲

برای ترانسفورماتوری سه- فاز مطابق IEC [1] و [3] :

ولتاژ نامی ۲۴۰/۶۰/۲۴ kV ؛ با اتصال YNynd

- خطِHV U_m = ۲۴۵ kV
- نوترالHV U_m = ۷۲/۵ kV
- خط و نوترالMV U_m = ۷۲/۵ kV عایق بندی یکنواخت
- خط LV U_m = ۲۴ kV با اتصال- d

سطوح عایقی :

- ترمینال های خط HV : SI / LI ۸۵۰/۱۰۵۰ kV
- نوترال HV : LI / AC ۳۲۵ / ۱۴۰ kV
- ترمینال های خط MV : LI / AC ۳۲۵ / ۱۴۰ kV
- نوترال MV : LI / AC ۳۲۵ / ۱۴۰ kV
- ترمینال های خط LV : LI / AC ۱۲۵ / ۵۰ kV

تست های روتین :

- تست SI با ۸۵۰ kV (بخش ۱۰)
- تست LI با ۱۰۵۰ kV (بخش ۱۰)
- تست LI با ۳۲۵ kV (بخش ۱۰)
- تست ولتاژ اعمالی (بخش ۷)

- HV و نوترال HV با ۱۴۰ kV
- MV با ۱۴۰ kV
- LV با ۵۰ kV

- تست ولتاژ القایی ACLD (بخش ۸)

با اندازه گیری PD (بخش ۹)

- تغذیه سه- فاز LV برای رسیدن به U_P = ۱/۷ U_m / √ ۳= ۲۴۰ kV نسبت به زمین یا ۴۱۵ kV فاز- به- فاز ، مساوی حدود ۱/۷۳ برابر ولتاژ حلقه به حلقه .

اندازه گیری PD در ولتاژ ۱/۵ U_m / √ ۳ =۲۱۲ kV نسبت به زمین برای ۳۰ دقیقه.

همچنین اندازه گیری PD باید در ۱/۱ U_m انجام گیرد.

مثال ۳

برای اتو ترانسفورماتور تک فاز مطابق [1] و [3] :

ولتاژ نامی : ۴۰۰/۱۵۰/۲۴ kV

- خط HV ، U_m = ۴۲۰ kV ، اتّصال اتو ترانس
- خط MV ، U_m =۱۷۰ kV
- نوترال HV و LV ، U_m =۱۷/۵ kV
- خط LV ، U_m = ۲۴ kV با اتصال d

سطوح عایقی :

- HV : kV ۳۸ AC- ۱۳۰۰ LI / ۱۰۵۰ SI
- MV : kV ۳۸ AC- ۶۵۰ LI
- LV : kV ۵۰ AC/ ۱۲۵ LI

تست های روتین :

- تست SI با ۱۰۵۰ kV (بخش ۱۰)
- تست LI با ۱۳۰۰ kV (بخش ۱۰)
- تست ولتاژ اعمالی (بخش ۷)

- HV و MV و نوترال مشترک با ۳۸ kV
- LV با ۵۰ kV

- تست ولتاژ القایی ACLD (بخش ۸)

با اندازه گیری PD (بخش ۹)

- تغذیه تک- فاز LV برای رسیدن به

- U_P = ۱/۷ U_m /√ ۳ = ۴۱۲ kV؛ مساوی ۱/۷ برابر ولتاژ حلقه به حلقه

اندازه گیری PD در ۱/۵ U_m /√۳ = ۳۶۳ kV نسبت به زمین برای ۶۰ دقیقه .

همچنین اندازه گیری PD باید در ۱/۱ U_m نیز انجام گیرد .

مثال ۴

برای ترانسفورماتور سه- فاز مطابق IEEE ، دسته I ؛ [50] ، [51] :

ولتاژ نامی : ۶۵ / ۱۵ kV با اتصال YNyn و عایق بندی یکنواخت :

سطوح عایقی :

؛ HV BIL = ۳۵۰ kV ؛ LV BIL = ۱۱۰ kV؛

- سطح عایقی فرکانس پایین : HV : ۱۴۰ kV
- سطح عایقی فرکانس پایین : LV : ۳۴ kV

تست های روتین :

- تست ولتاژ اعمالی (بخش ۷)
  - HV و نوترال HV : ۱۴۰ kV
  - LV و نوترال LV : ۳۴ kV
- تست ولتاژ القایی (فاز- به- فاز) (بخش ۸)
  - تغذیه سه- فاز LV با (۶۵ ÷ ۱۵ * ۱۱۵ =) ۲۶/۵ kV برای رسیدن به ۱۱۵kV بین فازها مطابق ستون ۲ جدول 7 مرجع [50]
- تست ضربه صاعقه فقط به عنوان تست طرح یا " دیگر" .

مثال ۵

برای ترانسفورماتورهای سه- فاز مطابق IEEE ، دسته II ؛ [50] ، [51] :

ولتاژ نامی ۱۵ kV/ ۱۳۰ ؛ با اتصال YNyn و عایق بندی غیر یکنواخت.

سطوح عایقی :

- HV : ولتاژ نامی سیستم : ۱۳۸ kV ، BIL ۵۵۰
- HV : نوترال : ولتاژ نامی سیستم : ۲۵ kV
- LV : ولتاژ نامی سیستم : ۱۵ kV ، BIL ۱۱۰ kV

تست های روتین :

- تست ضربه با ۵۵۰ kV (بخش ۱۰)
- تست ولتاژ اعمالی (بخش ۷)
  - HV و نوترالHV : ۳۴ kV
  - LV و نوترالLV : ۳۴ kV
- تست ولتاژ القایی با اندازه گیری PD (بخش های ۸ و ۹)

تست بلند مدت فاز- به- فاز با تغذیه سه فاز متقارن LV :

" سطح ۶۰ ثانیه " (enhancement level) تا ۱۴۵ kV (فاز به زمین) و "سطح یک ساعت" با ۱۲۵ kV (فاز به زمین) ، مطابق ستون ۵ و ۶ جدول 6 مرجع [50] .

تست ترانسفورماتورهای قدرت

۳- اندازه گیری مقاومت سیم پیچ

POWEREN.IR

۳- ۱ مراجع / استانداردها

- IEC 60076-1 (2000), 10.2
  " Measurement of winding resistance " [1]
- IEEE Std C57.12.90- 1999 , clause 5 :
  "Resistance Measurement " [51]

توجّه :

اندازه گیری مقاومت سیم پیچ بر طبق استاندارد IEC [1] و استاندارد IEEE [50] یک تست روتین است .

۳- ۲ منظور از تست

مقدار مقاومت سیم پیچ کاربردهای مهم زیر را دارد :

- تعیین مقدار مقاومت پایه برای محاسبهٔ تلفات بار
- تعیین مقدار مقاومت پایه برای اندازه گیری دمای سیم پیچ و جهش حرارتی سیم پیچ به روش غیر مستقیم
- به عنوان قسمتی از برنامه تضمین مرغوبیت کارخانه ای ، برای مثال جهت تایید پیوستگی الکتریکی در داخل سیم پیچ .

۳- ۳ کلیات

مقاومت سیم پیچ عبارت است از مقاومت DC (مقاومت واقعی یا فعال (active)) سیم پیچ بر حسب اهم [Ω].

وابستگي دمايی

باید توجه داشت که مقاومت ویژه هادی در یک سیم پیچ ـ مس یا آلومینیوم ـ کاملاً به دمای آن وابسته است . برای دماهایی در محدودهٔ کار عادی یک ترانسفورماتور ، ارتباط بین مقاومت و دما با دقّت کافی به صورت زیر بیان می شود :

$$R_2 = R_1 \frac{C+\Theta_2}{C+\Theta_1}$$

که در آن :

R_1 = مقاومت در دمای Θ_1
R_2 = مقاومت در دمای Θ_2
Θ = دما بر حسب درجه سانتیگراد
C = مقدار ثابتی که تابعی از نوع ماده می باشد .

طبق IEC [1] :

C = ۲۳۵ برای مس
C = ۲۲۵ برای آلومینیوم

استاندارد IEEE [51] یک مقدار با اختلاف جزئی برای مس تعریف کرده است :
C = ۲۳۴/۵

در هر صورت مقدار مقاومت بدون تعیین دمای اندازه گیری آن بی معنی است .

باید اشاره کرد که اندازه گیری مقاومت یک روش غیر مستقیم برای مشخص کردن دمای سیم پیچ است . بنابراین می توان دمای سیم پیچ را در هر دمای نامعین ، با تکرار اندازه گیری مقاومت مشخص کرد .

(دمای سیم پیچ باید بر طبق استانداردهای ارجاع شده در بند ۳- ۱ اندازه گیری شود .)

رفتار سیم پیچ هنگام اندازه گیری مقاومت

هنگام اندازه گیری مقاومت یک سیم پیچ نه تنها یک مقاومت بلکه یک اندوکتانس بزرگ را نیز از خود نشان می دهد .

هنگامی که ولتاژ بین دو ترمینال سیم پیچ اعمال می شود ، ارتباط بین ولتاژ و جریان به صورت زیر است :

$$u = R \cdot i + L\frac{\delta i}{\delta t} \quad \text{یا} \quad u = R \cdot i + C\frac{\delta \Phi}{\delta t}$$

که در آن :

U = ولتاژ اعمال شده ، مقدار لحظه ای

I = جریان تغذیه شده ، مقدار لحظه ای

$\frac{\delta \Phi}{\delta t}$ = مشتق شار ناشی از جریان سیم پیچ ، نسبت به زمان

C = عدد ثابت

L = اندوکتانس ، توجه شود که L وابسته به جریان است

$\frac{\delta i}{\delta t}$ = مشتق جریان

هنگامی که ولتاژ DC ثابتی به سیم پیچ ترانسفورماتور اعمال شود تابع *i(t)* به صورت منحنی شکل ۳- ۱ خواهد بود .

برای ترانسفورماتور با هسته اشباع نشده ، اندوکتانس در تقریب اوّل ممکن است بی نهایت باشد . اگر مقاومت به صورت ولتاژ اعمالی تقسیم بر جریان تحویلی تعریف شود تا زمانیکه جمله مشتق فلو در معادله بالا قابل چشم پوشی نباشد ، خطای قابل ملاحظه ای در اندازه گیری مقاومت ایجاد می شود .

برای جزئیات بیشتر ، بند های ضمیمه ۳- ۱ و ضمیمه ۳- ۲ را ببینید .

شکل ۳- ۱ : منحنی جریان- زمان با اعمال ولتاژ DC برای سیم پیچ ترانسفورماتور

۳- ۴ اصول و روش های اندازه گیری مقاومت

اساساً دو روش مختلف برای اندازه گیری مقاومت وجود دارد : که عبارتند از به اصـطلاح روش" ولتمتر- آمپر متر"و روش پل .

۳- ۴- ۱ روش" ولتمتر- آمپرمتر"

اندازه گیری با جریان DC انجام می شود . ولتاژ و جریان در یک لحظه قرائت می شوند. مقاومت بر اساس مقادیر خوانده شده ، طبق قانون اهم محاسبه می شـود . انـدازه گیـری ممکن است با استفاده از ابزار اندازه گیری آنالوگ (که امروزه بندرت استفاده می شود) یـا دیجیتال انجام شود ؛ به هرحال امروزه ابزارهای دیجیتال مانند سیستم هـای جمـع آوری داده (DAS: data acquisition system) که مقاومت را مستقیماً نمایش مـی دهنـد بیشتر مورد استفاده است .

اندازه گیری با ولتمتر و آمپرمتر

مدار اندازه گیری در شکل ۳- ۲ نشان داده شده است .

مقاومت R_X بر طبق قانون اهم محاسبه می شود :

$$R_X = \frac{U}{I}$$

مزیت این روش در سادگی مدار تست است . از طرف دیگر ، این روش دقّت کمـی دارد و لازم است دو دستگاه اندازه گیری همزمان در یک لحظه قرائت شود .

اندازه گیری مقاومت با سیستم های جمع آوری داده (DAS) یا به کمـک پـاور آنـالیزر [202]

در سیستم های جمع آوری داده (DAS) و پاورآنالیزر قدرت نیز از اصـول مشابه اسـتفاده می شود .

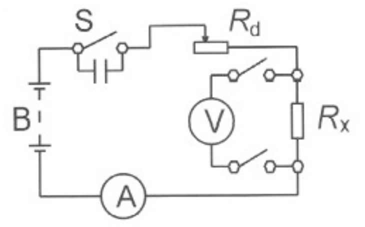
در هر دو روش مقادیر ولتاژ و جریان همزمان بطور اتوماتیک ثبت می شود ، شـکل ۳- ۳ را ببینید .

۳- ۴- ۲ اندازه گیری مقاومت با استفاده از پل کلوین (تامسون)

این اندازه گیری براساس مقایسه دو افت ولتاژ است که عبارتند از : افـت ولتـاژ در دو سـر مقاومت ناشناخته R_X و افت ولتاژ دو سر مقاومت معلوم R_N (مقاومت اسـتاندارد) ، شـکل ۳- ۴ .

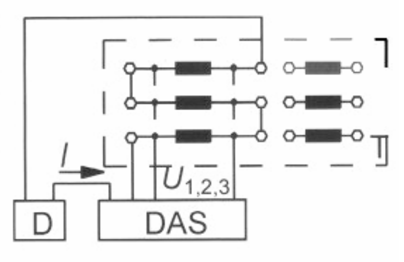
جریان DC ایجاد شده از R_X و R_N عبور کرده و افت ولتاژهای مربوطه اندازه گیـری و مقایسه می شود .

پل با تغییر دو مقاومت R_{dec} و R_V به تعادل می رسد ، ایـن دو مقاومـت نسـبتاً بـزرگ هستند . تعادل هنگامی برقرار می شود که انحراف گالوانومتر صـفر باشـد ، در ایـن موقـع داریم :



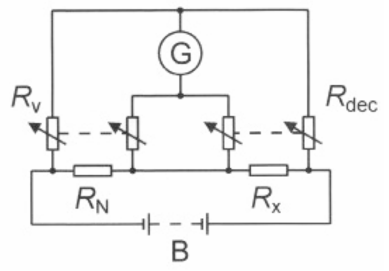
R_X = مقاومت مجهول
(ترانسفورماتور تحت آزمایش)
R_d = مقاومت تنظیم
S = قطع کننده مدار با جفت گوی حفاظتی
B = منبع DC

شکل ۳- ۲ : مدار اندازه گیری با روش ولت متر- آمپرمتر



D = منبع DC
DAS = سیستم جمع آوری داده
T = ترانسفورماتور با مقاومت مجهول

شکل ۳- ۳ : مدار اندازه گیر ی آنالیزر توان



R_X = مقاومت مجهول
(ترانسفورماتورتحت آزمایش)
R_N = مقاومت استاندارد
R_{dec} = مقاومت دهدهی (Decade resistance)
R_V = مقاومت متغییر
G = گالوانومتر
B = منبع DC

شکل ۳-۴ : مدار اندازه گیری پل کلوین (تامسون)

$$R_X = R_N \frac{R_{dec}}{R_V}$$

تأثیر مقاومت نقاط اتّصال و مقاومت های کابل های رابط (حتّی اتّصال بـین R_X و R_N) قابل صرف نظر است .

شکل ۳- ۹ در بند ۳ ضمیمه ۳ یک مدار آزمایشگاهی واقعی را برای اندازه گیری مقاومت با استفاده از پل کلوین (تامسون) با مقاومت های استاندارد بیرونی نشان می دهد .

مزیّت روش پل دقّت بالای آن می باشد . از طرف دیگر مدار پل پیچیده تر است ؛ کار بـا پل احتیاج به کسب تجربه دارد .

۳- ۵ فرآیند اندازه گیری

۳- ۵- ۱ کلّیات

بعد از روشن کردن منبع ولتاژ DC ، تا زمانیکه جریـان بـه حالـت پایـدار نرسـیده باشـد ، مقادیر خوانده شده قابل استناد نیستند . پدیده کلید زنی ، باعث ایجـاد ولتاژهـایی القـایی می شود که در مقدار خوانده شـده مقاومـت تـاثیر دارد ، شـکل ۳ بخـش ۳- ۳ و بنـد ۲ ضمیمه ۳ را ببینید .

۳- ۵- ۲ روش ولتمتر- آمپرمتر

مقدار جریان DC استفاده شده برای اندازه گیری :

بیشترین مقدار :
۱۰% جریان نامی سیم پیچ ، (استاندارد IEEE [51] تا ۱۵% را مجاز می داند) .

کمترین مقدار :
در حدود ۱/۲ برابر مقدار پیک جریان مغناطیس کنندگی .

برای جزئیات و توضیحات ، بند ۲ ضمیمه ۳ را ببینید .

مراحل زیر باید انجام شود :

- سیم پیچ مورد اندازه گیری باید طبق شکل ۳- ۲ وصل شود .
- مقادیر ولت و آمپر باید همزمان خوانده شود .
- سیم های ولتمتر باید مستقل از سیم های اندازه گیری جریان باشـد و محـل اتّصال آنها باید تا حد امکان به ترمینال های سیم پیچ مورد اندازه گیری نزدیک باشد .
- برای حفاظت ولتمتر در مقابل صدمه دیدن که بخاطر انحراف بیش از حد عقربـه هـا پیش می آید ، قبل از اینکه جریان وصل یا قطع گردد ولتمتر باید از مدار جدا شود .

مدار اندازه گیری برای" روش ولتمتر- آمپر متر " با اسـتفاده از سیسـتم جمـع آوری داده مانند پاور آنالیزر در شکل ۳- ۳ نشان داده شده است .

برای الزامات تجهیزات بند ۱ ضمیمه ۳ را ببینید .

۳- ۵- ۳ اندازه گیری با استفاده از پل کلوین (تامسون)

پل باید به سیم پیچ ترانسفورماتور بر طبق شکل ۳- ۴ وصل شود . مقاومت استاندارد R_N و مقاومت متغیّر R_V باید طوری انتخاب شود که از رنج کامل مقاومت دهدهی استفاده شود . اندازه گیری با تغییر مرحله به مرحلهٔ مقاومت دهدهی R_{dec} و افزایش حسّاسیت گالوانومتر انجام می شود تا اینکه انحراف گالوانمتر صفر شود .

مقاومت نامعلوم عبارت است از :

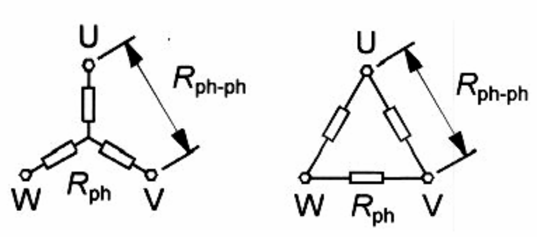
$$R_X = R_{dec}\frac{R_N}{R_V}$$

نسبت R_N /R_V معمولاً ۱۰ است ، پس مقدار عددی مقاومت نامعلوم مستقیماً از روی نشانگر دهدهی قابل قرائت است .

برای الزامات تجهیزات اندازه گیری ، بند ۱ ضمیمه ۳ را ببینید .

۳- ۶ تفسیر مقادیر اندازه گیری شده

برای ترانسفورماتورهای سه فاز مقاومت فاز R_{ph} و یا مقاومت خط به خط R_{ph-ph} اندازه گیری می شود ، شکل ۳- ۵ را ببینید .



R_{ph-ph} = ۲ * R_{ph} اتصال ستاره

R_{ph-ph} = ۲/۳ * R_{ph} اتصال مثلث

شکل ۳- ۵ : اندازه گیری مقاومت برا ی اتصال ستاره یا مثلث

۳- ۷ مثال ها

مثال هایی از روش های مختلف اندازه گیری مقاومت را در بند ۴ ضمیمه ۳ ببینید .

۳- ۸ عدم قطعیت در اندازه گیری های مقاومت

استاندارد IEEE [50] ، دقت ۰/۵ % ± را برای اندازه گیری مقاومت و ۱ °C ± را برای اندازه گیری دما لازم می داند .

روش ولتمتر- آمپرمتر

برای نمونه با استفاده از تجهیزات آنالوگ عدم قطعیت ۰/۵ % است (کلاس دقت ۰/۲ برای دستگاههای اندازه گیری و ۰/۱ برای مقاومت های استاندارد استفاده شده در اندازه گیری جریان) .

برا ی تجهیزات دیجیتال ، عدم قطعیت در عمل ۰/۱۵ % است (۰/۰۲۵ برای دستگاههای اندازه گیری ، ۰/۱ برای مقاومت استاندارد) .

روش پل

عدم قطعیت روش پل معمولاً ۰/۱ % است .

بخاطر اینکه مقاومت کاملاً به دما بستگی دارد و دما را می توان در عمل با عدم قطعیت ۱ °C ± اندازه گیری کرد (متناسب با ۰/۴ %± در مقاومت) ، در کل ، عدم قطعیت اندازه گیری مقاومت سیم پیچ ۰/۹ % - ۰/۵ می باشد .

ضمیمة ۳ :

اندازه گیری مقاومت سیم پیچ

ضمیمه ۳- ۱   الزامات کلی برای تجهیزات

منبع DC

برای کاهش خطای ناشی از منبع ، تغذیة مدار اندازه گیری با منبع جریان ثابت اهمیت خاصی دارد .

در گذشته یک منبع جریان کم و بیش ثابت با استفاده از یک منبع ولتاژ و یک مقاومت سری بزرگ ساخته می شد . این نوع منبع جریان از یک باطری با آمپر ساعت بالا و یک مقاومت سری با آن تشکیل می گردید .

منابع جریان مدرن از مدارهای الکترونیک ساخته شده اند و می توانند جریان های از پیش تعیین شده را با رنج ولتاژی وسیع تامین کنند .

قطع کننده مدار

با قطع لحظه ای جریان اندازه گیری DC ، یک مدار تخلیه مجهز به تریستور یا یک جفت- گوی حفاظتی ، ولتاژ خود- القایی بوجود آمده در سیم پیچ (شوک القایی) را محدود می کند . بدین ترتیب از فرسایش تیغه های قطع کنندة مدار نیز کاسته می شود .

مقاومت سری قابل تنظیم

(مخصوصاً هنگامی که از یک باطری به عنوان منبع DC استفاده شود)

این مقاومت نه تنها جریان اندازه گیری را تنظیم می کند بلکه اثر مهمی در کاهش زمان مورد نیاز برای رسیدن به مقدار پایدار جریان دارد ؛ این مقاومت باید غیر القایی بوده و از موادی ساخته شود که وابستگی آنها به دما جزئی باشد و به صورت سری با منبع DC قرار گیرد . شکل ۳- ۲ را ببینید .

آمپرمتر و ولتمتر

امروزه به جای وسایل آنالوگ متداول از ولتمتر و آمپرمتر دیجیتال (مولتی متر) به طور گسترده ای استفاده می شود . در هر صورت استاندارد استفاده از وسایل آنالوگ را مجاز می داند .

پل کلوین (تامسون)

برای تنظیم تعادل پل ، استفاده از گالوانومتر مجزا از نوع انعکاسی با حسّاسیت بالا پیشنهاد می شود . باید توجّه شود که مقاومت سیم های پتانسیل کمتر از Ω ۰/۰۱ باشد . بعلاوه ، باید مقاومت دو سیم پتانسیل یکسان باشد . مقاومت سیم های بین R_X و R_N نباید بیشتر از ۲۰ الی ۵۰ برابر R_X باشد . مقاومت تنظیم کننده R_d نباید بین R_X و R_N قرار بگیرد ، شکل ۳- ۹ را ببینید .

ضمیمه ۳- ۲ مقدار جریان DC اندازه گیری

(بخش ۳- ۵ را نیز ببینید)

بیشترین مقدار :

برای جلوگیری از افزایش غیرمجاز دمای سیم پیچ در حین اندازه گیری ، جریان DC باید کمتر از ۱۰ % جریان نامی سیم پیچ باشد .

کمترین مقدار :

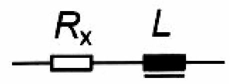
حد پایین جریان DC با ملاحظات زیر بدست مي آيد :

برای همهٔ روش های اندازه گیری مقاومت ، مدار اندازه گیری شامل یک منبع DC و یک سیم پیچ ترانسفورماتور است که به دور هسته آهنی پیچیده شده و با مدار معادل شکل ۳- ۶ نشان داده شده است ، بخش ۳- ۳ را نیز ببینید .

اندوکتانس سیم پیچ ترانسفورماتور وابستگی شدیدی به جریان دارد که با مشخّصهٔ شکل ۳- ۷ داده شده است .

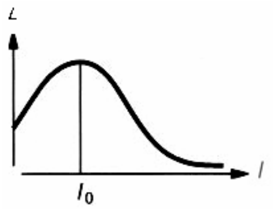
چون ثابت زمانی مدار اندازه گیری با نسبت L / R تعیین می شود ، بسته به مقدار جریان اندازه گیری (جریان مغناطیس کنندگی) ، مشخصه جریان- زمان هنگام وصل منبع DC متغیر خواهد بود ، شکل ۳- ۸ را ببینید .

در نتیجه ، برای اطمینان از اشباع هسته آهنی جریان اندازه گیری DC حداقل باید ۱/۲ برابر بیشتر از مقدار پیک جریان مغناطیس کنندگی باشد .



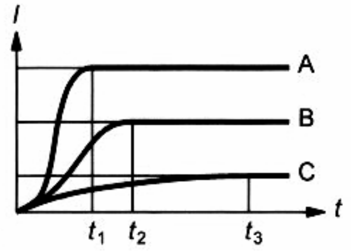
R_X = مقاومت مجهول سیم پیچ
(در محدوده mΩ ۱ تا mΩ ۱۰)
L = اندوکتانس بی باری سیم پیچ
(در محدوده H ۱ تا H ۱۰۰)

شکل ۳- ۶ : مدار معادل سیم پیچ ترانسفورماتور



L = اندوکتانس سیم پیچ ترانسفورماتور
I = جریان اندازه گیری ، جریان مغناطیس کنندگی
Io = جریان بی باری

شکل ۳- ۷ : اندوکتانس سیم پیچ ترانسفورماتور به نسبت تابعی از جریان



A = هسته کاملاً اشباع شده
B = هسته کمی اشباع شده
C = هسته اشباع نشده
$t_{1,2,3}$ = زمان تا ثابت شدن جریان اندازه گیری

شکل ۳- ۸ : زمان تا حالت پایدار به میزان اشباع بستگی دارد .

ضمیمه ۳- ۳   مدار اندازه گیری کلوین (تامسون)

شکل ۳- ۹ مدار واقعی مورد استفاده در آزمایشگاه را برای اندازه گیری مقاومت با استفاده از پل کلوین (تامسون) همراه با مقاومت های استاندارد بیرونی نشان می دهد .

ضمیمه ۳- ۴   مثال ها

ضمیمه ۳- ۴- ۱   روش ولتمتر- آمپرمتر با استفاده از سیستم جمع آوری داده (پاور آنالایزر)

منبع DC : V ۵۰ ، A ۳۰

آنالایزر قدرت نوع : D6100 (LEM – Norma)

Θ_C = ۲۴/۵ ° C

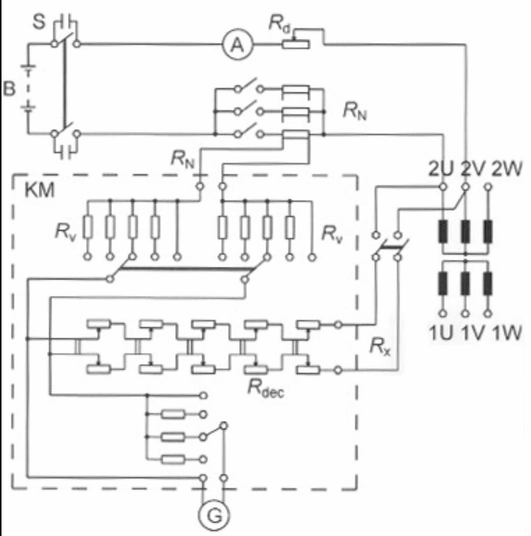
ضمیمه ۳- ۴- ۲   اندازه گیری مقاومت با پل کلوین (تامسون)

سیم پیچ HV ، Θ_C = ۲۲/۵ ° C

$$R_X = R_{dec}\frac{R_N}{R_V}$$

R_V = ۱۰۰ Ω

R_N = ۰/۱ Ω



R_x = مقاومت مجهول (ترانسفورماتور مورد آزمایش)

R_N = مقاومت استاندارد

R_{dec} = مقاومت دهدهی

R_V = مقاومت متغیر

R_d = مقاومت تنظیم کننده

G = گالوانومتر

B = منبع DC

S = قطع کننده مدار با جفت گوی حفاظتی

KM = پل کلوین (تامسون)

شکل ۳- ۹ : مدار اندازه گیری پل کلوین (تامسون)

HV:	1U – 1V	۶۸۵/۶۰ m Ω
	1V – 1W	۶۸۵/۴۰ m Ω
	1W – 1U	۶۸۵/۹۰ m Ω
	متوسط	۶۸۵/۶۳ m Ω
LV:	2U – 2V	۱/۱۸۲ m Ω
	2V – 2W	۱/۱۸۲ m Ω
	2W – 2U	۱/۱۸۰ m Ω
	متوسط	۱/۱۸۱ m Ω

عدم قطعیت اندازه گیری < ۰/۱ %

(عدد فوق شامل عدم قطعیت اندازه گیری دما نیست)

	Rdec [ohm]	R [ohm]
1U – 1V	۸۵۷/۲۱	۰/۸۵۷۲۱
1V – 1W	۸۵۷/۲۶	۰/۸۵۷۲۶
1W – 1U	۸۵۷/۴۲	۰/۸۵۶۴۲

عدم قطعیت اندازه گیری در حدود ۰/۱ %

(عدد فوق شامل عدم قطعیت اندازه گیری دما نیست)

۳- اندازه گیری مقاومت سیم پیچ

تست ترانسفورماتورهای قدرت

۴- تست نسبت تبدیل ولتاژ و گروه بـرداری یا جابجایی فاز

۴- ۱ مراجع / استانداردها

- IEC 60076-1 (2000), clause 6: "Connection and voltage displacement symbols for three-phase transformers", clause 10.3: "Measurement of voltage ratio and check of phase displacement" [1]
- IEEE Std C57.12.90-1999, clause 6: "Polarity and phase relation test", clause 7: "Ratio tests" [51]

توجّه :

اندازه گیری نسبت تبدیل ولتاژ و کنترل گروه برداری یا جابجایی فاز بر طبق استاندارد IEC [1] و استاندارد IEEE [50] تست روتین می باشد .

۴- ۲ منظور از تست

اندازه گیری نسبت تبدیل ولتاژ و جابجایی فاز در وهلهٔ اول برای بهره برداری موازی دو یا چند ترانسفورماتور انجام می گیرد .

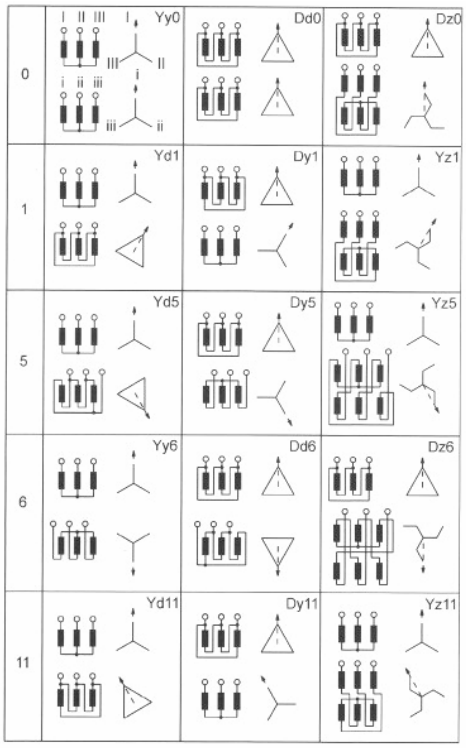
۴- ۳ کلّیات

۴- ۳- ۱ گروه برداری و جابجایی فاز

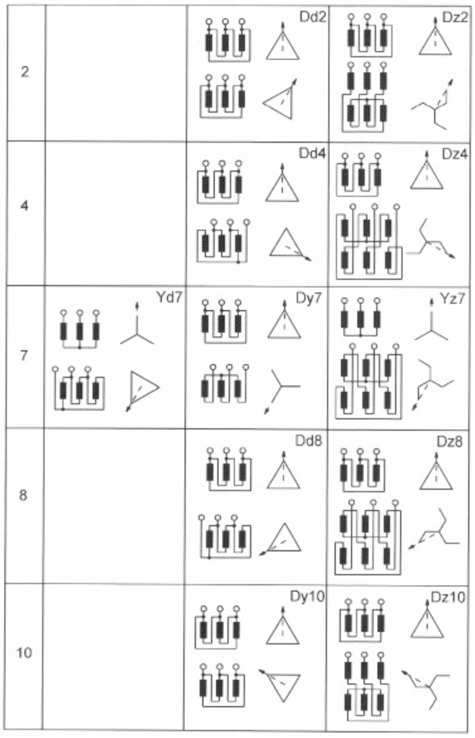
اتّصالات سیم پیچ های مجزای ترانسفورماتورهای چند فاز بسته به کاربرد آنها ممکن است به صورت ستاره ، مثلث یا زیگزاگ باشد . بسته به روش اتّصال ، جابجایی فاز بین سیم پیچ ها بین ۰° و ۳۶۰° است . برای جلوگیری از ایجاد جریان های گردشی در حالت بهره برداری موازی ترانسفورماتورها ، باید نسبت تبدیل بی باری و گروه برداری یکسان باشد .

۴- ۳- ۲ استاندارد IEC [1]

گروه های برداری بر طبق استاندارد IEC 60076 -1 مطابق شکل های ۴- ۱ و ۴- ۲ می باشد .



شکل ۴- ۱ : اتصالات متداول IEC 60076-1 [1]



شکل ۴- ۲ : سایر اتصالات IEC 60076-1 [1]

در این شکل ها برای ترانسفورماتورهای سه فاز ، گروه برداری و نحوهٔ اتّصال نشان داده شده است . دیاگرام برداری سیم پیچ فشارقوی در صفحه ساعت قرار مي گيرد به طوري که نوک بردار I (1U) در ساعت ۱۲ باشد . وقتی که دیاگرام برداری سیم پیچ فشارضعیف ، با احتساب چرخش فازی روی آن قرار گرفت ، نوک بردار I (2U) در صفحه ساعت ، عدد گروه برداری را نشان می دهد ، شکل های ۴- ۳ و ۴-۴ را ببینید . برای اتّصال زیگزاگ ، نیم سیم پیچ (زاگ) نزدیک ترمینال نشان دهندهٔ علامت ترمینال می باشد . اگر نیم سیم پیچ نزدیک ترمینال در بازوی V باشد آن ترمینال 2V نامیده می شود .

برای گروه برداری ترانسفورماتورهای سه فاز، سیم پیچ فشار قوی مرجع زاویهٔ فاز برای سیم پیچ فشار متوسط و فشار ضعیف می باشد ؛ برای مثال YNyn0d5 را در شکل ۴-۴ ببینید .

نقطهٔ نوترال قابل دسترسی از بیرون ، با حرف N یا n مشخص می شود ؛ مثل Dyn11 ، شکل ۴- ۴ را ببینید .

گروه های برداری ویژه معمولاً به کمک دیاگرام فازوری (phasor diagram) نمایش داده می شوند . اتو ترانسفورماتور را در شکل ۴- ۴ ببینید .

۴- ۳- ۳ استاندارد **IEEE** [51]

گروه های برداری مربوطه در استاندارد IEEE C57.12.90 موجود است ؛ شکل های 7 و 8 مشابه گروه های برداری IEC می باشند . ترمینال های سمت فشار قوی با H_1 ، H_2 ، H_3 و سمت فشار ضعیف با X_1 ، X_2 ، X_3 نشان داده می شوند .

۴- ۴ اندازه گیری نسبت ولتاژ

نسبت ولتاژها را می توان با استفاده از روش اندازه گیری مستقیم ولتاژها با ولتمتر ، یا با استفاده از پل اندازه گیری نسبت تبدیل تعیین نمود . برای روش اوّل ، نسبت تبدیل با توجه به دو ولتاژ اندازه گیری شده - ولتاژ اوّلیه و ثانویه ترانسفورماتور مورد آزمایش- محاسبه می شود . با استفاده از پل نسبت تبدیل ، خطا و مقدار واقعی نسبت تبدیل مستقیماً خوانده می شود .

ماکزیمم خطای نسبی ، یا درصد انحراف مقدار واقعی نسبت به مقدار از پیش تعریف شده در استانداردها مشخص شده است .

درصد مجاز انحراف مطابق IEC 60076-1 ، بند 9 [1] :

برای تپ نامی جفت سیم پیچ اصلی : کمتر از% ۰/۵ ± نسبت تعریف شده یا کمتر از ۰/۱ برابر امپدانس اتصال کوتاه واقعی . برای تپ های دیگر از جفت سیم پیچ اصلی و برای جفت سیم پیچ های بعدی : مطابق توافق ، به طوري كه از كوچكترين دو مقدار اشاره شده در بالا کمتر نباشد .

و مطابق استاندارد IEEE C57.12.00 بند 9 [50] :

% ۰/۵ ± نسبت ولتاژ های نامی سیم پیچ ها در تپ های مربوطه .

کلمهٔ " نسبت ولتاژ " طبق تعریف عبارت است از مقدار محاسباتی نسبت ولتاژها (نسبت دورها) :

$$r = \frac{N_p}{N_s} = \frac{E_p}{E_s}$$

که در آن :

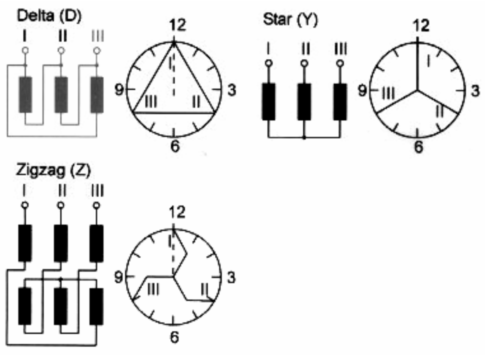
r = نسبت ولتاژ

E = ولتاژ مدار باز

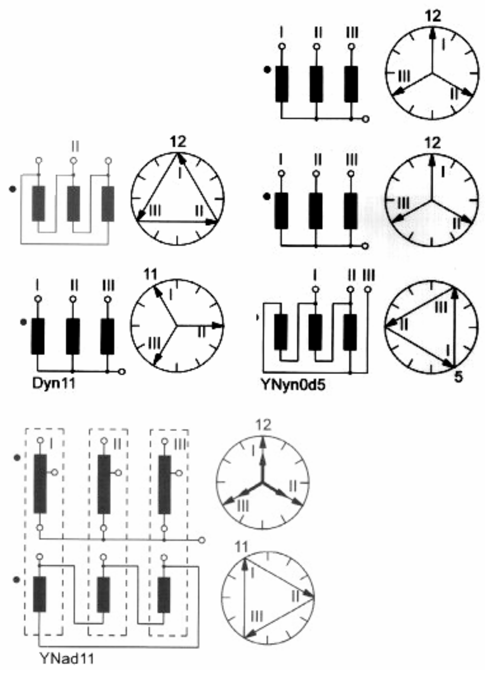
N = نسبت دورها

p = اولیه

s = ثانویه



شکل ۴- ۳ : تشریح گروه برداری با صفحهٔ ساعت
[1] IEC 60076-1



شکل ۴-۴ : چند مثال برای نمایش زاویهٔ گروه برداری
[1] IEC 60076-1

هنگام استفاده از دو ولتمتر خطای نسبت به صورت زیر است :

$$r_{act} = \frac{U_p}{U_s} \qquad r_{decl} = \frac{U_{pN}}{U_{sN}}$$

$$f = \frac{r_{act} - r_{decl}}{r_{decl}} \cdot 100(\%)$$

که در آن :

r_{decl} = مقدار نسبت تعریف شده
r_{act} = مقدار نسبت واقعی
U_{pN} = ولتاژ نامی اوّلیه
U_{sN} = ولتاژ نامی ثانویه
f = خطای نسبت تبدیل بر حسب %

هنگام استفاده از پل ، خطای نسبت تبدیل یا مستقیماً خوانده شده و یا از مقدار نسبت تبدیل واقعی به روش زیر محاسبه می شود :

$$f = \frac{r_{act} - r_{decl}}{r_{decl}} \cdot 100\%$$

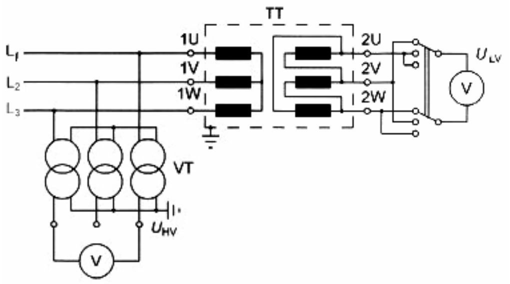
هنگام استفاده از روش دو ولتمتری برای جلوگیری از خطاهای اندازه گیری بایستی توجّه شود که ترانسفورماتور مورد آزمایش بیش از حد با ولتمترها و ترانسفورماتورهای ولتاژ بارگیری نشود . این روش برای ترانسفورماتورهای راه انداز (starting) و ترانسفورماتورهای کوره مناسب است . با استفاده از ترانسفورماتورهای ولتاژ ، پل اندازه گیری را می توان برای هر نوع اتّصال ترانسفورماتور و هر ولتاژ نامی به کار برد .

اندازه گیری بر پایه روش جبران سازی استوار است و مدار تست ، مشابه مجموعهٔ تجهیزات بکار برده شده برای تست ترانسفورماتورهای اندازه گیری مانند آلبرتی- شرینگ می باشد ، با این اختلاف که مدار RC تعیین خطای زاویهٔ فاز از آن حذف شده است . عدم قطعیت اندازه گیری این روش ۰/۱% ± است ، بنابراین بر الزامات استاندارد منطبق است . هنگام تعادل پل ، ترانسفورماتور مورد آزمایش زیر بار نیست یا بار آن بسیار جزئی است . تغذیهٔ پل بین ۲۵۰V -۱۰۰ ، AC (با فرکانس نامی ترانسفورماتور مورد آزمایش) می باشد ، که تقریباً در هر جا در دسترس است . هنگام اندازه گیری نسبت تبدیل با پل ، همزمان جابجایی فاز نیز کنترل می شود .

۴- ۵ مدار تست

۴- ۵- ۱ اندازه گیری نسبت با استفاده از دو ولتمتر

مدار اصلی برای تمام گروه های برداری یکسان است ، شکل ۴- ۵ را ببینید . برای جلوگیری از وقوع اضافه ولتاژ خطرناک ، ترانسفورماتور از طرف فشار قوی تغذیه می شود . ممکن است لازم باشد از ترانسفورماتورهای ولتاژ واسطه استفاده شود . برای به حداقل رساندن بار ترانسفورماتور لازم است ولتمتر طرف فشار ضعیف ، مقاومت ورودی بالایی داشته باشد .



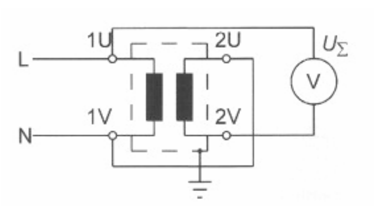
شکل ۴- ۵ : اندازه گیری نسبت تبدیل ولتاژ با دو ولتمتر

۴- ۵- ۲ تست پلاریته با استفاده از ولتمتر

ترانسفورماتور تک فاز

برای ترانسفورماتور تک فاز ، پلاریته ممکن است مثبت یا منفی باشد . سیم پیچ فشار ضعیف ، هم جهت و یا غیر هم جهت ، با سیم پیچ فشار قوی با آن سری می شود . با روش افزایشی (additive) اگر پلاریته درست باشد ، (شکل ۴- ۶) :

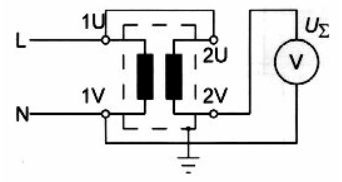
$$U_{\Sigma} = U_p + \frac{U_p}{r}$$



شکل ۴- ۶ : اتصال تست پلاریته به روش افزایشی

با روش کاهشی (subtractive) (شکل ۴- ۷) :

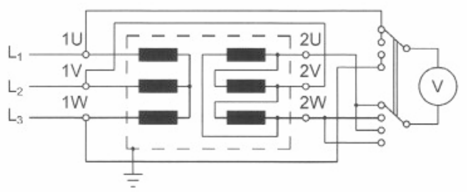
$$U_{\Sigma} = U_p - \frac{U_p}{r}$$



شکل ۴- ۷ : اتصال تست پلاریته به روش کاهشی

ترانسفورماتور چند فاز

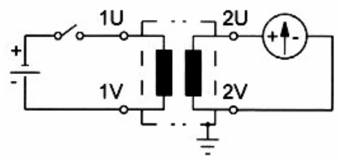
برای ترانسفورماتور سه فاز بایستی گروه برداری کنترل گردد . این کار با اتّصال یکی از ترمینال های طرف فشار ضعیف به یکی از ترمینال های فشار قوی انجام می شود ، شکل ۴- ۸ را ببینید . با وصل تغذیة سه فاز به سیم پیچ فشار قوی اختلاف پتانسیل هایی بین ترمینال های باز ظاهر می شود که از آن برای تعیین گروه برداری استفاده می شود (به بخش ۴- ۶ مراجعه گردد).



شکل ۴- ۸ : اتصال تست پلاریته برای ترانسفورماتور سه فاز با استفاده از یک ولتمتر

۴- ۵- ۳ کنترل پلاریته با استفاده از جریان DC

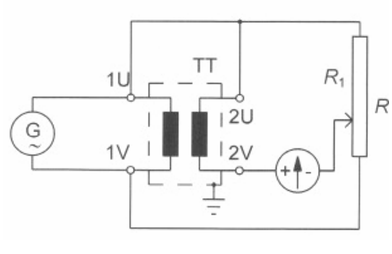
در این روش پلاریتة ترانسفورماتورهای تک فاز و سه فاز با استفاده از کلیدزنی لحظه ای منبع جریان DC در مسیر سیم پیچ فشار قوی مشخص می شود ، شکل ۴- ۹ را ببینید . پلاریته با استفاده از ولتمتر جهت داری که به طرف فشار ضعیف وصل می گردد تعیین می شود .



شکل ۴- ۹ : مدار پایة تست پلاریته با منبع DC

۴- ۵- ۴ تست نسبت تبدیل ولتاژ و کنترل پلاریته با استفاده از پل

اندازه گیری بر اساس روش جبران سازی می باشد شکل های ۴- ۱۰ و ۴- ۱۱ را ببینید . دو سیم پیچ فشار ضعیف و فشار قوی از طریق ترانسفورماتور یا مقاومت های دهدهی تنظیم ولتاژ در جهت های مخالف با یکدیگر متّصل و ولتاژها جبران سازی می گردند اگر بین ولتاژهای جبران سازی شده جابجایی فاز وجود داشته باشد پل را نمی توان تنظیم کرد . به عبارت دیگر در صورت درستی اتّصالات ، پلاریته نیز هم زمان کنترل می شود . اندازه گیری معمولاً با استفاده از تغذیه تک فاز می باشد . تغذیة سه فاز فقط برای گروه های برداری ویژه مورد نیاز است . اگر ولتاژ تغذیه برای ترانسفورماتور تحت تست کافی نباشد از ترانسفورماتور ولتاژ واسطه همراه با پل برای گسترش رنج اندازه گیری استفاده می شود.



شکل ۴- ۱۰ : مدار پایة پل اندازه گیری نسبت

شکل ۴- ۱۱ مدار داخلی پل اندازه گیری مدرن ساخت Tettex را نشان می دهد که با پل های متعارف دارای مقسم ولتاژ تفاوت دارد .

اتّصال پل اندازه گیری به ترانسفورماتور بایستی متناسب با گروه برداری باشد ، شکل ۴- ۱۲ و ۴- ۱۳ را ببینید.

۴- ۵- ۵ اندازه گیری نسبت ولتاژ ترانسفورماتور سه فاز

با در نظر گرفتن چگونگی توزیع شار مغناطیسی در هسته ترانسفورماتور ، نسبت ولتاژ ترانسفورماتورهای سه فاز با استفاده از تغذیة تک فاز براحتی قابل اندازه گیری است . زوجی از سیم پیچ ها همزمان قابل اندازه گیری هستند که شار مغناطیسی یکسانی از داخل آنها عبور کند. مدار اندازه گیری را می توان از دیاگرام فازوری مربوط به گروه برداری ترانسفورماتور مورد آزمایش بدست آورد ، شکل ۴- ۱۴ را ببینید . دو ولتاژی که قرار است با هم مقایسه شوند باید هم فاز و هم جهت باشند . این منظور با اطمینان از درستی اتّصال ترمیـــــنال های فشار قوی و فشار ضعیف برآورده می شود .

مثال شکل ۴- ۱۴ نشان می دهد که همیشه این فقط ولتاژهای فاز به زمین نیستند که مقایسه می شوند . بنابراین پل اندازه گیری باید طوری تنظیم شود تا نسبت مقدار اندازه گیری شده به مقدار تعریف شده را بدست دهد .

$$k \cdot r_{decl} = r_{mdecl}$$

r_{mdecl} = مقدار نسبت تعریف شده برای مدار اندازه گیری مربوطه

$$r_{decl} = \frac{U_{pN}}{U_{sN}}$$

که در آن :

U_{pN} و U_{sN} ولتاژهای نامی اولیه و ثانویه می باشند .

مطابق شکل ۴- ۱۴ ولتاژهای زیر با هم مقایسه می شوند :

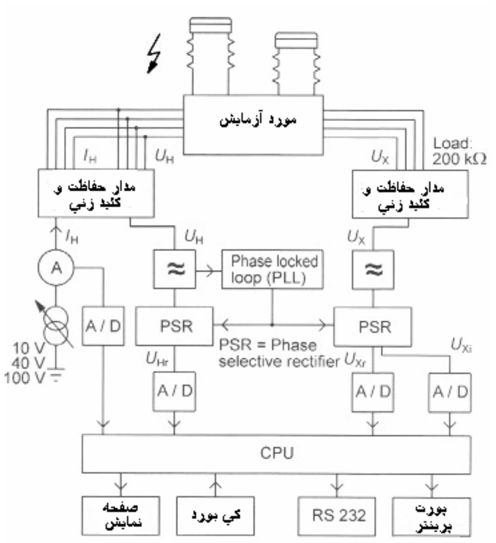
$$\frac{1W\text{-}1U1V}{2W\text{-}2V} \quad , \quad \frac{1V\text{-}1W1U}{2V\text{-}2U} \quad , \quad \frac{1U\text{-}1V1W}{2U\text{-}2W}$$

(1U1V، 1W1U ، 1V1W – جفت جفت نسبت به هم اتصال الکتریکی دارند)

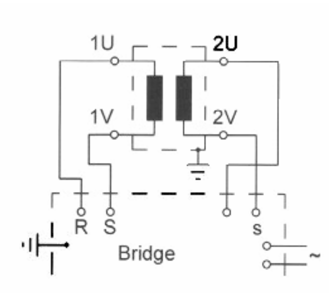
در این مورد ، k عبارت است از : $k = \dfrac{1.5}{\sqrt{3}}$

$$r_{mdecl} = \frac{1.5}{\sqrt{3}} r_{decl}$$

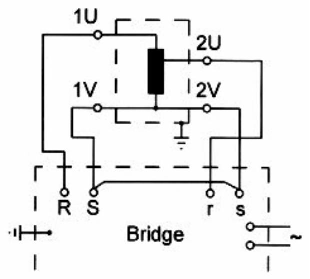
برای گروه های برداری Yy0 و Yy6 لازم است موارد زیر در نظر گرفته شود :



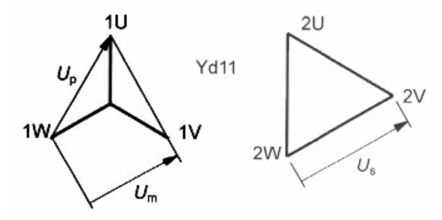
شکل ۴- ۱۱ : بلوک دیاگرام پل اندازه گیری نسبت نوع Tettex 2793



شکل ۴- ۱۲ : اتصال پل به ترانسفورماتور تک فاز

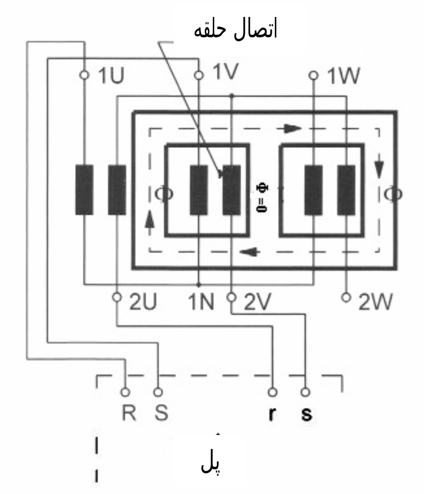


شکل ۴- ۱۳ : اتصال پل به اتو ترانسفورماتور تک فاز



شکل ۴- ۱۴ : اتصال پل برای مقایسه U_m و U_s (هم فاز)

$U_m = 1.5U_p / \sqrt{3}$



شکل ۴- ۱۵ : توزیع شار مغناطیسی بر ترانسفورماتور Yy دارای اتّصال حلقه

اندازه گیری نسبت تبدیل با اتّصال زیر ممکن است :

$$\frac{1U-1V}{2U-2V} \text{ ، } \frac{1V-1W}{2V-2W} \text{ ، } \frac{1W-1U}{2W-2U}$$

امّا بخاطر عدم آشکارسازی اتصال کوتاه احتمالی بین حلقه ها از این روش باید پرهیز کرد ، شکل ۴- ۱۵ را ببینید . اگر اتّصال کوتاه در یک فاز وجود داشته باشد مدار شار مغناطیسی از طریق بازوی آزاد بسته می شود و در نتیجه تعادل مغناطیسی حفظ می شود.

برای این نوع گروه برداری (Yy0 و Yy6) اندازه گیری باید به صورت زیر انجام شود :

$$\frac{1U-1V1W}{2U-2V2W}$$ و الی آخر .

اگر روش قبلی استفاده می شد ، پل حتی در صورت داشتن اتّصال کوتاه بین حلقه ها نیز به تعادل می رسید . به هر حال با استفاده از آمپر متر سری ، می توان عیب را آشکار کرد.

۴- ۵- ۶ اندازه گیری نسبت تبدیل ولتاژ اتو ترانسفورماتور سه فاز

الف) اتّصال ستاره با نوترال قابل دسترسی از بیرون ، (شکل ۴- ۱۶) .

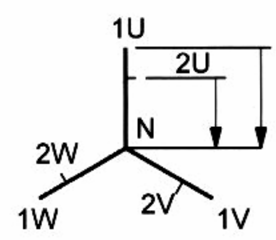
اندازه گیری درست نسبت تبدیل :

$$\frac{1U-N}{2U-N} \text{ ، } \frac{1V-N}{2V-N} \text{ ، } \frac{1W-N}{2W\text{ - }N}$$

این اندازه گیری :

$$\frac{1U-1V}{2U-2V}$$ و الی آخر یا $$\frac{1U-N}{N-2U}$$ و الی آخر

مجاز نیست ، چون مطابق شکل ۴- ۱۰ هنگام استفاده از پل اندازه گیری بین ترمینال های متصل به هم S و s داخل پل اندازه گیری اتّصال کوتاه رخ می دهد .



شکل ۴- ۱۶ : تست نسبت ولتاژ برای اتو ترانسفورماتور سه فاز با نوترال دردسترس

ب) اتّصال ستاره با نوترال غیر قابل دسترسی از بیرون ، (شکل ۴- ۱۷) .

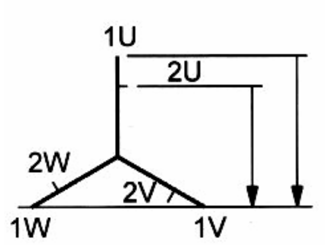
اندازه گیری درست نسبت تبدیل :

$$\frac{1U-1V1W}{2U-1V1W} \text{ ، } \frac{1V-1W1U}{2V-1W1U} \text{ ، } \frac{1W-1U1V}{2W-1U1V}$$

(1U1V، 1W1U ، 1V1W – جفت جفت نسبت به هم اتصال الکتریکی دارند)

برای این مدار اندازه گیری نسبت مقدار اندازه گیری شده به مقدار تعریف شده که لازم است بر روی پل تنظیم شود عبارت است از :

$$r_{mdecl} = \frac{3 \quad r_{decl}}{r_{decl} + 2}$$



شکل ۴- ۱۷ : تست نسبت ولتاژ برای اتو ترانسفورماتور سه فاز بدون نوترال در دسترس؛ مقایسهٔ ولتاژ

ت) اتّصال مثلث ، (شکل ۴- ۱۸) .

اندازه گیری درست نسبت تبدیل :

$$\frac{1U-1V}{2U-1V} \text{ ، } \frac{1V-1W}{2V-1W} \text{ ، } \frac{1W-1U}{2W-1U}$$

ولتاژ (U_x) 2U-1V از تعداد دورها و ولت بر دور تعیین می شود . اگـر فقـط داده هـای پلاک مشخصات در دسترس باشد ، ولتاژ به صورت زیر محاسبه می شود :

$$U_{x1.2} = -\frac{p}{2} \pm \sqrt{\left(\frac{p}{2}\right)^2 - q}$$

$$p = |U_s| - |U_p|$$

$$q = |U_p|^2 - 2 \cdot |U_p| \cdot |U_s|$$

که در آن :

U_p = ولتاژ اوّلیه

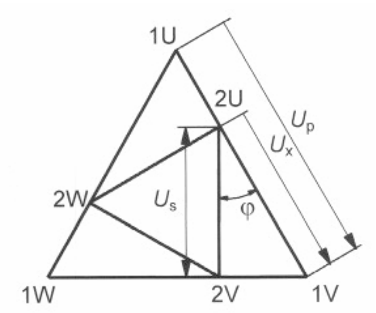
U_s = ولتاژ ثانویه

معمولاً در محاسبات ، بخش بزرگ سیم پـیچ بـه عنـوان " بخـش x " در نظـر گرفتـه می شود یعنی اگـر φ > ۶۰° باشـد بخـش بـین 1U-2U ، U_x فـرض مـی شـود . U_x مجهول از فرمول بالا با علامت مثبت بدست می آید .

نسبت مقدار اندازه گیری شده به مقدار تعریف شده به صورت زیر است :

$$r_{decl} = \frac{U_p}{U_x}$$

ترمینـال هـای S و s پـل انـدازه گیـری بایـد بـه ترمینـال مشـترک فشـار قـوی (1V در شکل ۴- ۱۸) متصل شود .

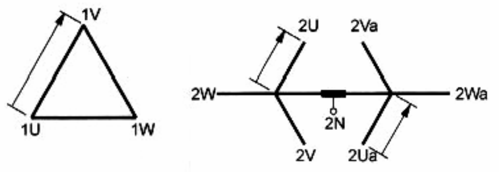


شکل ۴- ۱۸ : تست نسبت ولتاژ بـرای اتـو ترانسفورماتور با اتّصال مثلث

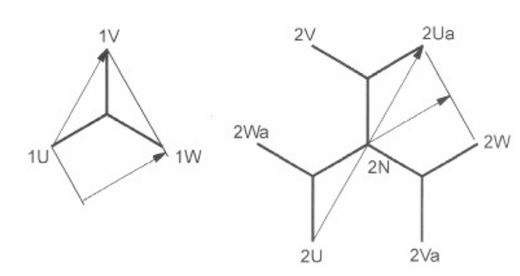
۴- ۵- ۷ اندازه گیری نسبت برای ترانسفورماتورهای با گروه برداری ویژه

الف) ترانسفورماتورهای چند فاز یا ترانسفورماتورهای یکسوساز ، بخش ۴- ۱۹ را ببینید.

در اتّصال مثلث / ستاره دوبل ، نقطة نوترال برای اتّصال ترمینال کاتد یکسوساز بیـرون آورده می شود . این کار امکان مقایسة ولتاژهای فـاز را فـراهم مـی کنـد . بـرای اتّصـال ستاره / ستاره دوبل ، ولتاژهای فاز به فاز مقایسه می شـوند ، مشـابه آنچـه کـه در مـورد Yy0 و Yy6 انجام می شود . دو سر رئاکتور بین فازها بایستی اتّصال کوتاه شـود . بـرای اتّصال منتهی به ستاره / سـتاره از روش مشـابهی اسـتفاده مـی شـود ، شـکل ۴- ۲۰ را ببینید.



شکل ۴-۱۹ : تست نسبت ولتاژ برای ترانسفورماتور یکسوساز با اتّصال مثلث- سـتارة دوبل با مقایسة ولتاژ



شکل ۴-۲۰ : تست نسبت ولتاژ برای ترانسـفورماتور یکسوساز بـا اتّصـال منتهـی بـه ستاره ؛ مقایسة ولتاژ

اندازه گیری درست نسبت تبدیل :

$$\frac{1U-1V}{2U-2N}$$ و الی آخر یا $$\frac{1U-1V1W}{2N-2U_a2W}$$ و الی آخر

اتّصال درست برای اتّصال منتهی به مثلث / ستاره به صورت زیر است :

$$\frac{1U-1V}{2W_a-2U_a}$$ و الی آخر یا $$\frac{1U-1V}{2U-2V}$$ و الی آخر

ب) ترانسفورماتورهای شیفت دهندهٔ فاز

موضوع بحث ، ترانسفورماتورهای دارای کنترل شیفت فاز یا کنترل ربعی (quadrature controlled) مثل ترانسفورماتورهای یکسوساز شیفت فاز است . استفاده از روش پل برای این نوع از ترانسفورماتورها ممکن نیست . اندازه گیری نسبت تبدیل با استفاده از دو عدد ولتمتر انجام می گیرد و باید توجه کرد که دقّت ، پائین می باشد . اگر اتّصالات بین سیم پیچ مشترک و سیم پیچ های تنظیم یا شیفت در دسترس باشد می توان شاخه های مجزای سیم پیچ را با استفاده از پل تست کرد . علاوه بر تست های پلاریته و نسبت برای این نوع از ترانسفورماتورها تست جابجایی فاز بین سمت فشار قوی و فشار ضعیف نیز بایستی انجام گردد .

۴- ۶ فرآیند اندازه گیری

۴- ۶- ۱ اندازه گیری نسبت با استفاده از دو ولتمتر

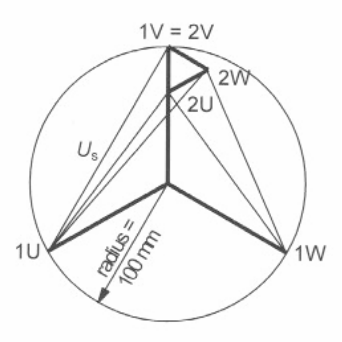
به بخش ۴- ۴ رجوع کنید ، مدار تست را در شکل ۴- ۵ ببینید .

اگر امکان اندازه گیری سمت فشار ضعیف بدون استفاده از ترانسفورماتور واسطه ممکن باشد ، بهتر است تغذیه از سمت فشارقوی انجام شود ؛ بدین ترتیب بار روی ترانسفورماتور مورد آزمایش تنها ولتمتر خواهد بود . معمولاً ولتاژ پائینی برای تغذیه استفاده می شود. اندازه گیری در چهار ولتاژ انجام می شود (شروع از کمترین مقدار و با پله های افزایشی ۱۰%) . مقدار درست ، مقدار متوسط اندازه گیری هاست و اختلاف قرائت ها در چهار ولتاژ باید در محدودهٔ ۱% قرار گیرد . بهتر است از دستگاههای دیجیتال با تفکیک (resolution) به اندازه کافی بالا استفاده شود . این دستگاههای اندازه گیری با مقاومت ورودی بالا عملاً باری برای ترانسفورماتور محسوب نمی شوند . دو ولتمتر در دو طرف باید در یک لحظه خوانده شود . برای بدست آوردن نتیجه دقیق اندازه گیری لازم است منبع ولتاژ ، پایدار باشد .

۴- ۶- ۲ تست پلاریته با استفاده از ولتمتر

به بخش ۴- ۴ رجوع کنید ، مدار تست را در شکل ۴- ۸ ببینید .

مقادیر اندازه گیری شدهٔ ولتاژ به تفکیک در یک دیاگرام فازوری وارد می شود و پلاریتهٔ صحیح و گروه برداری از روی آن تعیین می گردد ، شکل ۴- ۲۱ را ببینید . با ولتاژ تغذیهٔ V ۱۷۳= ۱۰۰√۳ نتیجهٔ بهتری حاصل می گردد . بدین ترتیب همه مقادیر اندازه گیری شدهٔ ولتاژ ، درون دایره ای با شعاع mm ۱۰۰ وارد می شوند ، با فرض اینکه ۱ V=۱mm.



شکل ۴- ۲۱ : تست پلاریته و گروه اتّصال ترانسفورماتور سه- فاز با استفاده از یک ولتمتر. نمایش ترسیمی ولتاژها
(YD11)
U_S=۱۰۰√۳=۱۷۳V

در این مثال ترمینال 2V همـان ولتـاژ ترمینـال 1V را دارد (2V-1V اتّصـال الکتریکـی دارند) ، شکل ۴- ۲۱ را ببینید ، پس دو نقطه بر روی دیاگرام فازوری یکی هستند . نقـاط 2U و 2W بـا انـدازه گیـری ولتـاژ هـای 2U -1U ، 2U -1W ، 1U-2W ، 1W-2W تعیین می شوند و از روی آن ، گروه برداری ترانسـفورماتور بدسـت مـی آیـد . در نسـبت تبدیل های بالا، بردارهای فشار ضعیف در دیاگرام فـازوری خیلـی کوچـک خواهـد بـود . برای بهبود دقت قرائـت هـا در دیـاگرام ، لازم اسـت ولتـاژ فشـار ضـعیف بـا اسـتفاده از ترانسفورماتور ولتاژ واسطه با گروه برداری صفر افزایش داده شود .

۴- ۶- ۳ تست پلاریته با استفاده از جریان DC

به بخش ۴- ۵ رجوع کنید ، مدار تست را در شکل ۴- ۹ ببینید .

اگر پلاریته صحیح باشد هنگام وصل جریـان DC ، ولتمتـر جهـت دار بـه سـمت مثبـت منحرف می شود .

برای اطمینان از صحت جهت انحراف عقربه لازم است یک مرحلـة کالیبراسـیون قبـل از تست انجام شـود . ولتمتـر بـا ترمینـال فشـارقوی ترانسـفورماتور مـورد آزمـایش مـوازی می شود ، شکل ۴- ۹ را ببینید . برای حفاظت از ولتمتر ، یک مقاومت سری بـا آن قـرار دارد . جهت انحراف ، با وصل لحظـه ای منبـع جریـان تعیـین مـی شـود . اگـر پلاریتـة ترانسفورماتور تحت تست درست باشد با وصل ولتمتر به ترمینـال هـای فشـار ضـعیف و وصل جریان DC ، انحراف باید در همان جهت قبلی باشد .

۴- ۶- ۴ نسبت ولتاژ و کنترل پلاریته با استفاده از پل نسبت تبدیل

به بخش ۴- ۵ رجوع کنید ، مدار تست را در شکل های ۴- ۱۰ تا ۴- ۲۰ ببینید .

نحوة استفاده از پل را دستورالعمل سازنده تعیین می کند . در کل باید به موارد زیـر توجّـه کرد :

- ترمینال های پل اندازه گیری را به ترمینال هـای ترانسـفورماتور بـه ترتیـب صـحیح وصل کنید .
- برای جلوگیری از اتّصال کوتاه مدار مطمئن باشـید کـه هـیچ قسـمتی از سـیم پـیچ ترانسفورماتور به زمین وصل نباشد .

۴- ۷ عدم قطعیت اندازه گیری

برای تأیید واقع بودن نسبت ولتاژ در محدودة تولرانس تعیین شده استاندارد ، پل اندازه گیری وسیله ای بسیار مناسب است (بخش ۴- ۱) . استفاده از آن آسان بوده و معمولاً فقط به تغذیة برق شهر نیاز دارد . تست پلاریته و نسبت ولتاژ را همزمان انجام می دهد . به هر حال علیرغم وجود حفاظ الکترومغناطیسی ، بدیهی است که میدان های خارجی نتایج اندازه گیری را تحت تأثیر قرار می دهد . باید از عبور هادي های جریان بالا یا ولتاژ بالا از مجاورت پل پرهیز نمود . عدم قطعیت اندازه گیری پل ها تقریباً ‎±۰/۱%‎ است . در صورت استفاده از ترانسفورماتورهای ولتاژ واسطه ، عدم قطعیت کمی بیشتر می شود .

هنگام استفاده از روش دو ولتمتری برای تعیین نسبت ولتاژ ، امکان بدست آوردن عدم قطعیت اندازه گیری کمتر از ‎±۰/۵%‎ به سختی ممکن است و بنابراین این روش برای اندازه گیری نسبت تبدیل ترانسفورماتورهایی که باید با معیارها و تلورانس هاي تعیین شده در استاندارد مقایسه گردند مناسب نمی باشد ، روش دو ولتمتری فقط هنگامی مورد استفاده است که پل در دسترس نبوده و یا رعایت تولرانس های فوق الذکر ضروری نباشد.

در طی تست های اوّلیة اکتیو پارت بدون روغن که تنها بخشی از هستة یوغ آن چیده شده است ، مخصوصاً هنگام مقایسة دو شاخة موازی یک سیم پیچ ، تولرانس خطای ‎±۰/۵%‎ خیلی بزرگ است . در چنین مواردی عدم قطعیت اندازه گیری تجهیزات تست باید کمتر از انحراف نسبی مربوط به یک دور باشد .

ضمیمهٔ ۴ :

تست نسبت ولتاژ و گروه برداری یا جابجایی فاز

ضمیمهٔ ۴- ۱ تعیین و مکان یابی خطا ها

ضمیمهٔ ۴- ۱- ۱ پلاریتهٔ غلط یا مدار- باز

پلاریتهٔ غلط ترانسفورماتور یا خطای نسبت ولتاژ ممکن است مشکلاتی را برای به تعادل رسیدن پل ایجاد نمایند . پس از معکوس کردن ولتاژ تغذیهٔ ترانسفورماتور اگر تست پلاریته موفقیت آمیز باشد ، پلاریته ترانسفورماتور نادرست بوده است ؛ در غیر این صورت باید به دنبال خطا در نسبت دورها گشت . امکان بعدی باز بودن اتّصالات سیم پیچ است که از آن جمله می توان به کنتاکت ناقص در تپ چنجر ، قطع شدگی سیم پیچی ، نقاط اتّصال باز و غیره اشاره کرد . در چنین مواردی تعادل پل غیر ممکن است .

با استفاده از روش ولتمتر، جستجو و تعیین محل عیب سریع تر انجام می شود . اگر ولتاژ اندازه گیری با ولتاژ نامی دارای اختلاف باشد ، سیم پیچی مشکل دارد . اگر امکان اندازه گیری ولتاژ نباشد ، احتمال باز بودن مدار وجود دارد . اتّصال کوتاه بین حلقه ها با افزایش مصرف جریان آشکار می شود ؛ این عیب بویژه در طول اندازه گیری تلفات بی باری مشخص می گردد .

ضمیمهٔ ۴- ۱- ۲ نسبت ولتاژ نادرست

خطای تعداد دور از خطای نسبت و یا با روش ولتمتری از اختلاف ولتاژ بین مقدار واقعی و تعریف شده تعیین می شود . فاز معیوب با تست تک تک فاز ها تعیین می گردد . با استفاده از مقدار محاسباتی ولتاژ سیم پیچ ، خطای تعداد دور از رابطهٔ زیر تعیین می شود :

$$N_f = \frac{U_{act} - U_{decl}}{U_w}$$

که در آن :

U_{act} = ولتاژ واقعی اندازه گیری شده (فشار ضعیف)

U_{decl} = مقدار تعریف شده (فشار ضعیف)

U_w = ولتاژ یک دور

N_f = خطای تعداد دور

POWEREN.IR

اگر خطای تعداد دور مثبت باشد به این معنی است که یا تعداد دور فشار ضعیف زیادتر است و یا تعداد دور فشار قوی از میزان واقعی کمتر است و اگر خطای تعداد دور منفی باشد ، یا فشار ضعیف تعداد دور کمتری دارد و یا فشار قوی تعداد دور زیادتری نسبت به میزان واقعی دارد . فرمول بالا برای اندازه گیری ولتاژ هم معتبر است .

برای تست با استفاده از پل اندازه گیری داریم :

$$N_f = \frac{r_{act} - r_N}{r_N}$$

هنگامی که خطا مستقیماً قرائت می شود :

$$N_f = \frac{f \cdot N}{100}$$

که در آن :

r_{act} = نسبت ولتاژ واقعی

r_N = نسبت ولتاژ تعریف شده

N = تعداد دورها (HV یا LV)

f = خطای نسبت بر حسب %

برای محاسبة خطای نسبت f به بخش ۴- ۴ رجوع کنید .

محاسبة خطای تعداد دور برای سیم پیچ فشار قوی و فشار ضعیف تواماً انجام می شود زیرا منبع خطا هنوز شناخته نشده است . برای تعیین سیم پیچ معیوب لازم است دو سیم پیچ مشکوک با یک سیم پیچ سالم مقایسه شود : به عنوان مثال در ترانسفورماتور سه ستونه از یک سیم پیچ مجاور استفاده می شود . سیم پیچ ستون سوم باید اتّصال کوتاه شود و یا برای مقایسه از یک سیم پیچ کمکی استفاده گردد . بسته به تعداد دورهای سیم پیچ مورد تست ، تعداد دور سیم پیچ کمکی ممکن است ۱۰ تا ۲۰ دور باشد . مقایسه با روشی مشابه روش ولتمتری انجام می شود .

کمبود قابل ملاحظة تعداد دور ممکن است ناشی از اتّصال کوتاه بین حلقه ها باشد . آسانترین راه برای اثبات آن اعمال ولتاژ نامی به مدت ۱۵ تا ۳۰ دقیقه می باشد . توجّه مهم : برای اکتیوپارت های با خنک کنندگی روغن هنگام اعمال ولتاژ در هوا لازم است به دلیل تغییر محیط عایقی از روغن به هوا ، ولتاژ به تناسب کاسته شود . محل عیب معمولاً کاملاً داغ می شود و براحتی قابل شناسایی است . استفاده از این روش فقط برای ترانسفورماتورهای کوچک یا متوسط تا حدود MVA ۱۰ توصیه می شود. برای ترانسفورماتورهای قدرت ، مکان یابی عیب با کنترل مجزای بخش های مختلف سیم پیچ انجام می شود .

اگر ترانسفورماتور ، سیم پیچ هایی با قابلیت اتّصال سری یا موازی داشته باشد ، دو نیمة سیم پیچ باید دقیقاً یکسان باشند . آشکارسازی عدم تساوی تعداد دورها با استفاده از اندازه گیری نسبت تبدیل بسیار مشکل است . به همین دلیل لازم است تلفات بی باری برای همة انواع اتّصالات موازی و سری اندازه گیری شود . اگر اختلاف قابل توجهی در تلفات ملاحظه شد عدم تقارن در تعداد دورها دور از انتظار نیست . برای تعیین سیم پیچ معیوب لازم است نیمه های مجزا روی هر سه ستون ، نسبت به هم مورد مقایسه قرار گیرند .

۴- تست نسبت تبدیل ولتاژ و گروه برداری یا جابجایی فاز

تست ترانسفورماتورهای قدرت

۵- اندازه گیری امپدانس یا ولتاژ اتّصال کوتاه و تلفات بار

۵ - ۱ مراجع / استانداردها

- IEC 60076-1 (2000) clause 10.1: " General requirement for routine, type and special tests " , clause 10.4: " Measurement of short–circuit impedance and load loss " [1]
- IEC 60076-8 (1997), clause 10: " Guide to the measurement of losses in power transformers " [6]
- IEEE Std C57.12.90 – 1999 , clause 9 : " Load losses and impedance voltage " [51]

توجه :

اندازه گیری ولتاژ اتّصال کوتاه ، امپدانس اتصال کوتاه و تلفات بـار طبـــق اســتــاندارد IEC [1] و استاندارد IEEE [50] یک **تست روتین** است .

۵ - ۲ منظور از آزمایش

ولتاژ اتّصال کوتاه و تلفات بار ترانسفورماتور توسط تولید کننده گارانتی می شود و انطباق با آنها توسط انجام تست اثبات می شود . اطلاع از مقدار صحیح تلفات بـار ، نـه فقط بـه خـاطر جـرائم مـالی مربـوط بـه تلفـات ، بلکـه بـرای بهره بـرداری بـی خطـر از ترانسفورماتورهای قدرت بزرگ حائز اهمیت است .

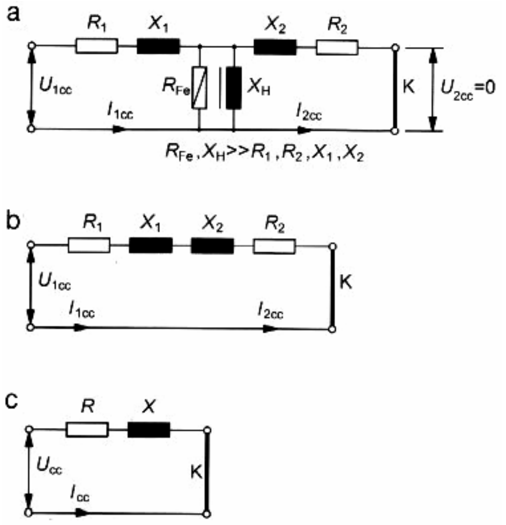
مقایسهٔ مقادیر اندازه گیری شده و محاسبه شده اطلاعاتی را دربارهٔ تلفات گردابی که ناشی در قسمت های مکانیکی و دیوارهٔ مخزن بوجود می آورد ، بدست می دهد . عـلاوه بر این دانستن ولتاژ اتّصال کوتاه و تلفات بار بـرای انجـام دادن تسـت حرارتـی ضـروری است، بخش ۱۱ را ببینید . برای ترانسفورماتورهای با سیم پیچ انشعاب دار ، ولتـاژ اتّصـال کوتاه علاوه بر تپ اصلی باید در دو تپ انتهایی و ابتدایی نیز اندازه گیری شـود . دانسـتن ولتاژ اتّصال کوتاه در تپ های انتها و ابتدا برای بهره برداری موازی مهم است .

۵ - ۳ کلّیات

تعریف ولتاژ اتّصال کوتاه عبارت است از :
ولتاژ متناوب اعمال شده به یک جفت از ترمینال های ترانسفورماتور در حالیکه جفت ترمینال های دیگر اتّصال کوتاه شده و موجب می شود جریان نامی در هر دو طـرف ترانسفورماتور برقرار شود . توان اکتیو جذب شده همان تلفات بار ترانسفورماتور است.

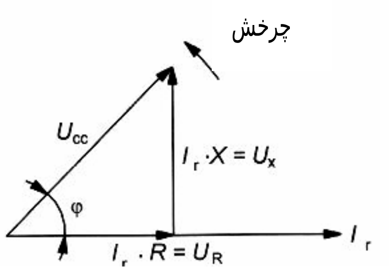
در واقع مؤلفه ای از تلفات بی باری ترانسفورماتور هم اندازه گیـری مـی شـود ولـی ایـن مؤلفه با توجه به اینکه ولتاژ اتّصال کوتاه در مقایسه با ولتاژ نامی کوچک اسـت در بیشـتر مواقع قابل چشم پوشی است . موارد استثنا فقط ترانسـفورماتورهای راه انـداز بـا فاصـلهٔ هوایی و ترانسفورماتورهای رئاکتور و غیره می باشند .

مدار معادل کاربردی اتّصال کوتاه در شکل ۵- ۱ ارائه شده است .



R_1 = مقاومت سیم پیچ 1
R_2 = مقاومت سیم پیچ 2
X_1 = مقاومت پراکندگی سیم پیچ 1
X_2 = مقاومت پراکندگی سیم پیچ 2
R_{Fe} = مقاومت معادل هسته
X_H = رئاکتانس اصلی
U_{CC} = ولتاژ امپدانس اتّصال کوتاه
I_{CC} = جریان اتصال کوتاه
K = رابط اتّصال کوتاه
$R = R_1+R_2$
$X = X_1+X_2$

شکل ۵ - ۱ : مدار معادل اتّصال کوتاه



U_R = افت ولتاژ مقاومتی
U_X = افت ولتاژ سلفی
U_{cc} = افت ولتاژ امپدانس
I_r = جریان نامی

شکل ۵- ۲ : گروه برداری اتّصال کوتاه

۵- ۳- ۱ ولتاژ اتّصال کوتاه ؛ ولتاژ اتّصال کوتاه نسبی

دیاگرام برداری مدار معادل اتّصال کوتاه رابطهٔ زیر را نتیجه می دهد ، طبق شکل ۵- ۲

$$U_{cc} = \sqrt{U_X^2 + U_R^2}$$

$$\varepsilon_{cc} = \frac{U_{cc}}{U_r} \cdot 100$$

که در آن :

U_{cc} = ولتاژ اتّصال کوتاه
U_R = افت ولتاژ مقاومتی
U_X = افت ولتاژ سلفی
ε_{cc} = درصد ولتاژ اتّصال کوتاه نسبی
U_r = ولتاژ نامی ترانسفورماتور

ولتاژ اتّصال کوتاه نسبی به صورت درصدی از ولتاژ نامی سیم پیچ تحریک شده بیان می شود . مقدار این ولتاژ جریانی را که در مدت اتّصال کوتاه جاری می شود مشخّص می کند :

$$I = \frac{100}{\varepsilon_{cc}} \cdot I_r$$

که در آن :

I = جریان اتّصال کوتاه متقارن
I_r = جریان نامی

۵- ۳- ۲ رابطهٔ ولتاژ اتّصال کوتاه و جریان بار

ولتاژ اتّصال کوتاه به صورت خطی با افزایش جریان بار افزایش می یابد .

$$U_{cc} = U_{ccm} \cdot \frac{I_r}{I_m}$$

که در آن :

U_{cc} = ولتاژ اتّصال کوتاه در جریان نامی I_r
U_{ccm} = ولتاژ اتّصال کوتاه در جریان نامی I_m
I_m = جریان بار در طول تست

۵- ۳- ۳ رابطهٔ ولتاژ اتّصال کوتاه نسبی (یا ولتاژ اتّصال کوتاه) و دمای سیم پیچ

این رابطه فقط برای ترانسفورماتورهای با توان کوچکتر از ۲ MVA مهم است ، برای محاسبات مربوطه ، بند ۱ ضمیمهٔ ۵ را ببینید .

۵- ۳- ۴ وابستگی ولتاژ اتّصال کوتاه و فرکانس

ولتاژ اتّصال کوتاه با فرکانس متناسب است . مشروط بر اینکه $U_R << U_X$.

$$U_{cc} = U_{ccm} \cdot \frac{f_r}{f_m}$$

که در آن :

f_r = فرکانس نامی
f_m = فرکانس در طول تست

ولتاژ اتّصال کوتاه

ترانسفورماتورهای تک فاز دو سیم پیچه :

$$Z = \frac{U_{cc}}{I_r} \qquad [\Omega]$$

$$R = \frac{P_L}{I_r} \qquad [\Omega]$$

$$X = \sqrt{Z^2 - R^2} \qquad [\Omega]$$

ترانسفورماتورهای سه فاز دو سیم پیچه :

	اتّصال مثلث	اتّصال ستاره
[Ω /فاز]	$Z = \frac{U_{cc} \cdot \sqrt{3}}{I_r}$	$Z = \frac{U_{cc}}{I_r \cdot \sqrt{3}}$
[Ω /فاز]	$R = \frac{P_L}{I_r^2}$	$R = \frac{P_L}{3 \cdot I_r^2}$
[Ω /فاز]	$X = \sqrt{Z^2 - R^2}$	$X = \sqrt{Z^2 - R^2}$

که در آن :

Z = امپدانس اتّصال کوتاه
X = رئاکتانس اتّصال کوتاه
R = مقاومت اتّصال کوتاه
I_r = جریان نامی
U_{cc} = ولتاژ اتّصال کوتاه
P_L = تلفات بار

۵- ۳- ۵ تلفات بار

تلفات بار برابر است با تلفات کل ایجاد شده در ترانسفورماتور هنگامی که جریان نامی به ترانسفورماتوری با ثانویهٔ اتّصال کوتاه شده اعمال شود در حالیکه دمای سیم پیچ مساوی با دمای مبنا (۷۵ °C طبق IEC یا ۸۵ °C طبق IEEE) باشد . این تلفات از تلفات اهمی سیم پیچ ها و اتّصالات داخلی ، بعلاوهٔ تلفات اضافی (تلفات جریان گردابی) بوجود آمده توسط میدان های نشتی در سیم پیچ ها و قسمت های مکانیکی ، تشکیل می شود .

$$P_L = P_j + P_a$$

که در آن :

P_L = تلفات بار در دمای سیم پیچ ۸۵ °C / ۷۵ °C

P_j = تلفات اهمی در ۸۵ °C / ۷۵ °C

P_a = تلفات اضافی در ۸۵ °C / ۷۵ °C

۵- ۳- ۶ رابطهٔ تلفات بار و جریان بار

تلفات بار با توان دوم جریان بار متناسب است .

$$P_L = P_{Lm} \cdot \left(\frac{I_r}{I_m} \right)^2$$

که در آن :

P_L = تلفات بار در جریان نامی

P_{Lm} = تلفات بار در جریان نامی

I_m = جریان تست

۵- ۳- ۷ تفکیک مؤلفه های تلفات بار موقعی که مقاومت های سیم پیچ معلوم باشند

ولتاژ اتّصال کوتاه و تلفات بار در دمای متوسط سیم پیچ ۷۵ °C (IEC) یا ۸۵ °C (IEEE) بیان می شود [1] ، [51] . با این وجود ، معمولاً دمای سیم پیچ هنگام تست خیلی پایین تر است . برای محاسبهٔ تلفات بار در دمای مبنای متفاوت با دمای سیم پیچ ، لازم است که تلفات اهمی از تلفات اضافی جدا شود . اگر مقاومت های سیم پیچ ها معلوم باشند (بخش ۳) ، تفکیک به صورت زیر انجام می شود :

$$P_L = P_j + P_a = \sum I_r^2 R + P_a$$

$$P_a = P_L - \sum I_r^2 R$$

که در آن :

R = مقاومت سیم پیچ

برای تجزیهٔ تلفات بار به مؤلفه های آن موقعی که مقاومت های سیم پیچ معلوم نباشند ، ضمیمهٔ ۵- ۲ را ببینید .

۵- ۳- ۸ رابطهٔ تلفات بار و دمای سیم پیچ

مؤلفهٔ اهمی تلفات بار با افزایش دمای سیم پیچ افزایش پیدا می کند ، در صورتی که تلفات اضافی به همان نسبت کاهش می یابد ؛ بخش ۳ را برای رابطهٔ بین مقاومت ها و دما و همچنین مثال ۱ ضمیمهٔ ۵- ۸ را ببینید .

$$P_{j2} = P_{j1}\frac{C+\Theta_2}{C+\Theta_1} \qquad P_{a2} = P_{a1}\frac{C+\Theta_1}{C+\Theta_2}$$

P_{j1} = تلفات اهمی در دمای Θ_1

P_{j2} = تلفات اهمی در دمای Θ_2

P_{a1} = تلفات اضافی در دمای Θ_1

P_{a2} = تلفات اضافی در دمای Θ_2

Θ = دما بر حسب °C

C = ثابتی که تابعی از جنس ماده است

مطابق IEC [1] :

C = ۲۳۵ برای مس

C = ۲۲۵ برای آلومینیوم

مطابق IEEE [51] مقدار برای مس تا اندازه ای متفاوت می باشد : C =۲۳۴/۵

چون مؤلفهٔ اهمی تلفات خیلی بزرگتر از تلفات اضافی است ، تلفات بار در کل با بالا رفتن دمای سیم پیچ افزایش می یابد .

استانداردهای [1] و [51] جزئیات اندازه گیری دمای سیم پیچ را که قبل از اندازه گیری تلفات بار انجام می شود توضیح می دهد .

۵- ۳- ۹ رابطهٔ تلفات بار و فرکانس

به طور کلی مؤلفهٔ اهمی تلفات بار مستقل از فرکانس است (تأثیر اثر پوستی برای محدودهٔ فرکانسی مورد مطالعه قابل چشم پوشی است) در حالی که تلفات اضافی با فرکانس افزایش می یابد .

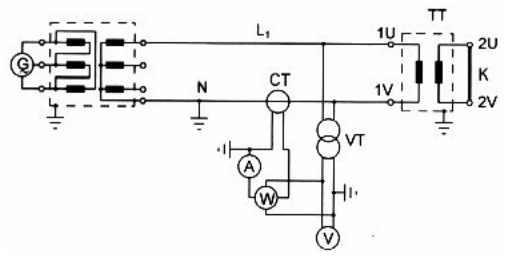
$$P_L = P_j + P_{am}\cdot\left(\frac{f_r}{f_m}\right)^2 + P_{st}\left(\frac{f_r}{f_m}\right)^{0,8}$$

که در آن :

P_L = تلفات بار در فرکانس نامی f_r

P_{am} = تلفات اضافی در سیم پیچ ها در فرکانس تست f_m

P_{st} = تلفات اضافی در مخزن و قسمت های فلزی در فرکانس تست f_m



K = رابط اتصال کوتاه

CW = ترانسفورماتور جریان

VT = ترانسفورماتور ولتاژ

شکل ۵- ۳ : اتّصالات ترانسفورماتور تکفاز برای تست های تلفات بار و ولتاژ امپدانس

اگر امکان تأمین فرکانس نامی ترانسفورماتور مورد آزمایش در آزمایشگاه موجود نباشد ، تلفات را می توان با رابطهٔ بالا محاسبه کرد ، با این محدودیت که یک تست تایپ اضافی در فرکانس نامی برای تعیین عدم قطعیت اندازه گیری لازم خواهد شد .

بعلاوه باید شکل موج جریان تغذیه ، سینوسی و عاری از هارمونیک باشد . در غیر این صورت عدم قطعیت تلفات اندازه گیری شده بسیار بالا می رود .

۵- ۴ مدار اندازه گیری

مدار اندازه گیری تلفات بار برای ترانسفورماتورهای تک فاز در شکل ۵- ۳ و برای ترانسفورماتورهای سه فاز در شکل های ۵- ۴ و ۵- ۵ نشان داده شده است . اتّصال کوتاه معمولاً در طرف فشار ضعیف ترانسفورماتور برقرار می شود . معمولاً تولید جریان پایین تر و ولتاژ اتّصال کوتاه بالاتر در آزمایشگاهها عملی تر است .

برای اندازه گیری تلفات ترانسفورماتورهای سه فاز دو روش عمده وجود دارد : روش سه واتمتری و روش دو واتمتری ، شکل های ۵- ۵ و ۵- ۴ را ببینید .

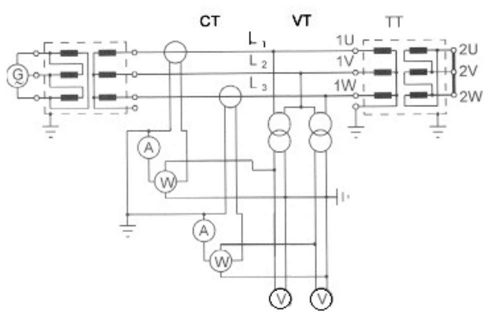
در هر دو روش ، اندازه گیری به کمک ترانسفورماتورهای ولتاژ و جریان انجام می شود .

ضریب توان برای اندازه گیری تلفات بار ترانسفورماتورهای قدرت در حدود ۰/۰۱ تا ۰/۰۵ است . به این معنی که هر خطای زاویه فاز کوچک در ترانسفورماتور جریان و ولتاژ نیازمند تصحیح بزرگی برای خطای سیستم اندازه گیری است . (استاندارد IEEE [51] حداکثر تا ۵ % ± تصحیح خطا را مجاز می داند) .

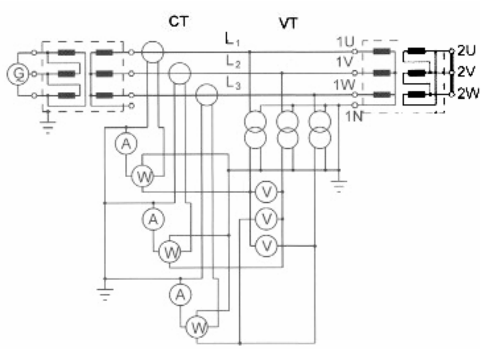
روش دو واتمتری برای ضریب توان های کوچک مناسب نمی باشد ؛ بدلیل اینکه قرائت های دو واتمتر دارای علامت های مختلفی هستند و باید از یکدیگر کم شوند . در این روش خطاهای کوچک در مقایسه با روش سه واتمتری دارای تأثیر بیشتری هستند . به این دلیل برای اندازه گیری تلفات بار از روش دو واتمتری باید اجتناب شود . با این وجود بدلیل نیاز به تعداد کمتری از ترانسفورماتورهای اندازه گیری ، این روش گهگاه برای تست های عیب یابی در محل نصب استفاده می شود . این روش از نظر IEEE مجاز نیست .

اگر نوترال حامل جریان باشد و یا لازم باشد به منظور عیب یابی توان هر فاز جداگانه اندازه گیری شود ، فقط روش سه واتمتری استفاده می شود .

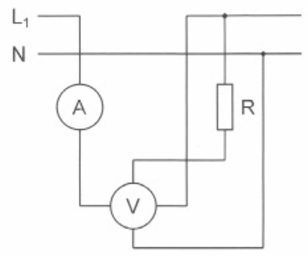
برای پرهیز از تصحیح مربوط به ترانسفورماتورهای اندازه گیری در حد امکان باید سرهای جریان واتمتر به صورت مستقیم به مدار تغذیه وصل شوند و در اتّصالات ورودی ولتاژ از مقاومت سری استفاده شود ، شکل ۵- ۶ را ببینید .



شکل ۵ – ۴ : اتّصالات ترانسفورماتور سه فاز برای تست های تلفات بار و ولتاژ امپدانس با روش دو واتمتری . مطابق استاندارد IEEE [51]این روش برای ترانسفورماتورهای سه فاز قابل استفاده نیست .



شکل ۵- ۵ : اتّصالات ترانسفورماتور سه فاز برای تست های تلفات بار و ولتاژ امپدانس با استفاده از روش سه واتمتری



شکل ۵ – ۶ : اندازه گیری تلفات بار بدون ترانسفورماتور ولتاژ و جریان

۵- ۵ روش اندازه گیری

قبل از اینکه اندازه گیری تلفات بار انجام شود لازم است اندازه گیری مقاومت سیم پیچ (بخش۳) و دمای سیم پیچ انجام شود (استانداردهای IEC [1] و IEEE [51] را مقایسه کنید .

اگر ترانسفورماتورهای جریان داخل مخزن وجود داشته باشد ، باید برای جلوگیری از اشباع هستهٔ آهنی آنها و اضافه ولتاژ ، ترمینال های ثانویه در طول تست اتّصال کوتاه شوند .

بوشینگ تپ ها باید زمین شوند .

اگر ترانسفورماتور مورد آزمایش با کلید تنظیم ولتاژ on-load یا off-load تجهیز شده باشد اندازه گیری تلفات ابتدا در تپ اصلی و متعاقباً در بالاترین و پایین ترین تپ انجام می‌شود . در طول تست برای جلوگیری از جریان هجومی ، جریان به آرامی از صفر تا مقدار نامی بالا برده می شود . مؤلفهٔ DC جریان هجومی ممکن است منجر به خطای ترانسفورماتورهای اندازه گیری شود و نمی توان آن را تصحیح نمود (پیش مغناطیس-شدن pre-magnetization ترانسفورماتور جریان) .

برای جلوگیری از گرم شدن ناخواستهٔ سیم پیچ ها و بدنبال آن تغییر مقدار مقاومت اهمی سیم پیچ ها ، مدت آزمایش باید تا حد امکان کوتاه باشد . مقدار تقریبی ثابت زمانی برای جهش حرارتی هادی سیم پیچ نسبت به روغن را می توان از رابطهٔ زیر محاسبه کرد :

$$T \cong 160 \cdot \frac{g}{J^2}$$

که در آن :

T = ثابت زمانی سیم پیچ بر حسب ثانیه
g = اختلاف دمایی هادی سیم پیچ نسبت به روغن (از نتایج طراحی)
J = چگالی جریان سیم پیچ بر حسب A / mm^2

مثال : $T \cong 160 \cdot \frac{20}{3{,}2^2} \cong 312s \cong 5{,}2 \min$

به طور کلی ، زمان اندازه گیری در جریان نامی باید در حدود ۳۰ ثانیه باشد (عدد سرانگشتی) .

جریان اندازه گیری باید در حد امکان نزدیک به جریان نامی باشد . IEC تصریح می کند که جریان نباید پایین تر از ۵۰ % جریان نامی گردد . به منظور اطمینان از ثبت درست اطلاعات اندازه گیری توصیه می شود اندازه گیری دیگری با تقریباً ۱۰% جریان پایین تر انجام شود . بعد از برون یابی ، دو نتیجهٔ اندازه گیری بایستی بر هم منطبق شوند .

اگر ژنراتور تغذیه بوسیلهٔ موتور آسنکرون یا DC چرخانده شود باید به ثابت نگه داشتن فرکانس دقّت شود (Hz ۰/۳ ±) .

اندازه گیری تلفات بار فرصتی را برای اندازه گیری نسبت تبدیل ترانسفورماتورهای جریان داخلی بدست می دهد . اندازه گیری با اتّصال آمپرمتر به ثانویهٔ CTها صورت می گیرد و باید توجه شود که تست در بار نامی CT انجام گیرد . این بویژه برای ترانسفورماتورهای جریان با جریان نامی ثانویهٔ A ۱ مهم است .

۵- ۵- ۱ اندازه گیری تلفات بار برای ترانسفورماتورهای تک فاز

برای تست ترانسفورماتورهای تک فاز ، عمدتاً از ژنراتور سه فاز یـا ترانسـفورماتور واسـطة سه فاز استفاده می شود . باید دقّت کرد که جریان خازنی فازهای آزاد را با ترانسـفورماتور جریان اندازه نگرفت (با دید از طرف تغذیه) و یا ترانسفورماتور جریان را بـه فـاز برقـدار وصل نکرد ، شکل ۵- ۳ را ببینید .

۵- ۵- ۲ انـدازه گیـری ولتـاژ اتّصـال کوتـاه و تلفـات بـار بـرای ترانسفورماتورهای سه سیم پیچه

ولتاژ اتّصال کوتاه و تلفات بار برای ترانسفورماتورهای سه سیم پیچه را نمی توان فقط بـا یک بار تست اتّصال کوتاه تعیین کرد . این مقادیر باید با استفاده از نتـایج سـه بـار تسـت محاسبه شوند .

تست های اتّصال کوتاه زیر باید انجام شوند و کمیت های اندازه گیری شـده عبارتنـد از : تلفات و امپدانس ها . این مقادیر باید برای جریان نامی و دمای مبنا (۷۵ °C یا ۸۵ °C) تصحیح شوند .

ترکیبات اندازه گیری			
سیم پیچ باز	سیم پیچ اتصال کوتاه شده	سیم پیچ تغذیه شده	تست بین سیم پیچ های
۳	۲	۱	۲- ۱
۲	۳	۱	۳- ۱
۱	۳	۲	۳- ۲

توضیح : ۱= سیم پیچ 1 فشار قوی
۲= سیم پیچ 2 فشارمتوسط
۳= سیم پیچ 3 فشار ضعیف

محاسبة ولتاژ اتّصال کوتاه معادل هر سیم پیچ

هر سه نتیجة اندازه گیری شده باید بر مبنای یک توان ظاهری مشترک (تـوان ظـاهری نامی سیم پیچ فشارقوی) تصحیح شوند . ولتاژ اتّصال کوتاه با رابطة خطی نسبت به توان مبنا اصلاح می شود .

$$\varepsilon_{cc1} = \frac{\varepsilon_{cc12} + \varepsilon_{cc13} - \varepsilon_{cc23}}{2}$$

$$\varepsilon_{cc2} = \frac{\varepsilon_{cc12} + \varepsilon_{cc23} - \varepsilon_{cc13}}{2}$$

$$\varepsilon_{cc3} = \frac{\varepsilon_{cc23} + \varepsilon_{cc13} - \varepsilon_{cc12}}{2}$$

بررسی نتایج :

$$\varepsilon_{cc12} = \varepsilon_{cc1} + \varepsilon_{cc2}$$

$$\varepsilon_{cc13} = \varepsilon_{cc1} + \varepsilon_{cc3}$$

$$\varepsilon_{cc23} = \varepsilon_{cc2} + \varepsilon_{cc3}$$

محاسبه تلفات بار برای هر سیم پیچ

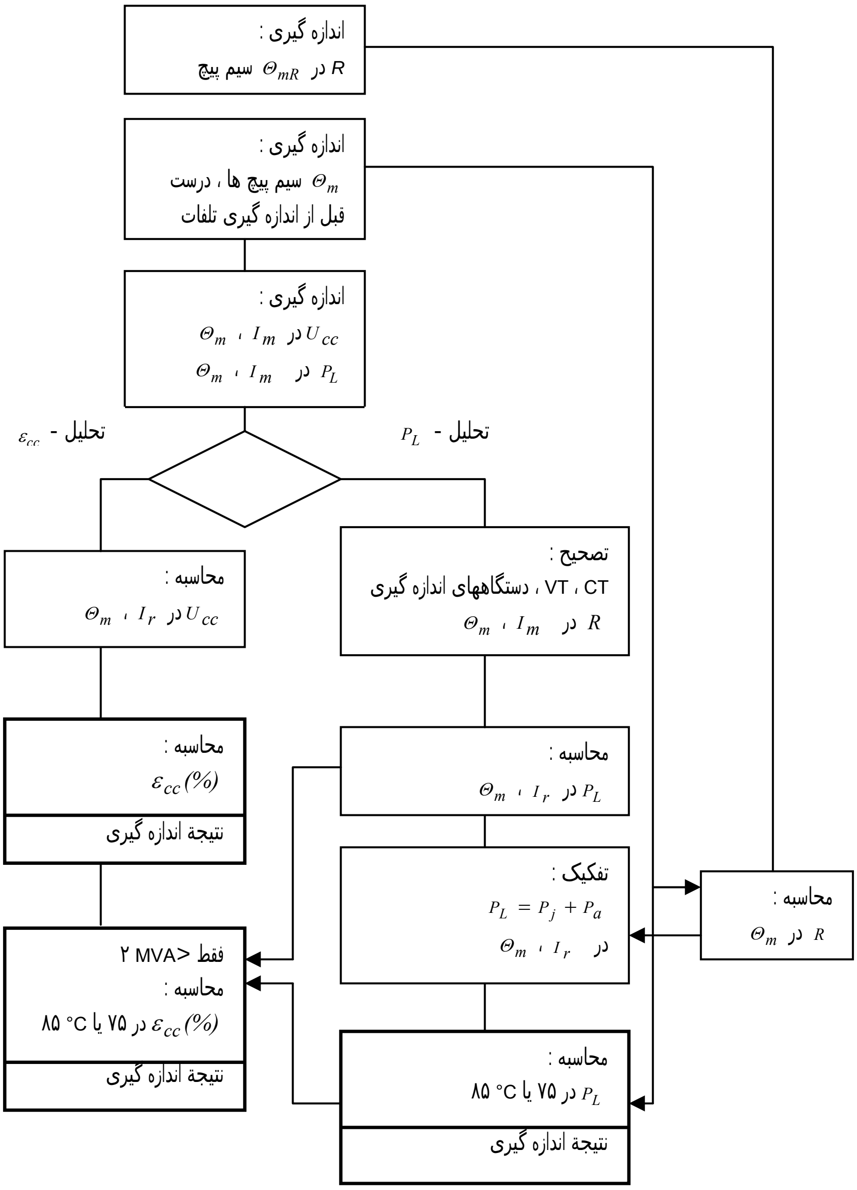
یک توان مبنای مشترک باید انتخاب شود (توان ظاهری نـامی سـیم پـیچ فشـارقوی) . تلفات بار متناسب با مجذور توان مبنا تغییر می یابد .

$$P_{L1} = \frac{P_{L12} + P_{L13} - P_{L23}}{2}$$

$$P_{L2} = \frac{P_{L12} + P_{L23} - P_{L13}}{2}$$

$$P_{L3} = \frac{P_{L13} + P_{L23} - P_{L12}}{2}$$

تلفات بار هر سیم پیچ را حال می توان منطبق با حالت های بهره برداری مجدداً محاسـبه نمود . ایـن تلفـات (بـدلیل اخـتلاف وضـعیت هـای مختلـف شـارهای نشـتی در طـول اندازه گیری های با حالت بهره برداری واقعی با سه سیم پیچ) همیشه همان تلفات واقعی در طول بهره برداری نیستند . برای ترانسفورماتورهای با بیش از سه سیم پیچ تست هـای اتّصال کوتاه باید به صورت جفتی با استفاده از همان روش انجام شود .



R = مقاومت سیم پیچ

Θ_{mR} = دمای سیم پیچ در اندازه گیری مقاومت

Θ_m = دمای سیم پیچ در تست بار

U_{CC} = ولتاژ امپدانس اتصال کوتاه

ε_{CC} = ولتاژ امپدانس نسبی بر حسب %

P_L = تلفات بار

P_{Lcorr} = تلفات بار اصلاح شده

P_j = تلفات اهمی

P_a = تلفات اضافی

I_m = جریان بار اندازه گیری شده

I_r = جریان نامی

شکل ۵- ۸ : بلوک دیاگرام محاسبات مقادیر انـدازه گیری شده

۵- ۶ ارزیابی نتایج اندازه گیری

ارزیابی نتایج اندازه گیری از روی نمودار منطقی شکل ۵- ۸ انجام می شود . روابط تبدیلی مورد نیاز در بخش ۵- ۳ ارائه شده است . در بخش ۳ اندازه گیری مقاومت های سیم پیچ و دمای سیم پیچ تشریح شده است .

برای تصحیح خطای دستگاههای اندازه گیری و ترانسفورماتورهای اندازه گیری ، ضمیمة ۵- ۴ و ضمیمة ۵- ۵ را ببینید .

۵ - ۷ عدم قطعیت اندازه گیری

عدم قطعیت اندازه گیری را می توان با استفاده از قانون گوس تعیین کرد .

مثال :

برای ترانسفورماتور سه فاز : روش سه واتمتری با استفاده از ترانسفورماتورهای اندازه گیری کلاسیک و دستگاههای دیجیتال که کالیبره شده اند – فقط با احتساب تأثیرگذارترین فاکتورها (برای دقیق ترین تصحیح انجام شده بر اساس گواهی نامه های کالیبراسیون موجود) .

الف) خطای زاویه فاز ترانسفورماتور اندازه گیری با ضریب توان ۰/۰۲۵ ؛ عدم قطعیت کالیبراسیون ۱/۵ ± دقیقه .

برای هر فاز و ترانسفورماتور : % ۱/۷۵± = ۰/۰۲۹۱ * ۰ * ۴۰ * ۱/۵ ± = E

ب) خطای واتمتر ؛ عدم قطعیت کالیبراسیون در ضریب توان فوق : % ۰/۵ ±

پ) خطای زاویه واتمتر ؛ عدم قطعیت کالیبراسیون در ضریب توان فوق : ۰/۵ ± دقیقه

برای هر واتمتر : % ۰/۵۸ ± = ۰/۰۲۹۱ * ۴۰ * ۰/۵ = E

بدین ترتیب انحراف احتمالی برای اندازه گیری به شرح زیر به دست می آید :

$$\lambda = \sqrt{(6\times1{,}75^2)+(3\times0{,}5^2)+(3\times0{,}58^2)} = \pm4{,}5\%$$

مشاهدة کیفی بالا نشان می دهد که برای اندازه گیری تلفات بار ، بایستی دستگاههای اندازه گیری کاملاً با تست متناسب باشند تا عدم قطعیت اندازه گیری کل تا حد ممکن کوچک بماند .

با استفاده از بهترین دستگاههای اندازه گیری در دسترس مانند مقسم ولتاژ خازنی ، ترانسفورماتور جریان با شار صفر ، پاور آنالایزر (power analyzer) ترانسفورماتور و غیره ، عدم قطعیت اندازه گیری در ضریب توان های بالای ۰/۰۱ به ۲% یا ۳% کاهش یابد .

IEEE عدم قطعیت مجاز برای اندازه گیری های تلفات را به کمتر از ۳% محدود می کند.

ضمیمهٔ ۵ :
اندازه گیری امپدانس ولتاژ اتّصال کوتاه و تلفات بار

ضمیمهٔ ۵ - ۱ رابطهٔ ولتاژ اتّصال کوتاه نسبی (یا ولتاژ اتّصال کوتاه) و دمای سیم پیچ

استاندارد IEC تعیین ولتاژ اتّصال کوتاه و تلفات بار را در دمای سیم پیچ ۷۵ °C لازم می داند ، در حالی که مطابق IEEE این دما ۸۵ °C است . [1] ، [51] . ولتاژ اتّصال کوتاه با بالاتر رفتن دمای سیم پیچ افزایش می یابد .

$$\varepsilon_{cc} = \sqrt{\varepsilon_X^2 + \varepsilon_R^2}$$

که در آن :

ε_{cc} = ولتاژ اتّصال کوتاه نسبی در جریان I_r

ε_X = ولتاژ رئاکتیو نسبی در I_r

ε_R = ولتاژ اهمی نسبی در I_r

توجه :

بسته به اینکه تست مطابق IEC یا IEEE انجام می گیرد ، دمای مبنای سیم پیچ باید ۷۵ °C یا ۸۵ °C باشد .

$$\varepsilon_{cc} = \sqrt{\varepsilon_{Xm}^{2} + \varepsilon_R^{2}} = \sqrt{(\varepsilon_{ccm}^{2} - \varepsilon_{Rm}^{2}) + \varepsilon_R^{2}} =$$

$$= \sqrt{\left(\frac{U_{ccm}}{U_r}\cdot 100\right)^2 - \left(\frac{P_{Lm}}{S_r}\cdot 100\right)^2 + \left(\frac{P_L}{S_r}\cdot 100\right)^2}$$

که در آن :

ε_{Xm} = ولتاژ رئاکتیو نسبی در I_r و دمای سیم پیچ در حین تست

U_{ccm} = ولتاژ اتّصال کوتاه در I_r و دمای سیم پیچ در حین تست

P_{Lm} = تلفات بار در I_r و دمای سیم پیچ در حین تست

P_L = تلفات بار در I_r و دمای سیم پیچ ۷۵ °C / ۸۵ °C

S_r = توان ظاهری نامی

توجه :

به خاطر اینکه ولتاژ رئاکتیو به دما وابسته نیست ، امپدانس های ε_{Xm} و ε_X برابر هستند .

برای ترانسفورماتورهای بزرگ ($S_r \geq$ ۲ MVA) محاسبه لازم نیست چون $U_X >> U_R$ (خطا < ۰/۵ %)

ضمیمهٔ ۵- ۲ جداسازی تلفات بار زمانی که مقاومت های سیم پیچ معلوم نباشند

از این روش تقریبی برای ترانسفورماتورهایی استفاده می شود که مقدار مقاومت سیم پیچ های آن تخمینی بوده یا در همهٔ تپ ها اندازه گیری نشده باشد (برای یکسو کننده ها یا ترانسفورماتورهای کوره قوس الکتریکی) . اساس این روش وابستگی تلفات اضافی به توان دوم فرکانس است .

دو اندازه گیری تلفات در دمای یکسان انجام می شود . یکبار در فرکانس نامی و یکبار در فرکانسی با اختلاف ۱۵ تا ۲۰ درصد . اندازه گیری ها بایستی در جریان نامی انجام شود.

$$P_j = \frac{P_{L2} \cdot f_1^2 - P_{L1} \cdot f_2^2}{f_1^2 - f_2^2}$$

$$P_a = P_{L1} - P_j$$

که در آن :

P_{L1} = تلفات بار در فرکانس نامی f_1

P_{L2} = تلفات بار در فرکانس متفاوت f_2

به دلیل عدم قطعیت اندازه گیری ، برای این روش محدودیت هایی وجود دارد .

ضمیمهٔ ۵- ۳ نیازمندی های دستگاههای اندازه گیری

IEC 60076-1 ، بند 10.1 [1]

به طور کلی ، دستگاههای اندازه گیری باید مطابق استاندارد ISO9001 به صورت دوره ای کالیبره شوند و میزان عدم قطعیت ها در گواهینامه های مربوطه قید گردد . توصیه های ویژه برای اندازه گیری های تلفات در IEC 60076-8 [6] ارائه شده است . (Guide to the measurement of losses in power transformers بند 10)

IEEE Std C57.12.90 بند 9 [51]

فرکانس تغذیه برای اندازه گیری تلفات باید در محدودهٔ ۰/۵ % ± (۰/۳ Hz) اطراف فرکانس نامی باشد .

تصحیح زاویه فاز ترانسفورماتور اندازه گیری بایستی در ضریب توان کوچکتر از ۰/۰۳ ، ضریب توان بزرگتر از ۰/۰۳ و کوچکتر یا مساوی ۰/۱ ، و مجموع زاویه های فاز بزرگتر از ۱ دقیقه انجام گیرد ؛ همچنین در ضریب توان بزرگتر از ۰/۱ و مجموع زاویه های فاز بزرگتر از ۳ دقیقه بزرگترین مقدار تصحیح نباید از ۵ % ± تجاوز کند ؛ در غیر این صورت دستگاه اندازه گیری باید تعویض گردد .

روش دو واتمتری نباید برای اندازه گیری تلفات بار ترانسفورماتورهای سه فاز استفاده شود. جایگزین روش سه واتمتری روش پل امپدانسی است .

دستگاههای اندازه گیری پیشرفتهٔ تلفات بار به مقسم ولتاژ خازنی ، ترانسفورماتور جریان شار صفر یا به جای آن ، ترانسفورماتور های جریان دو طبقه ای پسیو و پاور آنالایزر ویژه که برای ضریب توان های خیلی کم طراحی شده است ، مجهز هستند . اگر این نوع از دستگاههای اندازه گیری به صورت منظم کالیبره شوند ، با داشتن حداقل خطای زاویهٔ فاز بهترین عدم قطعیت اندازه گیری ممکن را بدست می دهند .

ترانسفورماتورهای جریان و ولتاژ معمول باید حداقل خطای زاویهٔ فاز ممکن را در بار واقعی داشته باشند (۱ ± دقیقه) و بین ۸۰ تا ۱۲۰% مقدار نامی بارگذاری شوند (با توجه به نقطهٔ کالیبراسیون ترانسفورماتور) .

ولتمترها ، آمپرمترها و واتمترهایی که استفاده می شوند معمولاً دیجیتال و با عدم قطعیت % ۰/۱ ± هستند (وابسته به محدودهٔ اندازه گیری) . موقع انتخاب واتمتر دیجیتال بایستی کیفیت عملکرد آن در رابطه با ضریب توان و مقدار کار مورد نیاز برای کالیبراسیون آن در نظر گرفته شود (اغلب فقط کالیبراسیون تکفاز ممکن است) .

برای اندازه گیری کوتاه مدت ، چگالی جریان تا A/mm² ۶ برای هادی مسی کابل های اتّصال به ترانسفورماتور مجاز است . به منظور جلوگیری از اضافه شدن تلفات کابل به مقدار اندازه گیری ، اندازه گیری ولتاژ باید به صورت مستقیم از ترمینال های ترانسفورماتور مورد آزمایش انجام شود .

رابط اتّصال کوتاه ترمینال های فشار ضعیف ترانسفورماتور باید کوتاه و سطح مقطع آن بزرگ باشد (بطور تقریبی A/mm² ۲- ۱) . در صورتی که جریان خیلی بالا باشد به خاطر پرهیز از تلفات اضافی ، کابل های رابط نباید از نزدیک قسمت های فلزی عبور کنند . اگر مقاومت اتّصالات رابط در مقایسه با مقاومت سیم پیچ بزرگ باشد ، تلفات بار اندازه گیری شده طبق رابطهٔ تقریبی زیر اصلاح می شود :

برای مس :
$$P = 1{,}96 \cdot \left(\frac{235+\Theta}{225}\right) \cdot J^2 . m$$

برای آلومینیوم :
$$P = 11{,}22 \cdot \left(\frac{225+\Theta}{245}\right) \cdot J^2 . m$$

که در آن :

P = تلفات اهمی در رابط اتّصال کوتاه بر حسب W

Θ = دمای رابط اتّصال کوتاه بر حسب °C

J = چگالی جریان بر حسب A/mm²

m = وزن بر حسب kg

استاندارد IEC صراحتاً به این نوع تصحیح در تلفات اندازه گیری شده اشاره نمی کند .

ژنراتور تغذیه حتی در زیر بار باید فرکانسی ثابت (Hz ۰/۳ ±) داشته باشد . اگر ژنراتور توان کافی نداشته باشد ، توان رئاکتیو مورد نیاز باید توسط تجهیزات جبران کننده تأمین شود .

ترانسفورماتور واسطه

اگر استفاده از ترانسفورماتور واسطه برای تطبیق ولتاژ ژنراتور با ولتاژ ترانسفورماتور مورد آزمایش اجتناب ناپذیر باشد باید دقت شود که نوترال های آنها به یکدیگر بسته نشوند ، شکل ۵- ۵ را ببینید . بدلیل اختلاف امپدانس های اتّصال کوتاه هر فاز ، این کار می تواند باعث جابجایی (shift) فاز و ایجاد جریان های گردشی شود .

ضمیمه ۵- ۴ تصحیح خطای دستگاه اندازه گیری

تصحیح بر طبق جدول کالیبراسیون و توان مصرفی دستگاه انجام می شود :

ولتمتر : $P_i = \dfrac{U^2}{R_i}$

آمپرمتر : $P_i = I^2 \cdot R_j$

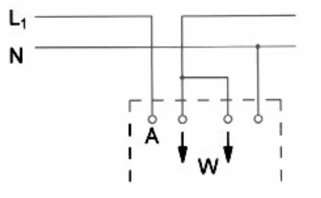
که در آن :

P_i = توان مصرفی دستگاه

R_i = مقاومت داخلی دستگاه

واتمتر :

تلفات اندازه گیری شده بوسیلهٔ واتمتر ، تا حدی ممکن است شامل توان مصرفی در مدارهای اندازه گیری ولتاژ و جریان نیز باشد . اگر تلفات در مدار داخلی دستگاه زیاد باشد تصحیح لازم است .



شکل ۵- ۸ : اتّصال واتمتر

برای مدار اتّصال استفاده شده در شکل ۵- ۸ رابطهٔ زیر برقرار است :

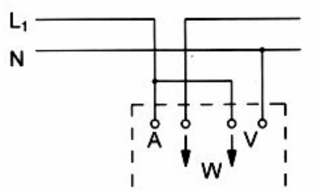
$$P_{corr} = P - P_I$$

که در آن :

P = تلفات بار که دستگاه نشان می دهد

P_I = توان مصرفی مدار جریان

برای مدار اتّصال استفاده شده در شکل ۵- ۹ رابطهٔ زیر برقرار است :



شکل ۵- ۹ : اتّصال واتمتر

$$P_{corr} = P - P_U$$

که در آن :

P_U = توان مصرفی مدار ولتاژ

تصحیح زاویهٔ فاز واتمتر به همان روش تصحیح زاویه فاز ترانسفورماتور های اندازه گیری انجام می شود .

ضمیمه ۵- ۵ تصحیح خطای ترانسفورماتور اندازه گیری

- IEC 60076-8 (1997), clause 10: " Guide to the measurement of losses in power transformers" [6]
- IEEE Std C57.12.90-1999, clause 9." Load losses and impedance voltage"[51]

برای اندازه گیری های ولتاژ و جریان و در صورت استفاده از ترانسفورماتورهای ولتاژ و جریان فقط لازم است خطای نسبت تبدیل آنها در نظر گرفته شود . در مورد واتمترها بایستی خطای مربوط به زاویهٔ فاز ترانسفورماتور های اندازه گیری نیز تصحیح شود . خطای اندازه گیری حاصل از خطای زاویهٔ فاز تابعی از ضریب توان مدار اندازه گیری است. برای خطای نسبت تبدیل مورد اخیر معمولاً صادق نمی باشد . خطای نسبت تبدیل و خطای زاویهٔ فاز برای ترانسفورماتورهای اندازه گیری به کار برده شده باید (برای هر فاز و در بار معادل مدار اندازه گیری) از گواهی کالیبراسیون در نقطهٔ اندازه گیری مربوطه استخراج شود .

IEEE تصحیح اندازه گیری تلفات بار ناشی از خطاهای زاویه فاز را در ۵ % محدود می کند .

ضمیمهٔ ۵- ۵- ۱ اندازه گیری توان تکفاز یا توان سه فاز سلفی با استفاده از روش سه واتمتری

یک ترانسفورماتور اتّصال کوتاه شده همیشه یک بار سلفی است . شکل ۵- ۱۰ نمودار برداری را برای یک مدار اندازه گیری سلفی تکفاز دارای ترانسفورماتورهای جریان و ولتاژ نشان می دهد ، که در آن شاخص مقدار تصحیح شده و شاخص مقدار تصحیح نشده (مقدار اندازه گیری شده) را نشان می دهند . زاویه های فاز به طور اختیاری در این نمودار مثبت در نظر گرفته شده اند (یعنی پیش فاز) .

برای خطاهای اندازه گیری :

$$E_\delta = \frac{P_2 - P_1}{P_2} \cdot 100\%$$

که در آن :

E_δ = خطای اندازه گیری ناشی از زاویهٔ فاز بر حسب %

P_1 = توان تصحیح شده

P_2 = توان تصحیح نشده (توان اندازه گیری شده)

خطای اندازه گیری نسبت به توان تصحیح نشده بیان می شود چون مقدار آن معلوم می باشد .

$$E_\delta = \frac{U_2 \cdot I_2 \cdot \cos(\varphi - \delta) - U_1 \cdot I_1 \cdot \cos\varphi}{U_2 \cdot I_2 . \cos(\varphi - \delta)}$$

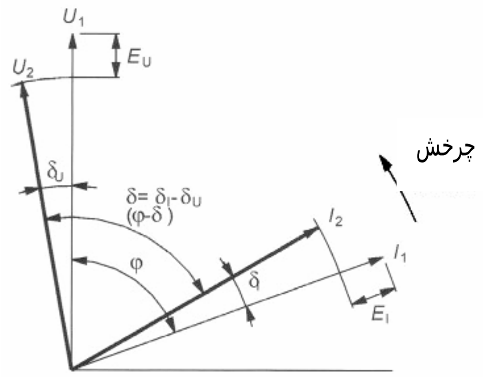
$$= \left[1 - \frac{\cos\varphi}{\cos(\varphi - \delta)} \right] \cdot 100\%$$

جابجایی فاز در یک ترانسفورماتور اندازه گیری معمولاً به صورت خطای زاویه بر حسب دقیقه بیان می شود . زاویهٔ کمان δ (دقیقه) در مبنای پریونیت به صورت زیر است :

$$\delta = \delta_I - \delta_U = \frac{2 \cdot \pi}{360 * 60} . (\delta_I - \delta_U) = 0{,}000291 * (\delta_I - \delta_U)$$

که قابل تبدیل به رابطهٔ زیر است :

$$E_\delta = +0{,}0291 * (\delta_I - \delta_U) * tg(\varphi - \delta_I + \delta_U) \quad \%$$



شاخص1 = مقدار تصحیح شده

شاخص 2 = مقدار تصحیح نشده (اندازه گیری شده)

δ_U = خطای زاویه فاز ترانسفورماتور ولتاژ

δ_I = خطای زاویه فاز ترانسفورماتور جریان

δ = δ_I - δ_U

E_I = خطای نسبت تبدیل ترانسفورماتور جریان

E_U = خطای نسبت تبدیل ترانسفورماتور ولتاژ

شکل ۵- ۱۰ : نمودار برداری برای تست بار با استفاده از ترانسفورماتور ولتاژ و جریان

خطای زاویه فاز ترانسفورماتورهای اندازه گیری کمتر از ۱ دقیقه است و بنابراین $\varphi >> (\delta_I - \delta_U)$ ؛

بنابراین $tg(\varphi - \delta_I + \delta_U)$ را می توان به جای

$$E_\delta = +0{,}0291 \cdot (\delta_I - \delta_U) \cdot tg\varphi \quad \%$$

استفاده کرد که در آن :

δ_I = خطای زاویهٔ فاز ترانسفورماتور جریان بر حسب دقیقه

δ_U = خطای زاویهٔ فاز ترانسفورماتور ولتاژ بر حسب دقیقه

خطای تلفات اندازه گیری شده به اختلاف خطای زاویهٔ فاز ترانسفورماتورهای جریان و ولتاژ وابسته است نه به خطای هر یک از دو نوع ترانسفورماتور اندازه گیری ، شکل ۵- ۱۱ را ببینید . باید همچنین توجه شود خطای زاویه ترانسفورماتورهای اندازه گیری بر حسب دقیقه بیان می شود .

خطای کل ناشی از ترانسفورماتورهای اندازه گیری عبارت است از :

$$E = E_\delta + E_I + E_U \quad \%$$

که در آن :

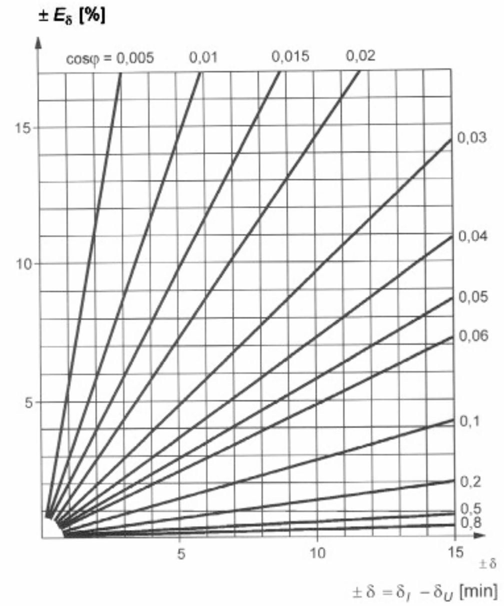
E_I = خطای نسبت تبدیل برای مدار اندازه گیری جریان بر حسب %

E_U = خطای نسبت تبدیل برای مدار اندازه گیری ولتاژ بر حسب %

یا

$$E = +0{,}0291 \cdot (\delta_1 - \delta_U) \cdot tg\varphi + E_I + E_U \quad \%$$

این رابطهٔ اصلاحی در مورد اندازه گیری توان های سلفی سه فاز با استفاده از روش سه واتمتری نیز معتبر است . تصحیح مربوط به هر فاز جداگانه انجام می شود ، چون ضریب توان ، ترانسفورماتور اندازه گیری و مقادیر قرائت شده متفاوت است .



E_δ = خطای مقدار اندازه گیری شده

δ = اختلاف خطای زاویهٔ فاز $(\delta_I - \delta_U)$

شکل ۵- ۱۱ : خطای تلفات اندازه گیری شده به صورت تابعی از اختلاف خطاهای زاویهٔ فاز ترانسفورماتور های جریان و ولتاژ . (خطای زاویهٔ فاز بر حسب دقیقه)

ضمیمه ۵- ۵- ۲ اندازه گیری توان سه فاز سلفی با استفاده از روش دو واتمتری

پس از یک تبدیل مناسب ، رابطهٔ اصلاحی برای دو واتمتر بدست می آید (قرائت هر واتمتر باید به صورت جداگانه تصحیح شود) .

واتمتر با میزان انحراف زیاد

ترانسفورماتور های اندازه گیری مربوطه شاخص 1 را دارند

$$E = +0{,}0291 \cdot (\delta_{I1} - \delta_{U1}) \cdot tg(\varphi - 30) + E_{I1} + E_{U1} \quad \%$$

واتمتر با میزان انحراف کم

ترانسفورماتور های اندازه گیری مربوطه شاخص 2 را دارند

$$E = +0{,}0291 \cdot (\delta_{I2} - \delta_{U2}) \cdot tg(\varphi + 30) + E_{I2} + E_{U2} \quad \%$$

که در آن :

δ_{I2}, δ_{U2} = خطای زاویهٔ فاز بر حسب دقیقه

E_{I2}, E_{U2} = خطای نسبی بر حسب درصد

که در آن :

$$tg(\varphi \pm 30) \rightarrow \cos(\varphi \pm 30) = \frac{P}{U_{LL} \cdot I}$$ به علائم مثبت یا منفی دقّت کنید .

علامت خطا معادل اختلاف خطای زاویه موقع اندازه گیری تـوان تکفـاز اسـت . از طـرف دیگر هنگام اندازه گیری توان سه فاز با استفاده از روش دو واتمتری ، علامت بـه بزرگـی زاویهٔ فاز نیز بستگی دارد .

بنابراین تلفات بار به صورت زیر تصحیح می گردد :

$$P_1 = P_2 \cdot \left(1 - \frac{E}{100}\right)$$

که در آن :

P_1 = تلفات بار تصحیح شده

P_2 = تلفات بار تصحیح نشده (اندازه گیری شده)

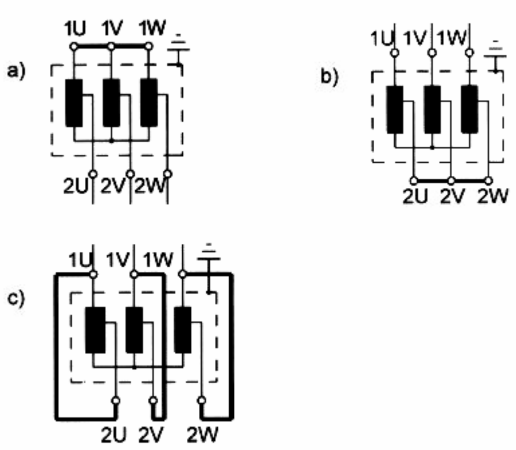
E = خطا بر حسب درصد

به طور کلی داریم : خطای مثبت از مقدار اندازه گیـری کـم مـی شـود ، در صـورتی کـه خطای منفی با آن جمع می شود .

ضـمیمهٔ ۵- ۶ انــدازه گیــری ولتــاژ اتّصــال کوتــاه بــرای ترانسفورماتورهای راه انداز با فاصلهٔ هوایی

بـــرای ترانســـفورماتورهای راه انـــداز دارای فاصـــلهٔ هـــوایی ، رابطـــهٔ $X_H >> X_1, X_2, R_1, R_2$ دیگر صادق نیست ، شکل ۵- ۱ را ببینید . بنابراین طرفی که ولتاژ اتّصال کوتاه از آن اندازه گیری می شود اهمیت دارد .

شکل ۵- ۱۲ سه مدار ممکن را برای اندازه گیری نشان می دهد ، ولی فقط دو مـدار اول تقریباً درست است . اگر مقدار دقیق مورد نیاز باشد به منظور محاسبهٔ مجزای دو امپدانس، باید اندازه گیری بار و بی باری از هر دو طرف انجام گیرد . در اندازه گیـری تلفـات بـار ، مقدار اندازه گیری شده باید با احتساب مقدار تلفات بی باری تصحیح شود .



شکل ۵- ۱۲ : ترانسفورماتور راه انـداز بـا فاصـلهٔ هــوایی ؛ ســه امکــان بــرای اندازه گیری ولتاژ امپدانس

ضمیمهٔ ۵- ۷ اتّصالات برای آزمایش های عیب یابی

برای آزمایش های عیـب یـابی ممکـن اسـت لازم شـود انـدازه گیـری تلفـات بـار یـک ترانسفورماتور سه فاز به صورت فاز به فاز با استفاده از یک منبـع تکفـاز انجـام شـود . در ترانسفورماتورهای با اتّصالات Y/Y یا Δ /Y با نوترال قابل دسترس ، انـدازه گیـری بـه صورت فاز به نوترال انجام می شود .

ضمیمه ۵- ۸ مثال ها

مثال ۱ :

ترانسفورماتور مورد آزمایش :

ترانسفورماتور سه فاز بدون تنظیم ولتاژ ، مطابق IEC .

توان :	۵۵ MVA	فرکانس :	۵۰ Hz
ولتاژ :	۵۵ / ۱۱ kV	گروه برداری :	Yd5
جریان :	۵۷۷ / ۲۸۸۷ A	خنک کنندگی :	ONAN

ترانسفورماتور بایستی حداقل سه ساعت بدون برق بوده باشد ، تا اختلاف دما بین سیم پیچ ها و روغن صفر شود .

الف) اندازه گیری مقاومت سیم پیچ ها فاز به فاز

دمای متوسط سیم پیچ : Θ_{mR} = ۲۱ °C

مقدار متوسط HV (1U-1V) : R_{HV} = ۰/۰۹۱۳ Ω

مقدار متوسط LV (2U-2V) : R_{LV} = ۳/۳۲۰ mΩ

ب) اندازه گیری دمای متوسط سیم پیچ

Θ_m بالای روغن = ۱۸ °C

Θ_m پایین روغن = ۱۶ °C

دمای متوسط روغن = ۱۷ °C

دمای متوسط سیم پیچ Θ_m برابر است با دمای متوسط روغن

توجه :

اندازه گیری بلافاصله قبل از تست تلفات بار انجام می شود .

پ) اندازه گیری به روش سه واتمتری

منبع تغذیه : سیم پیچ فشار قوی

اتّصال کوتاه شده : سیم پیچ فشار ضعیف

مقدار اندازه گیری شده برای دمای متوسط سیم پیچ Θ_m = ۱۷ °C

U_{av}	I_{L1}	I_{L2}	I_{L3}	I_m	P_{L1}	P_{L2}	P_{L3}	P_L
kV	A	A	A	A	kW	kW	kW	kW
۵/۶	۵۵۲	۵۵۲	۵۵۲	۵۵۲	۵۳/۰۴	۳۴/۹۲	۳۷/۲۰	۱۲۵/۱۶

ت) کنترل خطای ترانسفورماتور اندازه گیری

خطا مطابق گواهی کالیبراسیون :

فاز	ترانسفورماتور جریان		ترانسفورماتور ولتاژ	
	E_I (%)	δ_1 min	E_U %	δ_U min
$L1$	+۰/۰۲	+۲/۴	+۰/۱۵	+۲/۰
$L2$	+۰/۰۲	+۳/۲	+۰/۱۴	+۱/۳
$L3$	+۰/۰۲	+۳/۱	+۰/۱۵	+۱/۰

محاسبة خطای ترانسفورماتور اندازه گیری برای هر فاز :

فاز	ضریب توان	محاسبة خطا ، E %
$L1$	۰/۰۲۹۷	+۰/۰۲۹۱(۲/۴-۲/۰) ۳۳/۶+۰/۰۲+۰/۱۵ = +۰/۵۶
$L2$	۰/۰۱۹۶	+۰/۰۲۹۱(۳/۲-۱/۳) ۵۱/۱+۰/۰۲+۰/۱۴ = +۲/۹۹
$L3$	۰/۰۲۰۸	+۰/۰۲۹۱(۳/۱ -۱/۰) ۴۷/۹+۰/۰۲+۰/۱۵ = +۳/۱۰

مقادیر تصحیح شده برای P_{Lcorr}

U_{av}	I_{L1}	I_{L2}	I_{L3}	I_m	P_{L1}	P_{L2}	P_{L3}	P_{Lcorr}
kV	A	A	A	A	kW	kW	kW	kW
۵/۶	۵۵۲	۵۵۲	۵۵۲	۵۵۲	۵۲/۷۴	۳۳/۸۸	۳۶/۰۵	۱۲۲/۶۷

ث) تبدیل ولتاژ اتّصال کوتاه و تلفات بار برای جریان نامی I_r

ولتاژ اتّصال کوتاه kV

$$U_{CC} = 5{,}60\,\frac{577}{552} = 5{,}85\ \text{kV}$$

ولتاژ اتّصال کوتاه نسبی %

$$\varepsilon_{CC} = \frac{5{,}85}{55}\cdot 100 = 10{,}64\ \%$$

تلفات بار :

$$P_L = 122{,}67\cdot\left(\frac{577}{552}\right)^2 = 134{,}03\ \text{kW}$$

در I_r = ۵۷۷ A Θ_m = ۱۷ °C

ج) تجزیه تلفات بار

مؤلفة اهمی عبارت است از :

$$P_{jHV} = 3\cdot I_{ph}^2 R_{ph} = 3\cdot I_r^2 R_{ph-ph}\cdot 0{,}5 = 1{,}5\cdot I_r^2 R_{ph-ph}$$

$$P_{jLV} = 3\cdot I_{ph}^2 R_{ph} = 3\left(\frac{I_r}{\sqrt{3}}\right)^2 R_{ph-ph}\cdot 1{,}5 = 1{,}5\cdot I_r^2 R_{ph-ph}$$

HV : ۵۷۷ ۲ * ۰/۰۹۱۳ * ۱/۵ = ۴۵/۵۹ kW

LV : ۲۸۸۷ ۲* ۰/۰۰۳۳۲۰ * ۱/۵ = ۴۱/۵۱ kW

(Θ_{mR} = ۲۱ °C) در P_j = ۸۷/۱۰ kW

با تبدیل به Θ_m = ۱۷ °C (سیم پیچ مسی) حاصل می شود :

$$P_j = 87{,}10\cdot\left(\frac{235+17{,}0}{235+21{,}0}\right) = 85{,}74\ \text{kW}$$

در Θ_m = ۱۷ °C

P_L در I_r و ۱۷ °C = ۱۳۴/۰۳ kW

P_j در I_r و ۱۷ °C = ۸۵/۷۴ kW

P_a در I_r و ۱۷ °C = ۴۸/۲۹ kW

چ) با تبدیل برای دمای متوسط سیم پیچ ۷۵ °C حاصل می شود :

$$P_j = 85{,}74 \cdot \left(\frac{235+75}{235+17}\right) = 105{,}47 \text{ kW}$$

$$P_a = 48{,}29 \cdot \left(\frac{235+17}{235+75}\right) = 39{,}26 \text{ kW}$$

P_L در I_r و ۷۵ °C عبارت است از :

۱۰۵/۴۷ + ۸۵/۷۴ = ۱۴۴/۷۳ kW

مثال ۲ :

ترانسفورماتور مورد آزمایش

اتو ترانسفورماتور تکفاز با سیم پیچ سوم ، مطابق IEC :

S = ۲۰۰ / ۲۰۰ / ۲۵ MVA

U = ۲۰۰ /۱۲۵ / ۲۵ kV

I = ۱۰۰۰ / ۱۶۰۰ / ۱۰۰۰ A

گروه اتّصال : Ia

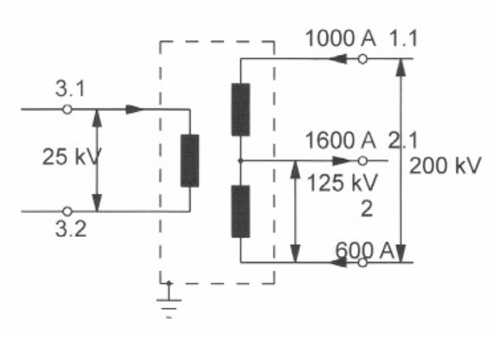
فرکانس : ۵۰ Hz

خنک کنندگی : ONAN

ε_{cc} :
- HV/MV %۱۰
- HV/LV %۳۵
- MV/LV %۳۰

مبنای ۲۰۰ MVA برای تمام مقادیر

شکل ۵- ۱۳ را برای نمایش شماتیک مقادیر نامی ترانسفورماتور ببینید :



شکل ۵- ۱۳ : اتو ترانسفورماتور تکفاز با سیم پیچ سوم

$$S_e = (U_{HV} - U_{LV}).I_{HV} = (I_{LV} - I_{HV}).U_{LV}$$

= (۱۶۰۰ – ۱۰۰۰) * ۱۲۷ = ۷۵ MVA

نسبت S_e به S_r = $\frac{75}{200} \cdot 100 = 37{,}5\%$

توان ظاهری در ولتاژ اتّصال کوتاه :

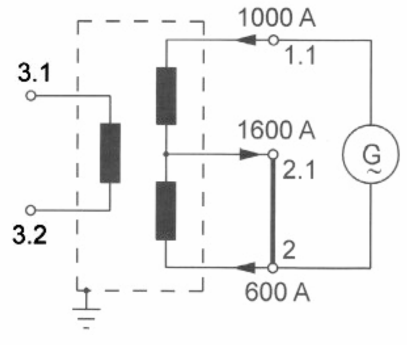
S_{cc} (HV/MV) = ۰/۱ * S_r = ۲۰ MVA

S_{cc} (HV/LV) = ۰/۳۵ * S_r = ۷۰ MVA

S_{cc} (MV/LV) = ۰/۳۰ * S_r = ۶۰ MVA

اتّصالات مداری زیر برای اندازه گیری تلفات بار HV/MV ممکن است :

الف) مطابق شکل ۵- ۱۴ :



شکل ۵- ۱۴ : اتّصال کوتاه HV/MV

اندازه گیری : P_L = ۶۰۰ kW

$$U_{cc} = \frac{S_{cc}}{I} = \frac{20000}{1000} = 20 \text{ kV}$$

$$\varepsilon_{cc} = \frac{20}{200} \cdot 100 = 10\%$$

رابط اتّصال کوتاه باید مناسب ۱۶۰۰ A باشد . ولتاژ اتّصال کوتاه اندازه گیری شده نیازی به تصحیح ندارد .

ب) مطابق شکل ۵- ۱۵ :

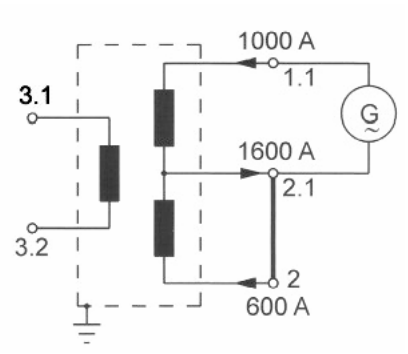
اندازه گیری :

$$U_{cc} = \frac{S_{cc}}{I} = \frac{20000}{1000} = 20 \ \text{kV}$$

$$\varepsilon_{cc} = \frac{20}{200-125} \cdot 100 = 26{,}6\%$$

$$\varepsilon_{cc} = 26{,}6 \cdot \frac{S_e}{S_r} = 10\%$$

رابط اتّصال کوتاه باید مناسب A ۶۰۰ باشد . ولتاژ اتّصال کوتاه اندازه گیری شده بایستی تصحیح شود .



شکل ۵- ۱۵ : اتّصال کوتاه HV/MV

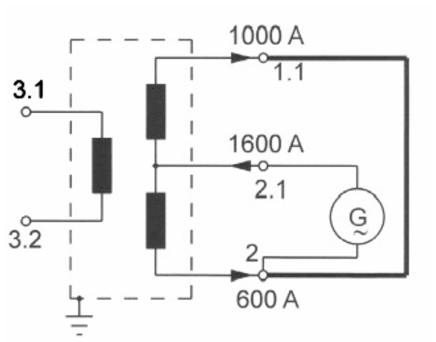
پ) مطابق شکل ۵- ۱۶ :

اندازه گیری :

$$U_{cc} = \frac{20000}{1600} = 12{,}5 \ \text{kV}$$

$$\varepsilon_{cc} = \frac{12{,}5}{125} \cdot 100 = 10\%$$

رابط اتّصال کوتاه باید مناسب A ۱۰۰۰ باشد . معمولاً طول آن بدلیل لزوم ارتباط نـوترال به ترمینال های HV بلند است . ولتاژ اتّصال کوتاه اندازه گیری شده نیـازی بـه تصـحیح ندارد .



شکل ۵- ۱۶ : اتّصال کوتاه HV/MV

ت) مطابق شکل ۵- ۱۷ :

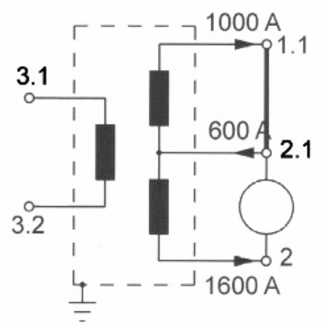
اندازه گیری :

$$U_{cc} = \frac{20000}{600} = 33{,}3 \ \text{kV}$$

$$\varepsilon_{cc} = \frac{33{,}3}{125} \cdot 100 = 26{,}6\%$$

$$\varepsilon_{cc} = 26{,}6 \cdot \frac{S_e}{S_r} = 10\%$$

رابط اتّصال کوتاه باید مناسب A ۱۰۰۰ باشد . طول آن کوتاهتر از حالت پ است . ولتاژ اتّصال کوتاه اندازه گیری شده بایستی تصحیح شود .



شکل ۵- ۱۷ : اتّصال کوتاه HV/MV

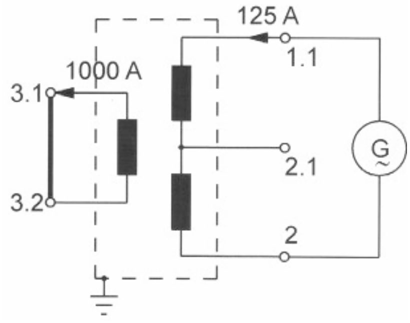
اندازه گیری تلفات بار برای ترکیب HV/LV ، شکل ۵- ۱۸ .

اندازه گیری :

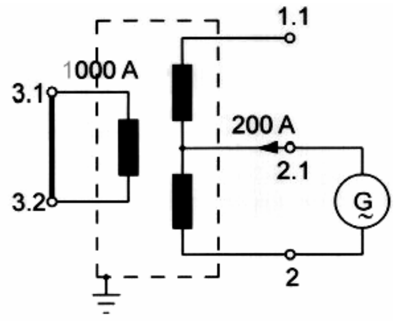
$$U_{cc} = \frac{S_{cc}}{I} = \frac{70000}{1000} \cdot \frac{25}{200} = 8{,}75 \ \text{kV}$$ بر مبنای MVA ۲۵

$$P_L = 80 \ \text{kW}$$

بر مبنای MVA ۲۰۰ : $$80 \cdot \left(\frac{200}{25}\right)^2 = 512 \ \text{kW}$$



شکل ۵- ۱۸ : اتّصال کوتاه HV/LV



شکل ۵- ۱۹ : اتّصال کوتاه MV/LV

اندازه گیری تلفات بار برای ترکیب MV/LV ، شکل ۵- ۱۹ را ببینید .

اندازه گیری :

$$U_{cc}=\frac{S_{cc}}{I}=\frac{60000}{1600}\cdot\frac{25}{200}=4{,}59\text{ kV}$$ بر مبنای ۲۵ MVA

P_L = 70 kW

بر مبنای ۲۰۰ MVA : $70\cdot\left(\frac{200}{25}\right)^2$ = 448 kW

محاسبهٔ ولتاژ اتّصال کوتاه برای بهره برداری سه سیم پیچه :

با تبدیل ε_{cc} بر مبنای ۲۰۰ MVA :

ε_{cc12} = ۱۰ %

ε_{cc13} = ۳۵ %

ε_{cc23} = ۳۰ %

$$\varepsilon_{cc1}=\frac{10+35-30}{2}=7{,}5\%$$

$$\varepsilon_{cc2}=\frac{10+30-35}{2}=2{,}5\%$$

$$\varepsilon_{cc3}=\frac{30+35-10}{2}=27{,}5\%$$

محاسبه تلفات بار ترکیبی سه سیم پیچ در ۲۰۰ / ۲۰۰ / ۲۵ MVA :

P_{L12} = ۶۰۰ kW ⟵ $P_{L(200MVA)}$

P_{L13} = ۵۱۲ kW

P_{L23} = ۴۴۸ kW

برای بار ۲۰۰ MVA سه تلفات (P_{L1} ، P_{L2} و P_{L3}) عبارت خواهد بود از :

$$P_{L1}=\frac{600+512-448}{2}=332\text{ kW}$$

$$P_{L2}=\frac{600+448-512}{2}=268\text{ kW}$$

$$P_{L3}=\frac{512+448-600}{2}=180\text{ kW}$$

بار واقعی (مقدار نامی) فقط ۲۵ MVA است و لازم است P_{L3} به تناسب محاسبه شود:

$$P_{L3(adj)}=180\cdot\left(\frac{25}{200}\right)^2=2{,}8\text{ kW}$$

بنابراین تلفات بار مرکب (در هر سه سیم پیچ) در ۲۰۰ / ۲۰۰ / ۲۵ MVA عبارت خواهد بود از :

P_L = ۳۳۲ + ۲۶۸ + ۲/۸ = ۶۰۲/۸ kW

۵- اندازه گیری امپدانس یا ولتاژ اتصال کوتاه و تلفات بار

تست ترانسفورماتورهای قدرت

۶- اندازه گیری تلفات بی باری و جریان بی باری

۶- ۱ مراجع / استانداردها

- IEC 60076-1 (2000), Clause 10.1: "General requirement for routine, type and special tests" , clause 10.5: "Measurement of no-load loss and current" [1]
- IEC 60076-8 (1997), clause 10: "Guide to the measurement of losses in power transformers" [6]
- IEEE Std C57.12.90-1999, clause 8: "No-load losses and excitation current" [51]

توجه :

اندازه گیری تلفات بی باری و جریان بی باری بر طبق استاندارد IEC [1] و استاندارد IEEE [50] یک تست روتین است .

۶- ۲ منظور از اندازه گیری

تلفات بی باری با تحریک ترانسفورماتور ایجاد می گردد و موجب اتلاف مقدار قابل توجهی از انرژی در طول زمان بهره برداری ترانسفورماتور می شود . معمولاً مقدار تلفات واقعی بایستی بوسیلهٔ تولید کننده گارانتی شود و بنابراین اندازه گیری صحیح تلفات بی باری دارای اهمیت است .

۶-۳ کلیات

۶- ۳- ۱ ترانسفورماتور بی بار

یک ترانسفورماتور برق دار شده ولی بی بار مانند یک رئاکتور با هسته آهنی عمل می کند . مدار معادل این رئاکتور (ترانسفورماتور در حالت بی بار بدون سیم پیچ ثانویه) در شکل ۶- ۱ نشان داده شده است .

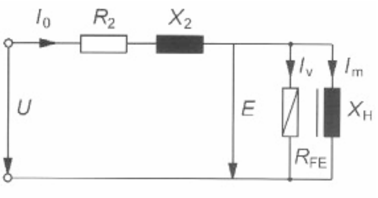
دیاگرام برداری شکل ۶- ۲ از روی مدار معادل رسم می شود .

مشخّصهٔ مغناطیسی هستهٔ آهنی همان حلقهٔ معروف یا منحنی هیسترزیس است ، شکل ۶- ۳ را ببینید . سطح داخلی این حلقهٔ دینامیک یا AC معیاری برای انرژی مورد نیاز برای تغییر شار در یک سیکل یعنی در یک دورهٔ تناوب است :

$$P_{Fe} = \frac{E^2}{R_{Fe}}$$

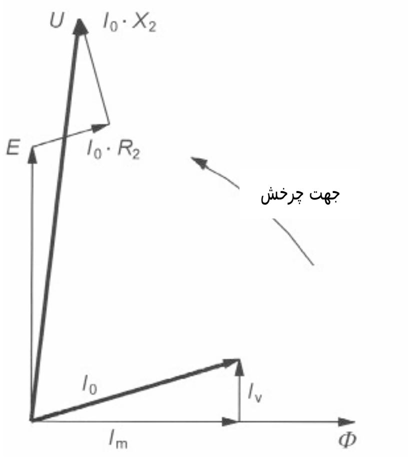
که در آن :

P_{Fe} = تلفات مغناطیس کنندگی
E = ولتاژ اعمال شده
R_{Fe} = مقاومت معادل

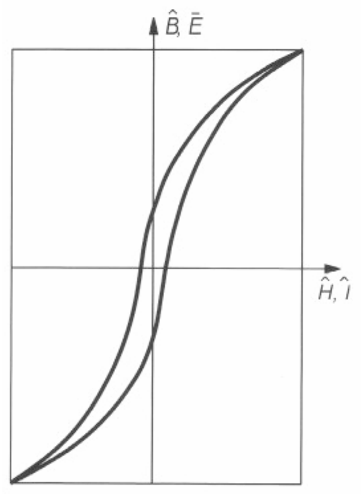


R_2 = مقاومت سیم پیچ
X_2 = خود القایی سیم پیچ به شکل رئاکتانس
R_{Fe} = مقاومت معادل آهن
X_H = رئاکتانس مغناطیس کنندگی
I_0 = جریان بی باری
E = ولتاژ مدار باز

شکل ۶- ۱ : مدار معادل بی باری



شکل ۶- ۲ : نمودار برداری بی باری



$\hat{B}$ = پیک چگالی شار مغناطیسی
$\hat{H}$ = پیک شدت میدان مغناطیسی

شکل ۶- ۳ : حلقهٔ مغناطیسی

با استفاده از قانون فارادی ، رابطهٔ القایی زیر نتیجه گیری می گردد :

$$u = -\frac{\partial \Phi}{\partial t}$$

که در آن :

u = مقدار لحظه ای ولتاژ القا شده

$$\Phi = \hat{\Phi} \cdot \cos\omega t$$

توجه :

به طور کلّی شار مغناطیسی و چگالی شار با مقدار پیک نمایش داده می شوند ، بنابراین مقدار $\hat{\Phi}$ با Φ_0 مشخّص می شود .

در نتیجه :

$$u = \omega \cdot \Phi_0 \cdot \sin\omega t$$

با استفاده از :

$$\hat{\Phi}_H = \hat{B}_{Fe} \cdot A$$

$$\omega = 2\pi f$$

که در آن :

$\hat{B}$ = چگالی شار در هسته (مقدار پیک) بر حسب تسلا (T)
معمولاً با B نشان داده می شود

A = سطح مقطع هسته

ω = فرکانس زاویه ای بر حسب 1/s

f = فرکانس توان بر حسب هرتز

داریم :

$$u = \omega \hat{B} A N \sin\omega t$$

که در آن :

N = تعداد دورهای دربرگیرندهٔ شار $\hat{B}.A$.

بنابراین ولتاژ متوسط یکسو $\overline{U}$ عبارت است از :

$$\overline{U} = 4{,}0 \cdot f \cdot \hat{B} \cdot A \cdot N$$

در مورد مقدار r.m.s آن فرمول مشهور ترانسفورماتور که برای مقادیر سینوسی معتبر است عبارت است از :

$$U_e = 4{,}44 \cdot f \cdot \hat{B} \cdot A \cdot N$$

که در آن :

$\overline{U}$ = مقدار متوسط ولتاژ بر حسب ولت

U_e = مقدار مؤثر ولتاژ بر حسب ولت

۶- ۳- ۲ تلفات بی باری

تلفات بی باری P_0 شامل مؤلفه های زیر است :

الف) تلفات آهن :

$$P_{Fe} = P_h + P_w = k_h \cdot f \cdot \hat{B}^x + k_w \cdot \delta^2 \cdot f^2 \cdot \hat{B}^2$$

که در آن :

P_h = تلفات هیسترزیس
P_w = تلفات گردابی
k_w, k_h = ضریب تلفات گردابی و هیسترزیس
δ = ضخامت ورق
x = نما- تابعی از چگالی شار

ب) تلفات عایقی :

$$P_c = U^2 \cdot \omega C \cdot tg\delta$$

پ) تلفات سیم پیچ :

$$P_j = I_0^2 \cdot R_2$$

برای ترانسفورماتورهای نرمال قدرت ، تلفات عایقی و ژولی که از نظر دامنه چندین برابر کوچکترند قابل صرفنظر هستند :

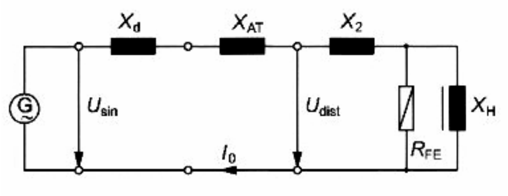
$$P_{Fe} >> P_c + P_j$$

این به این معنی است که تلفات بی باری P_0 برابر است با تلفات آهن P_{Fe} . موارد استثناء عبارتند از: ترانسفورماتورهای راه انداز با یک فاصلهٔ هوایی یا با سیم پیچ های طراحی شده برای بهره برداری کوتاه مدت .

۶- ۳- ۳ وابستگی تلفات بی باری و اعوجاج ولتاژ

هنگام تست بی باری در آزمایشگاه ، ولتاژ ترانسفورماتور مورد آزمایش در نتیجهٔ امپدانس داخلی منبع تغذیه اعوجاج پیدا می کند . غیر سینوسی بودن شدت جریان ترانسفورماتور تحت آزمایش موجب اعوجاج ولتاژ می شود ، که این هم موجب افت ولتاژ در امپدانس داخلی تغذیه ، ژنراتور و ترانسفورماتور واسطه می شود ، شکل ۶- ۴ را مشاهده کنید .

عملیات اندازه گیری معمولی نشان می دهد که تلفات هیسترزیس P_h تابعی از مقدار پیک چگالی شار و بنابراین تابعی از مقدار متوسط ولتاژ اعمال شده است . اگر این ولتاژ به درستی تنظیم شود ، P_h از اعوجاج ولتاژ تأثیر نمی پذیرد .



X_d = رئاکتانس سنکرون ژنراتور
X_{AT} = رئاکتانس اتصال کوتاه ترانسفورماتور واسطه
X_2 = رئاکتانس پراکندگی سیم پیچ LV
R_{FE} = مقاومت معادل آهن
X_H = اندوکتانس اصلی
U_{sin} = ولتاژ منبع بدون اعوجاج
U_{dist} = ولتاژ با اعوجاج دو سر TT
I_0 = جریان بی باری

شکل ۶- ۴ : اتّصالات ترانسفورماتور برای تست بی باری :
مدار معادل

از سوی دیگر تلفات گردابی P_W تابعی از مجذور ولتاژ مؤثر است ، همانند تلفات در یک مقاومت DC . مقدار مؤثر ولتاژ از اعوجاج تأثیر می پذیرد و در نتیجه تلفات گردابی هم تحت تأثیر اعوجاج ولتاژ است . برای شکل موج ولتاژ سینوسی :

(peak factor) ضریب پیک ولتاژ $k_s = \frac{\hat{U}}{U} = \sqrt{2}$

(form factor) ضریب فرم ولتاژ $k_f = \frac{U}{\overline{U}} = 1{,}11$

برای شکل موج اعوجاج یافته ، ضریب فرم (form factor) مانند ضریب موج سینوسی تغییر می کند . موج های نوک تیز ($k_f > ۱/۱۱$) با مقدار مؤثر بالاتر در همان ولتاژ متوسط (یعنی در همان چگالی شار ماکزیمم) تلفات بالاتری ایجاد می کنند . موج های هموار ($k_f < ۱/۱۱$) با مقدار مؤثر کوچکتر در همان ولتاژ متوسط منجر به تلفات پایین تر می شوند .

این اعوجاج ولتاژ در طول بهره برداری اتّفاق نمی افتد ، چون امپدانس سیستم تغذیه خیلی کوچکتر از امپدانس اندوکتانس اصلی X_H ترانسفورماتور است . به همین دلیل و برای ممکن ساختن مقایسهٔ تلفات ترانسفورماتورهای مختلف ، لازم است تلفات بی باری گارانتی شده با منبع تغذیهٔ سینوسی اندازه گیری شود . تلفات اندازه گیری شده با ولتاژ اعوجاج یافته باید به روش محاسباتی اصلاح شود .

۶- ۳- ۴ تصحیح ضریب فرم برای تلفات بی باری

رابطهٔ زیر برای تلفات بی باری اندازه گیری شده با ولتاژ اعوجاج یافته صادق است :

$$P_{0m} = P_h + P_w \cdot \left(\frac{k_f}{1{,}11}\right)^2$$

که در آن :

P_{0m} = تلفات بی باری اندازه گیری شده با ولتاژ اعوجاج یافته
P_h = تلفات هیسترزیس
P_w = تلفات گردابی
k_f = ضریب فرم ولتاژ

تقسیم بر P_0 (تلفات برای ولتاژ سینوسی) نتیجه می دهد :

$$\frac{P_{0m}}{P_0} = \frac{P_h}{P_0} + \frac{P_w}{P_0} \cdot \left(\frac{k_f}{1{,}11}\right)^2$$

[1] **IEC 60076-1**

مطابق فرمول تصحیح زیر :

$$P_0 = P_{0m} \cdot (1+d)$$

که در آن :

$$d = \frac{\overline{U} \cdot 1{,}11 - U}{\overline{U} \cdot 1{,}11}$$

اعوجاج ولتاژ در طول تست ($\overline{U} \cdot 1{,}11$ - U) تا ۳ % مجاز است . اگر مقدار بزرگتر باشد ، مدار اندازه گیری باید بررسی و اصلاح شود .

[51] **IEEE Std C57.12.90**

IEEE مؤلفه های نسبی تلفات را تعریف می کند . تلفات بی باری باید به صورت زیر اصلاح شود :

$$P_2 = \frac{P_w}{P_0} \text{ و } P_1 = \frac{P_h}{P_0}$$

که نتیجه می دهد :

$$P_0 = \frac{P_{0m}}{P_1 + P_2 \cdot \left(\frac{U}{\overline{U} \cdot 1{,}11}\right)^2} = \frac{P_{0m}}{P_1 + P_2 \cdot \left(\frac{k_f}{1{,}11}\right)^2} = \frac{P_{0m}}{P_1 + P_2 \cdot k}$$

اگر مقادیر پریونیت حقیقی برای P_1 و P_2 معلوم باشند ، تلفات بی باری را می توان برای شکل موج سینوسی واقعی محاسبه کرد . اگر مقادیر معلوم نباشند ، ۰/۵ پریونیت برای هر دو مقدار (کیفیت هستة فولاد با دو قطبی های جهت داده شده) استفاده می شود . با این محاسبه اگر تصحیح برای تلفات بی باری اندازه گیری شده بزرگتر از ۵ % باشد ، برای بهبود اعوجاج ولتاژ ، مدار اندازه گیری بایستی کنترل و اصلاح شود .

مقادیر پریونیت P_1 و P_2 را می توان با اندازه گیری مطابق بند ۲ ضمیمة ۶ مشخص نمود .

۶- ۳- ۵ وابستگی تلفات بی باری و دمای آهن

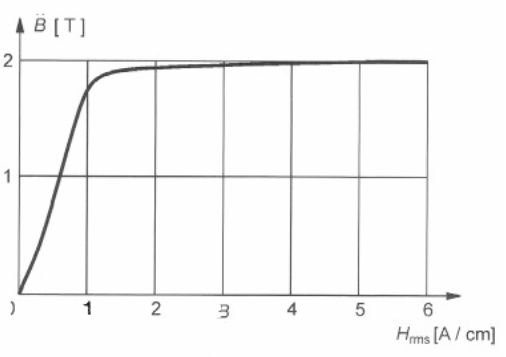
درکل ، وابستگی دمایی تلفات بی باری فقط در تغییرات دمایی نسبتاً بالا قابل مشاهده است .

[1] **IEC 60076-1**

ترانسفورماتور باید در آزمایشگاه و در دمای محیط تست شود . هیچ دمای مبنا و یا هیچ رابطه ای برای تصحیح نتیجه ، تعیین نگردیده است .

[51] **IEEE Std C57.12.90**

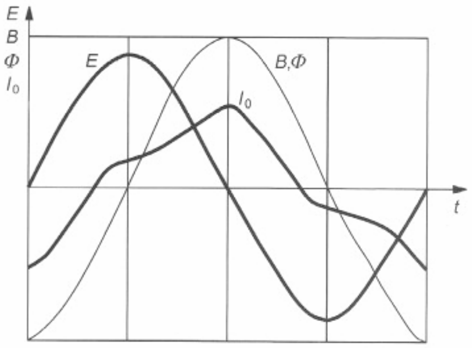
دمای مبنا برای تلفات بی باری ۲۰ °C + می باشد . IEEE Std C57.12.00 بند 5.9 را ببینید .



$\hat{B}$ = پیک چگالی شار مغناطیسی

H_{rms} = شدت میدان مغناطیسی

شکل ۶- ۵ : نمودار مشخّصة مغناطیسی



شکل ۶- ۶ : نمودار اسیلوگرافی

اگر شرایط زیر برقرار باشد اصلاح تلفات اندازه گیری شده لازم نیست :

الف)   دمای متوسط روغن (دمای متوسط آهن) بین ۱۰ °C ± دمای مبنا باشد .

ب)   اختلاف بین دمای روغن بالا و پایین از ۵ °C تجاوز نکند .

اگر شرایط بالا برقرار نبود ، تلفات بی باری اندازه گیری شده با استفاده از رابطهٔ تجربی زیر می تواند برای دمای مبنای ۲۰ °C اصلاح شود :

$$P_0 = P_{0m} \cdot \left(1 + \left(\Theta_m - 20\right) \cdot K\right)$$

که در آن :

P_0 = تلفات بی باری در دمای متوسط روغن (دمای آهن) ۲۰ °C

P_{0m} = تلفات بی باری در دمای متوسط روغن (دمای آهن) طی تست

Θ_m = دمای متوسط روغن (دمای آهن) طی تست

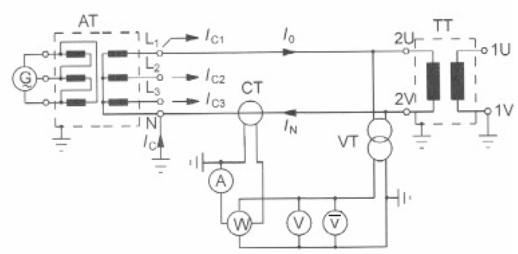
k_T = ضریب تجربی ، برای هسته با دو قطبی های جهت داده شده
اگر مقدار واقعی در دسترس نباشد این ضریب ۰/۰۰۰۶۵ است .

۶- ۳- ۶   جریان بی باری

به دلیل مشخّصهٔ مغناطیسی غیر خطی هستهٔ ترانسفورماتور (شکل ۶- ۵) و تلفات آهن متناسب با سطح داخل حلقه (شکل ۶- ۳) هنگام اعمال ولتاژ سینوسی ، جریان بی باری منتجه به ناچار اعوجاج پیدا می کند ، شکل ۶- ۶ را ببینید . برای ترانسفورماتورهای (توزیع) با توان کوچکتر جریان بی باری حدود ۱ تا ۵ % جریان نامی و برای ترانسفورماتورهای (قدرت) با توان بیشتر ۰/۱ تا ۰/۳ % می باشد .

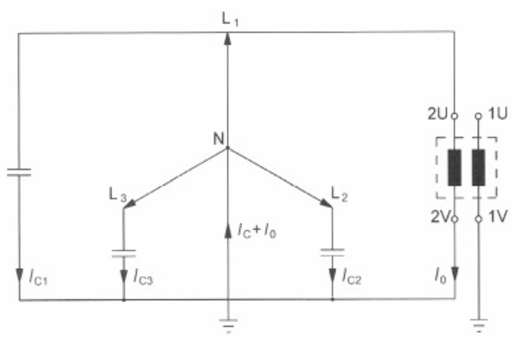
جریان بی باری مقدار مؤثر جریان اندازه گیری شده در طی تست تلفات بی باری است . معمولاً مقدار آن به صورت درصدی از جریان نامی سیم پیچ تغذیه شده بیان می شود . برای ترانسفورماتورهای سه فاز ، مقدار (جریان بی باری) متوسط مقادیر سه فاز است .

جریان تغذیه شده مجموع جریان مورد نیاز برای مغناطیس کردن هسته و جریان خازنی مصرفی توسط خازن سیم پیچ ها نسبت به زمین می باشد . برای ترانسفورماتورهای با جریان مغناطیس کنندهٔ پایین ، بویژه ترانسفورماتورهای ولتاژ بالا ، شاید جریان خازنی غالب باشد . بدین ترتیب با افزایش ولتاژ ، جریان بی باری به مینیمم کاهش پیدا می کند. همین که ولتاژ از مقدار متناسب با جریان مینیمم بالاتر رود جریان بی باری افزایش می یابد .



AT = ترانسفورماتور واسط
TT = ترانسفورماتور مورد آزمایش
CT = ترانسفورماتور جریان
VT = ترانسفورماتور ولتاژ
V = ولت متر r.m.s
$\bar{V}$ = ولت متر متوسط سنج
I_0 = جریان بی باری
I_N = جریان نوترال
$I_{C.C1...3}$ = جریان های خازنی

شکل ۶-۷ : اتّصالات ترانسفورماتور تک فاز برای تست تلفات بی باری ؛ تغذیه با ولتاژ فاز L1-N



شکل ۶- ۸ : تأثیر جریان های خازنی ؛ تغذیه با ولتاژ فاز L1-N ؛ مدار معادل شکل ۶- ۷

۶- ۴ مدار اندازه گیری

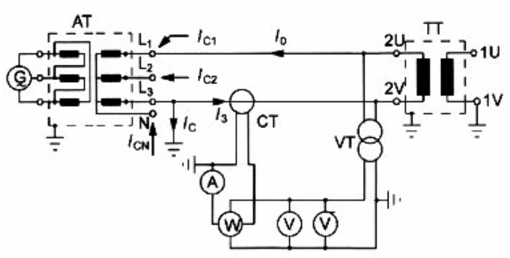
۶- ۴- ۱ ترانسفورماتورهای تک فاز

محل زمین کردن مدار برای اندازه گیری تلفات بی باری ترانسفورماتورهای تک فاز ممکن است خطایی در مقدار تلفات بی باری اندازه گیری شده ایجاد کند . منبع خطا جریان خازنی نشتی به زمین است که از خازن های پراکندگی کابل و سیم پیچ های ژنراتور و ترانسفورماتور واسطه حاصل می شود . مسیر عبور جریان زمین برای این جریان های خازنی ترمینال زمین شده است . طرف تغذیه را در شکل های ۶- ۷ و ۶- ۹ ببینید .

شکل ۶- ۷ و مدار معادل متناظر آن (شکل ۶- ۸) جریان ها را موقعی که تغذیه فاز به نول باشد ($L_1 _ N$) نشان می دهد . در موارد خاص جریان بی باری I_0 توسط جریان خازنی منتجه I_c تحت تأثیر قرار می گیرد . در حالت عادی جریان های خازنی I_{c1} ، I_{c2} و I_{c3} تقریباً هم دامنه هستند و ۱۲۰° اختلاف فاز دارند . در این حالت جریان منتجه صفر است .

اگر ولتاژ های تغذیه پتانسیل های یکسان نسبت به زمین نداشته باشند ، جریان پسماند I_c به وجود می آید . این جریان پسماند ، وابسته به محل ترمینال زمین ، می تواند روی جریان بی باری اثر بگذارد . این منبع خطا را می توان با قرار دادن ترمینال زمین ، قبل از ترانسفورماتور جریان در سمت منبع تغذیه حذف کرد . برا ی مدار اندازه گیری نشان داده شده در شکل ۶- ۹ ، ترانسفورماتور واسطه ، ترانسفورماتور مورد آزمایش را با ولتاژ خط به خط فازهای L_1 و L_3 تغذیه می کند . مدار معادل متناظر ، شکل ۶- ۱۰ ، اثر جریان منتجه I_c را روی جریان بی باری I_0 نشان می دهد .

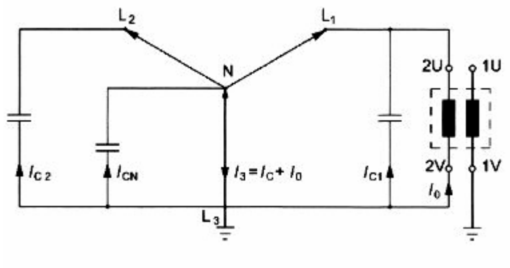
موقعی که اندازه گیری بی باری روی ترانسفورماتور تک فاز با یک ترمینال زمین شده در سمت تغذیه انجام می شود ، دستورالعمل زیر قابل استفاده است . ترانسفورماتور جریان در سمت زمین نشده قرار می گیرد . اگر بدلیل بالا بودن ولتاژ اعمالی این کار عملی نباشد ، می توان ترانسفورماتور جریان را به کابل تغذیة زمین شده متّصل کرد به شرطی که با دید از طرف تغذیة اتّصال به زمین جلوتر از CT انجام شده باشد .



I_3 = جریان منتجه

$I_{C,CN,C1...3}$ = جریان های خازنی

شکل ۶- ۹ : اتّصالات ترانسفورماتور تک فاز برای تست تلفات بی باری ؛ تغذیة ولتاژ L1-L3



شکل ۶- ۱۰ : تأثیر جریان های خازنی ؛ تغذیه با ولتاژ L1-L3 ؛ مدار معادل شکل ۶- ۹

۶- ۴- ۲   ترانسفورماتورهای سه فاز

موقعی که ترانسفورماتور واسطه برای تست تلفات بی باری استفاده شود ، لازم است در اتّصالات اولیه و ثانویهٔ مدار اندازه گیری دقّت شود . شکل ۶- ۱۱ دیاگرام تک خطی مدار تست و جدول ترکیب های مجاز اتّصالات را نشان می دهد .

اجزای مدار بایستی شرایط زیر را داشته باشند :

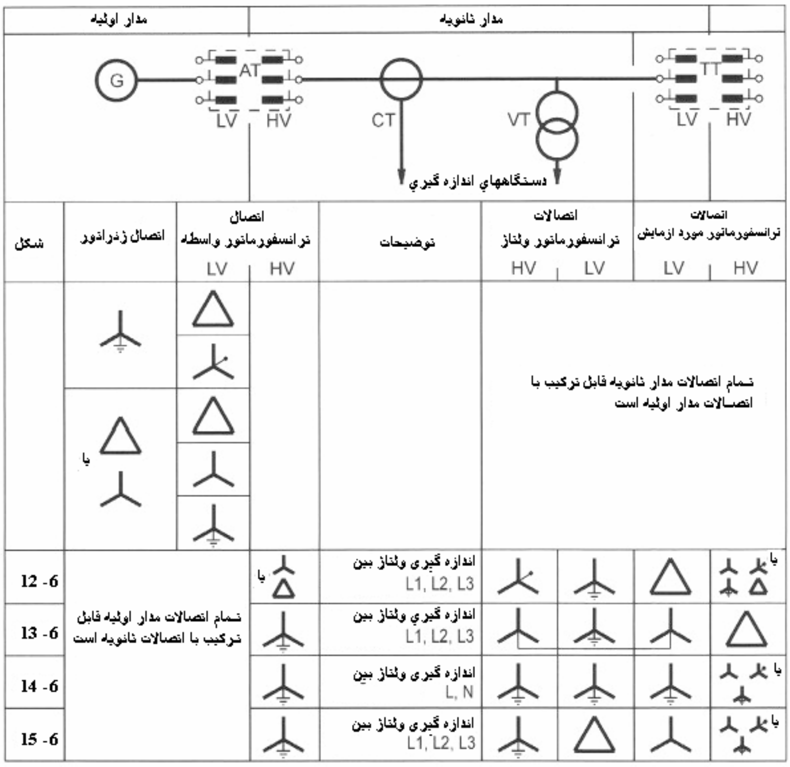
- ژنراتور باید با تغییر بار ، فرکانس ثابتی داشته باشد
- امپدانس اتّصال کوتاه ژنراتور و ترانسفورماتور واسطه باید تا حد امکان کوچک باشد

بدین ترتیب لازم است توان ژنراتور در مقایسه با توان ظاهری بی باری ترانسفورماتور مورد آزمایش تا حد امکان بزرگ باشد (۵ تا ۱۰ برابر) . پایین بودن امپدانس اتّصال کوتاه موجب کوچک شدن اعوجاج ولتاژ می شود .

هنگام تست ترانسفورماتورهای سه فاز ، برای امکان تعیین ضریب فرم ، لازم است ولتاژهای اعمال شده به هر یک از سیم پیچ ها (ولتاژهای فاز) اندازه گیری شوند . ولتاژ خط به خط سیم پیچ های با اتّصال ستاره از ولتاژهای فاز ساخته می شوند ؛ ضریب فرم برای این ولتاژها مختلف است چون آنها شامل هارمونیک های مضرب ۳ نیستند . برای رسیدن به چگالی شار ماکزیمم ، اندازه گیری دقیق

$$\overline{U} = K.f.\hat{B}$$

لازم است .



AT = ترانسفورماتور واسط
TT = ترانسفورماتور مورد آزمایش
HV = فشارقوی
LV = فشار ضعیف
CT = ترانسفورماتور جریان
VT = ترانسفورماتور ولتاژ

شکل ۶- ۱۱ : اتّصالات ترانسفورماتور سه فاز برای تست تلفات بی باری ؛ مدار معادل تک فاز

در جدول شکل ۶- ۱۱ تمام اتّصالات ممکـن بـرای انـواع گـروه هـای بـرداری و اجـزاء مختلف مدار نشان داده شده است . شکل های ۶- ۱۲ تا ۶- ۱۵ مـدارهای انـدازه گیـری مختلف را نشان می دهد .

مدار شکل ۶- ۱۲ برای همه ترانسفورماتورهای مورد آزمایش با گروه اتّصال YNd ، Yd یا Dd مناسـب اسـت . ترانسـفورماتورهای ولتـاژ و واتمترهـا بـه صـورت سـتاره متّصـل می شود . ولت مترها بین دو فاز وصل شده و ولتاژهای خط به خط را اندازه می گیرند که برای یک ترانسفورماتور با اتّصال مثلث همان ولتاژ فاز است .

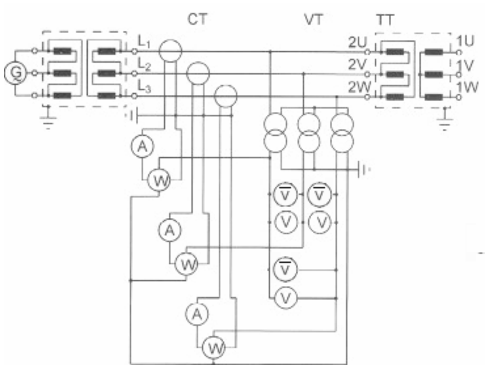
شکل ۶- ۱۳ نحوة اتّصال را بـرای ترانسـفورماتورهای دارای گـروه اتّصـال Dyn نشـان می دهد . ترانسفورماتورهای ولتاژ و واتمترها به صورت ستاره متّصل می شود . ولتمترهـا ولتاژهای خط به خط را اندازه می گیرند که علی رغم ستاره بودن اتّصال ، در اینجا مجـاز می باشد و دلیل آن این است که هارمونیک سوم جریان می تواند در سیم پیچ فشـارقوی با اتّصال مثلث گردش کنـد . بـدین ترتیـب از اعوجـاج ولتـاژ در سـیم پـیچ فشارضـعیف جلوگیری می شود .

در شکل ۶- ۱۴ برای گروه های اتّصال Yyn و YNyn ، ولتمترها باید ولتاژهـای فـاز را اندازه گیری کنند .

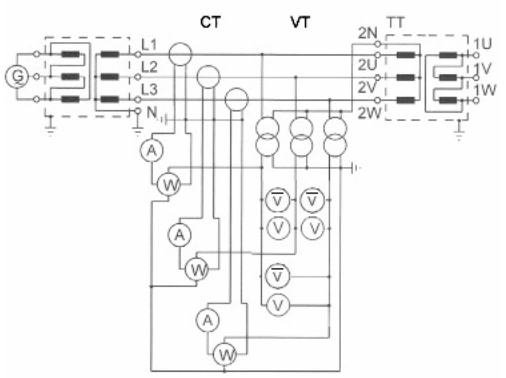
برای مدار شکل ۶- ۱۵ گروههای اتّصالYy و YNy ، ترانسفورماتورهای ولتاژ در سـمت ثانویه به صورت مثلث وصل می شوند . ولتمترها ولتاژهای خط به خط را اندازه می گیرند.

۶- ۴- ۳ مشخّصات تجهیزات اندازه گیری

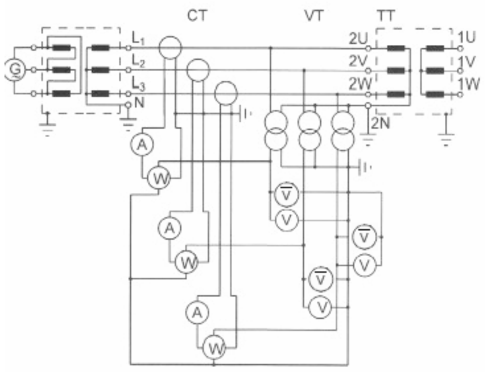
برای مشخّصات تجهیزات اندازه گیری ، بند ۱ ضمیمة ۶ را ببینید .



شکل ۶- ۱۲ : اتصالات ترانسفورماتور سه فاز در تست تلفات بی باری برای Yd ، Dd ، YNd



شکل ۶- ۱۳ : اتصالات ترانسفورماتور سه فاز در تست تلفات بی باری؛ برای Dyn



شکل ۶- ۱۴ : اتصالات ترانسفورماتور سه فاز در تست تلفات بی باری؛ برای Yyn و YNyn

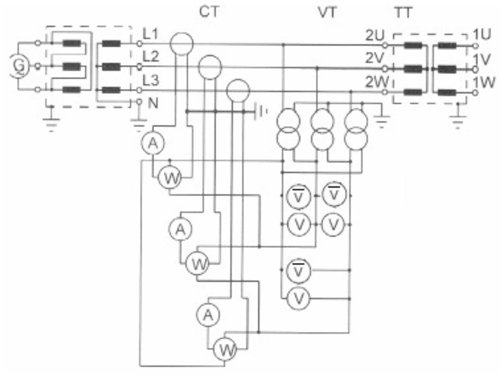
۶- ۵   روش اندازه گیری

ترانسفورماتورهای جریان نصب شدهٔ داخل ترانسفورماتور باید در طول تست ، اتّصال کوتاه شوند . بوشینگ تپ ها باید زمین شوند . علاوه بر این مطابق اطلاعات شکل ۶- ۱۱ بایستی نقطهٔ نوترال سیم پیچ های با عایق بندی غیر یکنواخت زمین شود . قبل از انجام تست تلفات بی باری ، نسبت تبدیل ولتاژ باید کنترل شود . برای ترانسفورماتورهای روغنی ، بوشینگ ها و رلهٔ بوخهلتس باید هواگیری شوند و سطح روغن ترانسفورماتور (و کلید تنظیم ولتاژ اگر وجود داشته باشد) باید کنترل گردد .

قبل از انجام اندازه گیری تلفات ، ترانسفورماتور مورد آزمایش باید با ۱/۱ تا ۱/۱۵ برابر ولتاژ نامی تحریک شود . اضافه تحریک ، اثرات پسماند بوجود آمده بدلیل اعمال جریان DC در طول اندازه گیری های مقاومت یا تست ضربهٔ کلید زنی را کاهش می دهد . تا وقتی که چندین سیکل از مشخّصهٔ مغناطیسی طی نشود تلفات بی باری درست قابل اندازه گیری نیست . در طول این پروسه ، عدد قرائت شده از آمپرمترها و واتمترها کاهش می یابد . وقتی که مقادیر اندازه گیری شده ثابت شوند ، اندازه گیری تلفات واقعی را می توان شروع کرد .

معمولاً اندازه گیری در ۱۱۰% شروع و با کاهش ولتاژ تا ۱۰۰ ، ۹۰ و ۸۰ % مقدار نامی ادامه می یابد . ولتاژ تغذیه با استفاده از یک ولتمتر متوسط سنج تنظیم می شود . برای ترانسفورماتورهای سه فاز ، معیار متوسط ولتاژ سه فاز می باشد . اگر ولتاژ را نتوان با دقّتی در حدود ۰/۱% مقدار گارانتی شده تنظیم کرد ، برای یک ولتاژ خاص عدد واقعی تلفات با درون یابی محاسبه می شود .

موقع تست ترانسفورماتورهای سه فاز بزرگ ، سه واتمتر مقادیر مختلفی را نشان می دهند . حتّی ممکن است قرائت یک واتمتر منفی شود . توان واقعی ورودی ، مجموع قرائت های سه واتمتر است . وابسته به چگالی شار در هسته ، اختلاف فاز بین جریان و ولتاژ در یک فاز از ۹۰° بزرگتر می شود و توان منفی ، در یک واتمتر مشاهده می شود [211] .



شکل ۶- ۱۵ : اتّصالات ترانسفورماتور سه فاز در تست تلفات بی باری ؛ برای Yy و YNy

۶- ۶ بررسی نتایج اندازه گیری

وابسته به نوع اعوجاج ولتاژ ، در مقایسه با تحریک با شکل موج سینوسی خالص ، تلفات بی باری ممکن است کوچکتر یا بزرگتر باشد . ولتاژ تغذیه با استفاده از یک ولتمتر متوسط سنج تنظیم می شود و سپس سایر مقادیر ثبت می شوند . برای تصحیح خطاهای دستگاه و ترانسفورماتورهای اندازه گیری بند ۵ ضمیمهٔ ۵ را ببینید .

تلفات بی باری اندازه گیری شده برای شکل موج سینوسی با استفاده از روابط زیر اصلاح می شود :

مطابق IEC :

$$P_0 = P_{0m} \cdot \left[1 + \left(\frac{\overline{U} \cdot 1{,}11 - U}{\overline{U} \cdot 1{,}11} \right) \right]$$

و مطابق IEEE :

$$P_0 = \frac{P_{0m}}{P_1 + P_2 \cdot \left(\frac{U}{\overline{U} \cdot 1{,}11} \right)^2}$$

به طور کلی IEEE لازم می داند که تلفات بی باری در دمای متوسط روغن ۲۰ °C (دمای متوسط آهن) ارائه شود ، بخش ۶- ۳- ۲ را ببینید .

مقدار مؤثر جریان اندازه گیری شده در تست بی باری ، جریان بی باری نام دارد . معمولاً جریان بی باری نسبت به جریان نامی سیم پیچ تحریک شده بیان می شود . برای ترانسفورماتورهای سه فاز میانگین سه فاز استفاده می شود .

تصحیح مربوط به دستگاه و ترانسفورماتورهای اندازه گیری در تست بی باری نیز انجام می شود (بند ۵ ضمیمهٔ ۵ را ببینید) . اثر خطاهای دستگاههای اندازه گیری در تست بی باری نسبت به اثر آن در اندازه گیری های مربوط به تست بار کوچکتر است ، چون $\cos \varphi_0 = R_{Fe} / Z$ بزرگتر است .

۶- ۷   عدم قطعیت اندازه گیری

ترانسفورماتورهای ولتاژ و جریان ، همچنین دستگاههای اندازه گیری باید برای شرایط خاص تست بی باری مناسب باشند (یعنی پاسخ فرکانسی باید در حدود Hz ۱۰۰۰ باشد تا اعوجاج های جریان و ولتاژ به صورت مناسب اندازه گیری شود) .

حداکثر مقادیر مجاز عدم قطعیت به شرح زیر است :

- پایداری فرکانس منبع تغذیه
  % ۰/۵ ± حول فرکانس نامی (شرط IEEE)
- سیستم اندازه گیری ولتاژ
  %۰/۱ ± برای محدودهٔ فرکانسی ۵۰ تا Hz ۱۰۰۰
- سیستم اندازه گیری تلفات بی باری
  % ۰/۵ ≥ برای ضریب توان ۰/۵ و محدودهٔ فرکانسی ۵۰ تا Hz ۱۰۰۰

ترانسفورماتورهای ولتاژ و جریان کلاسیک در بار واقعی خود و بین ۸۰ تا ۱۲۰% مقدار نامی باید دارای کوچکترین خطای ممکن دامنه و زاویهٔ فاز باشند (با توجه به نتایج کالیبراسیون ترانسفورماتور اندازه گیری) .

بایستی کنترل شود که دستگاههای اندازه گیری پاسخ فرکانسی مناسبی داشته باشند . در انتخاب محدودهٔ اندازه گیری نیز باید مقادیر پیک در نظر گرفته شود . قبل از خرید تجهیزات اندازه گیری پیشرفتهٔ تلفات شامل مقسم های خازنی ولتاژ ، ترانسفورماتورهای جریان شار صفر و پاورآنالایزر ویژهٔ ترانسفورماتور نیز باید دقّت های فوق به عمل آید .

ضمیمة ۶ :

اندازه گیری تلفات بی باری و جریان بی باری

ضمیمة ۶- ۱ مشخّصات تجهیزات اندازه گیری

با اینکه ضرایب توان برای تست بی باری به طور کلی از ضرایب توان برای اندازه گیری های تلفات بار بزرگتر است ، روش سه واتمتری به روش دو واتمتری ترجیح داده می شود.

به ویژه برای ترانسفورماتورهای سه فاز بزرگ که اختلاف قابل توجهی در توان های ورودی سه فاز بدلیل نامتقارن بودن هسته پیش می آید باید از روش سه واتمتری استفاده شود تا بتوان تصحیح های مربوط به خطای دستگاههای اندازه گیری را اعمال کرد (بخش ۵ را ببینید) . از سوی دیگر ، برای ترانسفورماتورهای کوچک و متوسط روش دو واتمتری می تواند گزینة دیگری باشد .

IEC 60076-1 بند 10.1 [1]

به طور کلی دستگاههای اندازه گیری باید دارای عدم قطعیت اندازه گیری قابل سنجش و ردیابی بوده و طبق مقررات ISO 9001 به طور مرتّب کالیبره شوند . دستوالعمل های ویژه برای اندازه گیری تلفات بار در IEC 60076-8 [6] (cl.10"Guide to the measurement of losses in power transformers") ارائه شده است .

IEEE Std C57.12.90 بند 8 [51]

فرکانس تغذیه برای اندازه گیری تلفات باید در محدودة ۰/۵% حول فرکانس نامی باشد . برای ترانسفورماتورهای سه فاز میانگین ولتاژهای سه فاز مقدار صحیح می باشد .

برای اندازه گیری تلفات بی باری ترانسفورماتورهای سه فاز از روش دو واتمتری نباید استفاده شود .

ضمیمة ۶- ۲ تعیین مؤلفه های تلفات جریان های گردابی و هیسترزیس

اگر مقادیر P_1 و P_2 (بخش ۶- ۳- ۴) به هر دلیلی به نحو قابل اعتمادی معلوم نشوند ، به صورت تجربی با استفاده از دو روش قابل تعیین هستند :

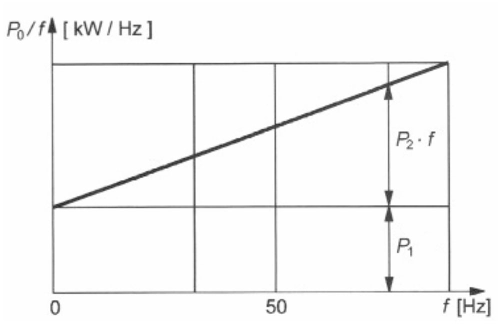
الف) روش فرکانسی

این روش بر اساس رابطة زیر بنا نهاده شده است :

$$P_0 = P_h + P_w = P_1 \cdot f + P_2 \cdot f^2$$

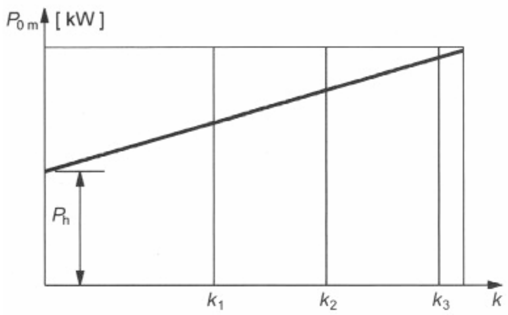
تقسیم بر f نتیجه می دهد :

$$\frac{P_0}{f} = P_1 + P_2 \cdot f \quad \text{برای} \quad \hat{B} = \text{ثابت}$$



$P_1 + P_2 \cdot f$ = P_0/f
تلفات بی باری = P_0
تلفات هیسترزیس = P_1
تلفات جریان گردابی = P_2

شکل ۶- ۱۶ : جداسازی تلفات بی باری ؛ روش فرکانس



تلفات بی باری اندازه گیری شده = P_{0m}
تلفات هیسترزیس = P_h
ضریب فرم $k = k_f / 1{,}11$ = $K_{1,2,3}$

شکل ۶- ۱۷ : جداسازی تلفات بی باری ؛ روش ضریب فرم

تلفات بی باری در میزان القای یکسان برای دست کم دو فرکانس با ولتاژ اعوجاج نیافته اندازه گیری می شود . اندازه ها بعد از محاسبة مجدد با استفاده از رابطة بالا روی یک نمودار وارد می گردد ، شکل ۶- ۱۵ را ببینید .

مؤلفة تلفات P_1 ، بوسیلة برون یابی تا $f = 0$ تعیین می شود و ادامة محاسبات، مؤلفة $P_2 \cdot f$ را بدست می دهد . بنابراین مؤلفه های تلفات را در هر فرکانسی می توان تعیین کرد . برای این روش شکل موج ها باید کاملاً سینوسی باشند تا مؤلفه های P_1 و P_2 با تحریک سینوسی تعیین شوند . بنابراین بدلیل پیش آمدن مکرر اعوجاج ، این روش در هر آزمایشگاهی قابل استفاده نیست .

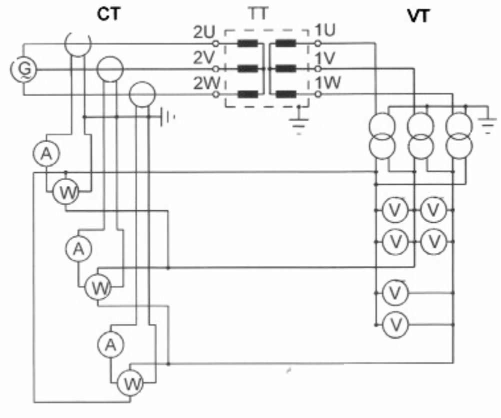
ب) روش ضریب فرم

روش ضریب فرم محدودیت بالا را ندارد . برعکس ، این روش از اثر اعوجاج ولتاژ برای تعیین مولفه های P_1 و P_2 استفاده می کند .

با شروع از رابطة بالا

$$P_{0m} = P_h + P_w \cdot k \qquad k = \left(\frac{k_f}{1{,}11}\right)^2$$

تلفات بی باری در ماکزیمم چگالی شار و ضرایب مختلف k بوسیلة تغییر اتّصالات ژنراتور و ترانسفورماتور واسطه اندازه گیری می شود و روی نمودار وارد می گردد ، شکل ۶- ۱۷ را ببینید . مؤلفه های تلفات هیسترزیس در حالت $k = 0$ حاصل می شود . مقدار باقی مانده ، مؤلفة تلفات جریان گردابی را تشکیل می دهد . تعریف k_f در بند ۶- ۳- ۴ ارائه شده است .



شکل ۶- ۱۸ : اتّصالات تست بی باری برای ترانسفورماتورهای راه انداز با فاصلة هوایی

ضمیمة ۶- ۳ اندازه گیری های اولیة هستة آهنی

برای طرح های جدید ، پروسه های متفاوت تولید یا پس از تعمیر ، اندازه گیری های اولیه در هستة آهنی کامل شده (با یوغ بالا) انجام می شود .

به این منظور یک سیم پیچ کمکی روی هستة آهنی سوار می شود . این سیم پیچ که می توان آن را از کابل های قابل انعطاف پیچیده شده اطراف هسته ساخت ، باید به طور یکنواخت توزیع شود و حداقل ۸۰ % ارتفاع ساق را بپوشاند تا القایی یکنواخت در طول ساق ایجاد نماید . برای هستة سه فاز ، سه سیم پیچ به صورت مثلث متّصل می شوند .

برای تعیین مشخّصات این سیم پیچ از برگه های محاسبه یا پلاک مشخّصات ترانسفورماتور استفاده می شود . تعداد دور و سطح مقطع بهینه (برای مثال با در نظر گرفتن ۱۲۰ % اضافه تحریک) بر مبنای منبع تغذیة آزمایشگاه ، ولت بر دور سیم پیچ در چگالی شار نامی یا ولتاژ نامی و توان بی باری ظاهری تعیین می شود . همچنین باید سیم پیچ کمکی برای ماکزیمم ولتاژ نسبت به هسته عایق بندی شود .

POWEREN.IR

با مقایسهٔ مقادیر اپشتاین (Epstein) (برای کیفیت فولاد) و مقادیر اندازه گیری شده برای هستهٔ آهنی تأثیرات فرآیند تولید ورق مشخّص می شود . بدین ترتیب متوسط کیفیت کل مقدار فولاد مصرفی تعیین می گردد . بعلاوه ، مقایسهٔ مقادیر اندازه گیری شده از ترانسفورماتور کامل شده با نتایج بدست آمده برای هستهٔ آهنی اطلاعاتی دربارهٔ افزایش تلفات ناشی از هسته چینی یوغ بالا که پس از مونتاژ سیم پیچ ها انجام شده است بدست می دهد .

ضمیمهٔ ۶- ۴ مدارهای اندازه گیری ویژه

ضمیمهٔ ۶- ۴- ۱ ترانسفورماتورهای راه انداز

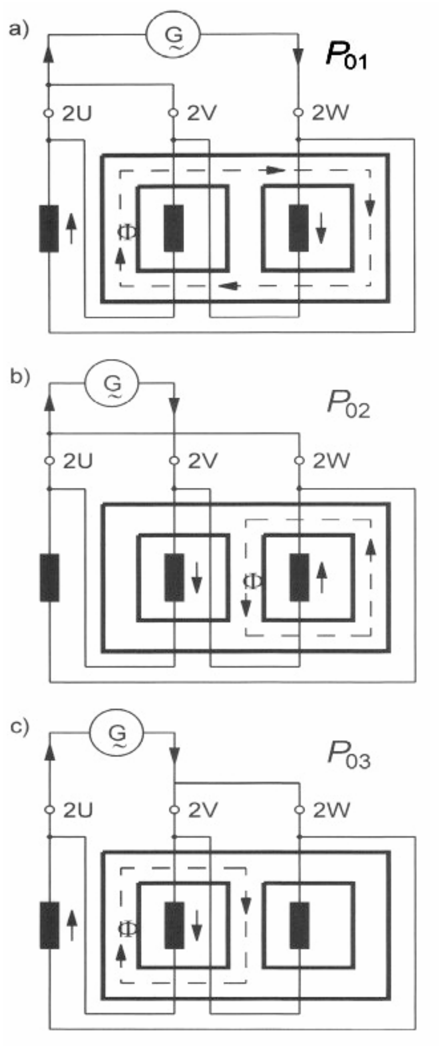
برای ترانسفورماتورهای راه انداز (starting) با فاصلهٔ هوایی ، هسته های رئاکتور با فاصلهٔ هوایی کوچک ، همچنین ترانسفورماتورهای با سیم پیچ هایی مخصوص بهره برداری کوتاه مدت ، تلفات سیم پیچ ناشی از جریان بی باری دیگر کم اهمیت نیست ؛ حتی افت ولتاژ ممکن است قابل چشم پوشی نباشد ، شکل ۶- ۲ را ببینید . برای چنین موردی ، مدار اندازه گیری نشان داده شدّه در شکل ۶- ۱۸ به کار می رود . جریان ها در سمت تغذیه و ولتاژها در سمت ثانویه اندازه گیری می شوند . برای محاسبهٔ ولتاژ اصلی از نسبت تبدیل مربوطه استفاده می شود .

ضمیمهٔ ۶- ۴- ۲ اندازه گیری تلفات بی باری به صورت تک فاز برای ترانسفورماتورهای سه فاز

برای تست های عیب یابی ، تعیین تلفات بی باری با استفاده از تحریک تک فاز ممکن است مفید باشد . شکل ۶- ۱۹ سه نوع اتّصال و نحوهٔ تقسیم شار در هسته را نشان می دهد .

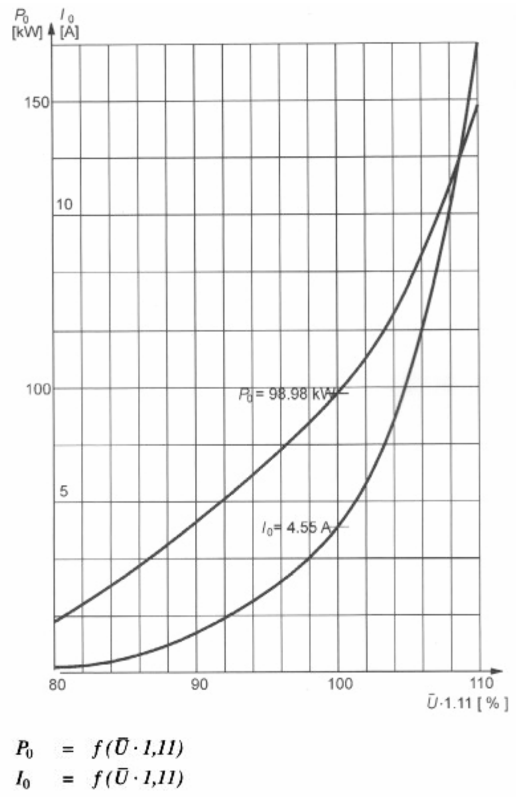
$$P_0' = \frac{P_{01} + P_{02} + P_{03}}{2}$$

این مقدار تقریباً با تلفات بی باری اندازه گیری شده با تحریک سه فاز انطباق دارد .



$P_{01,02,03}$ = مقادیر اندازه گیری شده

شکل ۶- ۱۹ : اتّصالات تست بی باری تک فاز برای ترانسفورماتورهای سه فاز ؛ تست عیب یابی



شکل ۶- ۲۰ : جریان و تلفات بی باری به صورت تابعی از متوسط ولتاژ

ضمیمة ۶- ۵ مثال

ترانسفورماتور سه فاز تنظیم ولتاژ ، مطابق IEC :

توان : ۱۴۶/۵ / ۱۴۶/۵ / ۴۰ MVA

فرکانس : ۵۰ Hz

ولتاژ : ۲۵۰ ± ۱۲ * ۳/۲ / ۱۶۵ / ۲۴ kV

گروه برداری : YNyn0d5

جریان : ۲۹۲ . . . ۳۳۸ . . . ۴۰۲ / ۵۱۳ / ۹۶۲ A

سیم پیچ فشار ضعیف با ۱۱۰ ، ۱۰۰ ، ۹۰ و ۸۰ % ولتاژ نامی در طی تست پذیرش تغذیه شده است .
مقادیر زیر در ۱۰۰ % ولتاژ نامی از روی گزارش آزمایش ثبت شده است .

$\bar{U}$.1,11 kV	U^* kV	I_{L1} A	I_{L2} A	I_{L3} A	I_0 A	P_{L1} kW	P_{L2} kW	P_{L3} kW	P_{0m} kW	P_0 kW
۲۴	۲۴/۳۳	۵/۵۶	۴/۰۵	۳/۷۹	۴/۴۷	۴۳/۵۲	۴۲	۱۴/۸۴	۱۰۰/۳۶	۹۸/۹۸

* میانگین سه ولتاژ

مقادیر تعیین شده به این روش برای ۱۱۰ ، ۱۰۰ ، ۹۰ و ۸۰ % ولتاژ نـامی در منحنـی شـکل ۶- ۲۰ وارد شده و مقدار واقعی از طریق درون یابی به دست آمده است .

از منحنی شکل ۶- ۲۰ مقدار ۲۴ kV = ۱/۱۱. $\bar{U}$ منطبق بر ۱۰۰ % ولتاژ نامی یافتـه شـده اسـت ، P_0 = ۹۸/۹۸ kW و I_0 = ۴/۵۵ A .

توان نامی ظاهری عبارت است از :

S_0 = ۴/۵۵ * ۲۴ * √۳ = ۱۸۹/۱۴ kVA

جریان بی باری نسبی بر مبنای ۱۴۶/۵ MVA عبارت است از :

$$I_0 = \frac{I_{0m}}{I_{rLV}} \cdot \frac{S_{rLV}}{S_{rHV}} = \frac{4{,}55}{962} \cdot \frac{40}{146{,}5} \cdot 100 = 0{,}129\%$$

ضریب توان عبارت است از :

$$\cos \varphi_0 = \frac{P_0}{S_0} = \frac{98{,}98}{189{,}14} = 0{,}52$$

۶- اندازه گیری تلفات بی باری و جریان بی باری

تست ترانسفورماتورهای قدرت

۷- تست ولتاژ استقامت AC با منبع جداگانه یا تست ولتاژ اعمالی

۷- ۱ مراجع/ استانداردها

- IEC 60076 (2000) , clause : 11,
  "Separate source AC withstand voltage test " [3]
- IEEE C57.12.90-1999 , clause 10.6:
  "Applied-voltage tests" [51]
- IEEE C57.12.00-2000 , clause 5.10 : "Insulation levels" [50]

توجه :

تست استقامت AC با منبع جداگانه یا تست ولتاژ اعمالی مطابق استاندارد IEC [1] و استاندارد IEEE [50] **تست روتین** محسوب می شود .

۷- ۲ منظور از تست

منظور از تست استقامت AC با منبع جداگانه یا تست ولتاژ اعمالی (مطابق IEEE) تأیید درستی عایق بندی اصلی می باشد . عایق بندی اصلی فقط سیستم عایق بندی بین دو سیم پیچ نمی باشد ، بلکه- معمولاً- عایق بندی بین سیم پیچ و زمین و نیز عایق بندی سیم بندی (اتصالات خارج از سیم پیچ) را نسبت به زمین و نسبت به همدیگر شامل می شود .

۷- ۳ کلّیات

یک منبع AC از بیرون ، ولتاژ را به ترانسفورماتور اعمال می کند و بنابراین از نام " تست ولتاژ اعمالی" استفاده می شود . در این تست ترانسفورماتور مغناطیس نمی شود در حالیکه در تست ولتاژ القایی این عمل انجام می گیرد ، بخش ۸ را ببینید .

برای ترانسفورماتور های با عایق بندی یکنواخت ولتاژ تست U_p از روی سطح عایق بندی سیم پیچ ترانسفورماتور تعیین می شود . تمام قسمت های سیم پیچ ، ولتاژ تست یکسان U_p ، بین سیم پیچ و زمین را تحمل می کنند .

برای عایق بندی غیر یکنواخت ، ولتاژ تست U_p ، مربوط به سطح عایق بندی ترمینالی از سیم پیچ است که کمترین میزان عایق بندی را دارد ؛ این ترمینال معمولاً ترمینال نوترال است .

مقدار r.m.s ولتاژ تست U_p بر حسب kV مطابق IEC در جدول ۲ ، ۳ و ۴ از استاندارد ارجاع داده شده در بالا [3] و مطابق IEEE در جدول ۵ ، ۶ ، ۷ و ۸ از IEEE C57.12.00-2000 [50] داده شده است .

ولتاژ تست باید با استفاده از پیک ولتمتری که روی $U_{Peak}/\sqrt{2}$ تنظیم شده است، اندازه گیری شود .

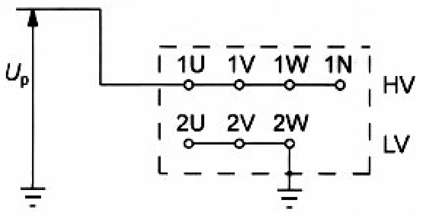
در صورت تکرار تست معمولاً ولتاژ به صورت کاهش یافته اعمال می شود ، بخش ۲ را ببینید .

۷- ۴ اصول و مدار اندازه گیری

۷- ۴- ۱ اصول

تست ولتاژ اعمالی بر خلاف تست ولتاژ القایی که به فرکانس تست بالایی نیاز دارد ، با فرکانس نامی انجام می شود ؛ بخش ۸ را ببینید .

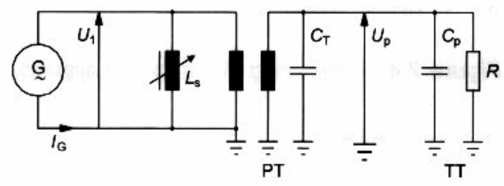
اصول تست در شکل ۷- ۱ نشان داده شده است :



شکل ۷- ۱ : مدار تست ولتاژ اعمالی ترانسفورماتور سه فاز

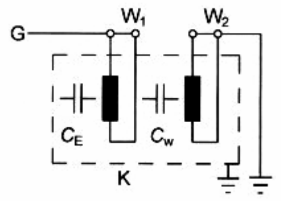
مدار معادل ترانسفورماتور مورد آزمایش برای تست ولتاژ اعمالی ، از یک $R-C$ موازی مرکّب از خازن مؤثر C_p و مقاومت R که مربوط به تلفات دی الکتریک ترانسفورماتور تحت تست می باشد ، تشکیل شده است . خازن مؤثر از ظرفیت خازنی بین سیم پیچ تحت تست و زمین (C_E) (شامل خازن بوشینگ) یا بین این سیم پیچ و سایر سیم پیچ ها (C_W) تشکیل می شود ؛ شکل ۷- ۲ و ۷- ۳ را ببینید.

برای محاسبات بار خازنی و ملزومات جبران سازی ، بند ۱ ضمیمهٔ ۷ را ببینید .



G = منبع ولتاژ
PT = ترانسفورماتور واسط (تک فاز)
L_S = رئاکتور جبران کننده (ثابت یا متغیر)
C_pR = ظرفیت خازنی و مقاومت اهمی ترانسفورماتور مورد آزمایش
U_1 = ولتاژ اولیه
U_p = ولتاژ تست
TT = ترانسفورماتور مورد آزمایش

شکل ۷- ۲ : مدار اندازه گیری ساده شده



W_1 = سیم پیچ تحت تست
W_2 = سیم پیچ زمین شده
K = مخزن ترانسفورماتور
C_E = *ظرفیت خازنی نسبت به زمین*
C_W = *ظرفیت خازنی بین سیم پیچ ها*
G = منبع ولتاژ

شکل ۷- ۳ : ظرفیت خازنی ترانسفورماتور مورد آزمایش در تست ولتاژ اعمالی

۷- ۴- ۲ مدار اندازه گیری

مدار اندازه گیری برای تست آزمایشگاهی در شکل ۷- ۴ نشان داده شده است .

برای الزامات تجهیزات اندازه گیری ، بند ۲ ضمیمهٔ ۷ را ببینید .

۷- ۵ روش اندازه گیری

۷- ۵- ۱ آماده سازی ها

قبل از شروع تست ولتاژ اعمالی ، باید مطمئن باشیم که سطح عایق بندی تمام سیم پیچ برای ولتاژ تست U_p طراحی شده است (ترانسفورماتور با عایق بندی یکنواخت) . برای ترانسفورماتور های با عایق بندی غیر یکنواخت تست ولتاژ اعمالی فقط با سطح ولتاژ مربوط به عایق بندی نوترال ترانسفورماتور انجام می شود .

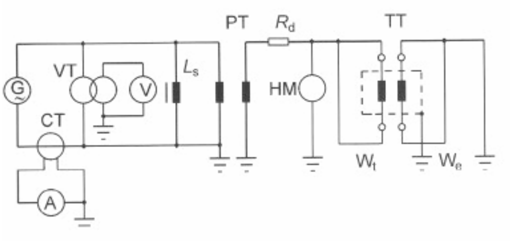
رلهٔ بوخهلتس و همهٔ بوشینگ ها و متعلقات آنها قبل از تست باید هواگیری شود ؛ برق گیرها و جرقه گیرهای بوشینگ باید برداشته شوند . سیم پیچ های ثانویه ترانسفورماتورهای جریان باید اتصال کوتاه و زمین باشند .

استفاده از الکترودهایی مثل گوی یا کلاهک های کروناگیر بر روی ترمینال خارجی بوشینگ ها برای افزایش استقامت الکتریکی خارجی مجاز است چون هدف از تست ولتاژ اعمالی تأیید استقامت الکتریکی داخلی ترانسفورماتور است . برای مثال هنگام تست ترانسفورماتورهای تنظیم ولتاژ سری اگر لازم باشد اندازه گیری تخلیهٔ جزئی همراه با تست ولتاژ اعمالی انجام شود حتماً باید از الکترودهای خارجی مناسب استفاده کنیم ؛ بخش ۹ را ببینید .

برای جلوگیری از اضافه ولتاژهای خطرناک ممکن است در مدار تغذیه یا بین ترمینال فشار قوی و زمین از جفت گوی استفاده شود . جفت گوی حفاظتی باید طوری تنظیم شود که در حدود ۵۰% موارد در ولتاژ تست ، جرقه (flashover) ایجاد شود . هنگامی که از عدم وجود خطر خود تحریکی مطمئن باشیم ، گوی را می توان برداشت ؛ بند ۱ ضمیمة ۷ را ببینید .

عموماً تست در دمای محیط انجام می شود اما دما نباید کمتر از ۱۰ °C باشد [3] .

ولتاژ تست مستقیماً (از طریق R_d) به بوشینگ های ترانسفورماتور مورد آزمایش اعمال می شود . باید سایر سیم پیچ ها و مخزن در حین تست زمین باشد ؛ شکل ۷- ۱ را ببینید.



G = منبع ولتاژ متغیر
L_S = رئاکتور جبران کننده (ثابت یا متغیر)
PT = ترانسفورماتور واسط (تک فاز)
HM = تجهیزات اندازه گیری HV
TT = ترانسفورماتور مورد آزمایش
VT = ترانسفورماتور ولتاژ به همراه ولت متر برای کنترل ولتاژ اولیه U_1
CT = ترانسفورماتور جریان به همراه آمپرمتر برای اندازه گیری جریان ژنراتور I_G
R_d = مقاومت میرا کننده
W_t = سیم پیچ تحت تست
W_e = سیم پیچ زمین شده

شکل ۷- ۴ : مدار اندازه گیری برای تست ولتاژ اعمالی

تنظیم جبران سازی (در صورت وجود)

در حالیکه رئاکتور متغیر روی کمترین اندوکتانس تنظیم شده است ، ولتاژ تا حدود ۲۵% دامنة ولتاژ تست افزایش داده می شود . سپس اندوکتانس رئاکتور افزایش داده می شود ، تا زمانیکه جریان اولیة I_G در کمترین مقدار آن برقرار شود .

۷- ۵- ۲ نحوة اعمال ولتاژ تست ؛ مدت زمان تست ؛ فرکانس تست

ولتاژ باید سریعاً از ۲۵% یا کمتر از آن تا ولتاژ تست U_P افزایش یابد ، ولی لازم است اندازه گیری آن در حال تغییر ولتاژ نیز ممکن باشد . این زمان افزایش طبق استاندارد IEEE ، ۱۵ ثانیه است . ولتاژ در پایان تست باید سریعاً (برای مثال در طی حدوداً ۵ ثانیه) کاهش یابد [51] .

مدت زمان اعمال ولتاژ تست ۶۰ ثانیه می باشد .

فرکانس تست برابر با فرکانس نامی توان می باشد . IEC فرکانس های بیشتر از ۸۰ % فرکانس نامی را مجاز می داند [3] . برای ترانسفورماتورهای استفاده شده در خطوط آهن با فرکانس نامی ۱۶/۷ Hz معمولاً فرکانس تست ۵۰ Hz قابل قبول می باشد .

۷- ۵- ۳ تفسیر تست

تست وقتی موفقیت آمیز است که شکست (افت) ولتاژ روی ندهد یا آثار وقوع قوس از قبیل دود ، حباب و یا افزایش ناگهانی جریان تست وجود نداشته باشد [51] .

اگر در اثر عیب بوشینگ ، تست ترانسفورماتور موفّق نباشد ، می توان بوشینگ را با بوشینگ تست جایگزین کرد و تست را ادامه داد . این حالت همچنین برای حالتی که بوشینگ مورد نظر تخلیة جزئی دارد صادق است [3] .

۷- ۶ عدم قطعیت اندازه گیری

هنگامی که از مقسم ترکیبی یا خازنی همراه با تجهیزات اندازه گیری AC و یا از ترانسفورماتورهای ولتاژ استفاده می شود ، ولتاژ تست را می توان با دقّت حدود ۱% تنظیم کرد .

اگر از جفت گوی برای اندازه گیری استفاده شود ، دقّت اندازه گیری بیشتر از ۳% نیست . در تست با فرکانس توان ، تصحیح افت ولتاژ مقاومت حفاظتی جفت گوی (R_S) لازم نیست ، بخش ۸ را ببینید .

ضمیمه ۷ :
تست ولتاژ اعمالی

ضمیمه ۷- ۱ محاسبات ملزومات جبران سازی بار خازنی

ضمیمه ۷- ۱- ۱ بار خازنی

هنگام محاسبه بار خازنی برای تست ولتاژ اعمالی ، باید ظرفیت سایر خازن های موجود در مدار (مقسم ولتاژ ، خازن ترانسفورماتور واسطه ، غیره) در نظر گرفته شوند .

توان (خازنی) مورد نیاز S_{cap} برای انجام تست از فرمول زیر بدست می آید :

$$S_{cap} = U_p^2 \cdot \omega C_{\text{کل}}$$

که در آن :

$C_{\text{کل}}$ = خازن کل (معادل)

ضمیمه ۷- ۱- ۲ ملزومات جبران سازی

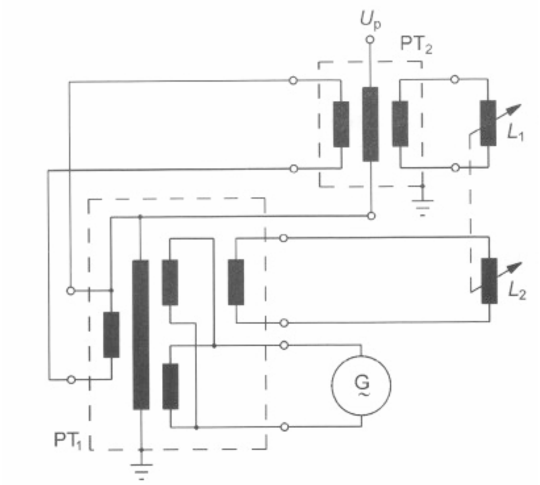
مؤلفة اکتیو توان مورد نیاز متشکّل از تلفات عایقی ترانسفورماتور مورد آزمایش و تلفات ترانسفورماتور واسطه قابل چشم پوشی است . بنابراین در عمل ، بار خازنی خواهد بود .

به همین دلیل (مشابه تست ولتاژ القایی) خطر جدی خود تحریکی ژنراتور تغذیه سنکرون وجود دارد . برای جلوگیری از اینگونه مشکلات معمولاً لازم است که جریان خازنی جبران سازی شود . البته این کار برای آزمایشگاه هایی که از طریق ترانسفورماتور تنظیم کننده (Regulating Transformer) مستقیماً به شبکه وصل هستند لازم نیست .

جبران سازی معمولاً در طرف اولیه ترانسفورماتور واسطه انجام شود . مزیت این کار این است که طراحی سیستم عایق بندی رئاکتور L_S فقط باید برای ولتاژ اولیه U_1 انجام شود و تنظیمات مورد نیاز به آسانی در طول تست انجام می شود .

از لحاظ نظری جبران سازی در طرف فشارقوی ترانسفورماتور واسطه نیز قابل انجام است ، اما رئاکتورهای فشارقوی قابل تنظیم خصوصاً برای ولتاژهای تست در مقادیر زیاد موجود نیستند .

نهایتاً ، روش دیگر ، جبران سازی از طریق سیم پیچ های کمکی ترانسفورماتور واسطه می باشد ، شکل ۷- ۵ را ببینید .



PT_1 = اتصال کاسکاد ترانسفورماتور واسطه ، طبقه ۱
PT_2 = اتصال کاسکاد ترانسفورماتور واسطه ، طبقه ۲
$L_{1.2}$ = رئاکتورهای متغیر
G = منبع ولتاژ
U_P = ولتاژ تست

شکل ۷- ۵ : ترانسفورماتور واسطه ، با سیم پیچ های کمکی

ضمیمة ۷- ۲ الزامات کلّی برای تجهیزات اندازه گیری

ضمیمة ۷- ۲- ۱ منبع ولتاژ

یک منبع AC تک فاز با فرکانس توان صنعتی برای تست ولتاژ اعمالی مورد نیاز است . ولتاژ باید به صورت پیوسته (در صورت امکان بدون پله) قابل تنظیم باشد .

با توجه به ولتاژ و توان مورد نیاز معمولاً از ژنراتورهای سه فاز به صورت تک فاز و یا از ترانسفورماتورهای قابل تنظیم (sliding) استفاده می شود .

الزامات شکل موج (مشخّصات سینوسی) در IEC 60060-1 [21] مشخّص شده است .

ضمیمة ۷- ۲- ۲ ترانسفورماتور واسطه آزمایشگاه

ترانسفورماتور واسطه معمولاً تک فاز (و اکثراً با اتصال کاسکاد) است ، انتهای یکی از سیم پیچ های فشارقوی یا سیم پیچ فشار ضعیف زمین شده است .

مقادیر نامی ترانسفورماتور واسطه به بار بستگی دارد . برای ترانسفورماتورهای قدرت ظرفیت آن چند صد کیلو ولت آمپر است . امپدانس اتصال کوتاه ترانسفورماتور واسطه باید تا حد امکان کم باشد تا افت ولتاژ منفی ΔU ایجاد شده بوسیلة بار خازنی را به حداقل برساند .

$$\Delta U = I_2 \cdot Z_k$$

که در آن :

I_2 = جریان بار در مدار اندازه گیری

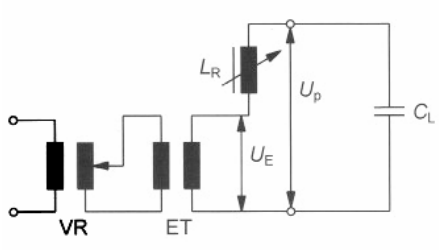
Z_k = امپدانس اتّصال کوتاه ترانسفورماتور واسطه

در برخی از آزمایشگاهها از سیستم های رزونانس سری [200] بجای ترانسفورماتورهای واسطه کلاسیک استفاده می شود . این سیستم مخصوصاً برای تست کابل فشار قوی ، ترانسفورماتور ، بوشینگ و خازن های فشارقوی مناسب است . این سیستم در شکل ۷- ۶ نشان داده شده است .

تنظیم کنندة ولتاژ VR ، ترانسفورماتور تحریک ET را با ولتاژ متغیر تغذیه می کند . ترانسفورماتور تحریک ، مدار رزونانسی متشکّل از رئاکتور متغیر فشار قوی L_R و بار خازنی C_L را تحریک می کند .

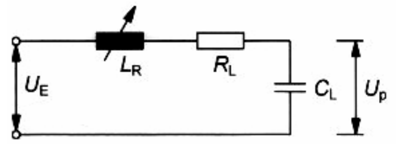
اگر چه خازن C_L عمدتاً مربوط به ظرفیت خازنی ترانسفورماتور مورد آزمایش می باشد اما خازن پراکندگی مدار و خازن مقسم ولتاژ فشار قوی و غیره را نیز شامل می شود . اندوکتانس رئاکتور فشارقوی با تنظیم فاصلة هوایی هسته قابل تغییر است .

برای سیستم رزونانسی ، رئاکتور فشارقوی باید طوری تنظیم شود که امپدانس آن با امپدانس بار خازنی C_L در فرکانس توان برابر باشد ، شکل ۷- ۷ را ببینید .



L_R = رئاکتور HV متغیر
C_L = ظرفیت خازنی بار (ترانسفورماتور مورد آزمایش
U_E = ولتاژ تحریک
U_P = ولتاژ تست
VR = رگولاتور ولتاژ
ET = ترانسفورماتور تحریک

شکل ۷- ۶ : اساس سیستم رزونانس سری



R_L = تلفات رئاکتور HV
L_R = رئاکتور HV
C_L = ظرفیت خازنی بار
U_E = ولتاژ تحریک
U_P = ولتاژ تست

شکل ۷- ۷ : نمودار ساده شدة سیستم رزونانس سری

اگر خازن C_L از نوع کم- تلفات باشد ، چنانکه برای ترانسفورماتورها در تست ولتاژ اعمالی به همین گونه است ، ضریب کیفیت (relative gain) (فاکتور Q) برای ولتاژ مدار رزونانس به صورت زیر محاسبه می شود :

$$Q = \frac{\omega L_R}{R_L} = \frac{1}{\omega C_L \cdot R_L}$$

که در آن :

L_R = اندوکتانس رئاکتور متغیر فشار قوی
R_L = مقاومت اهمی رئاکتور فشارقوی
C_L = بار خازنی

برای نمونه مقدار Q بین ۳۰ و ۱۰۰ می باشد . به این معنی که ولتاژ تحریک U_E به مقدار ۱ تا ۳ % ولتاژ تست U_P برای حفظ رزونانس مدار کافی است . بنابراین سیستم رزونانس با خروجی ۶۰۰ kV به ولتاژ تحریک ۶ تا ۲۰kV نیاز دارد .

ضمیمهٔ ۷- ۲- ۳ تجهیزات اندازه گیری فشارقوی

بدلیل بارگذاری خازنی بوسیلهٔ ترانسفورماتور مورد آزمایش ، جریان حاصل از آن باعث افزایش ولتاژ (افت ولتاژ منفی) بر روی ترانسفورماتور واسطه می شود که بسته به مقدار امپدانس اتّصال کوتاه این ترانسفورماتور ممکن است غیر قابل چشم پوشی باشد . این پدیده خصوصاً در هارمونیک های بالا با اهمیت است زیرا سبب افزایش اعوجاج ولتاژ می شود .

اندازه گیری ولتاژ تست U_P بایستی همیشه در سمت فشار قوی انجام گیرد . در عمل روش های مختلفی برای اندازه گیری وجود دارد :

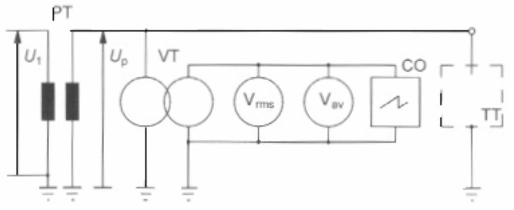
الف) اندازه گیری با ترانسفورماتور ولتاژ

این اندازه گیری خصوصاً برای ترانسفورماتورهای ولتاژ تا ۷۰ kV مناسب می باشد . در صورت استفاده از ترانسفورماتورهای ولتاژ کالیبره شده ،کالیبراسیون مدار اندازه گیری لزومی ندارد ، شکل ۷- ۸ را ببینید .

برای این مدار اندازه گیری ، ولتاژ تست بوسیلهٔ ولتمتر r.m.s سنج کنترل می شود . شکل موج ولتاژ تست U_P را می توان بوسیلهٔ اسیلوسکوپ کنترل و یا فرم فاکتور را با اندازه گیری مقدار متوسط ولتاژ تعیین کرد .

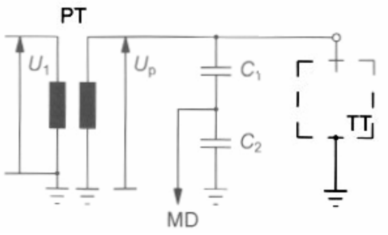
ب) اندازه گیری با استفاده از مقسم ولتاژ فشارقوی و دستگاه اندازه گیری AC

این روش امتحان خود را پس داده است و تا بالاترین ولتاژهای تست قابل استفاده است . قرائت مستقیم مقدار پیک و مقدار r.m.s ولتاژ تست مقدور است . مزیت دیگر این روش دقّت اندازه گیری بالای آن است ، شکل ۷- ۹ را ببینید . مقسم ترکیبی یا خازنی ، ولتاژ تست اندازه گیری شده را کاهش داده و آن را به دستگاه اندازه گیری فشار ضعیف منتقل می کند .



V_{rms}= ولت متر r.m.s سنج
V_{av} = ولت متر متوسط سنج
CO = اسیلوسکوپ
U_P = ولتاژ تست
VT = ترانسفورماتور ولتاژ
PT = ترانسفورماتور واسط
TT = ترانسفورماتور مورد آزمایش

شکل ۷-۸ : اندازه گیری ولتاژ تست با استفاده از ترانسفورماتور ولتاژ



C_1 = خازن فشار قوی
C_2 = خازن اندازه گیری
PT = ترانسفورماتور واسط
TT = ترانسفورماتور مورد آزمایش
MD = دستگاه اندازه گیری

شکل ۷- ۹ : اندازه گیری ولتاژ تست با استفاده از مقسم ولتاژ

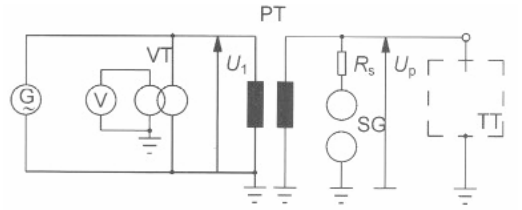
هنگام استفاده از مقسم ولتاژ کالیبره شده ، اندازه گیری به روشی که قبلاً توضیح داده شد (اندازه گیری با ترانسفورماتور ولتاژ) انجام می گیرد . مقدار ولتاژ تست مستقیماً از دستگاه اندازه گیری خوانده می شود . شکل موج را می توان با استفاده از یک اسیلوسکوپ یا مقایسهٔ قرائت های دو ولتمتر ($U_{r.m.s}$ و U پیک $/\sqrt{2}$) کنترل کرد . ولتاژ تست باید توسط پیک- ولتمتر (U پیک $/\sqrt{2}$) تنظیم شود .

پ) اندازه گیری با استفاده از جفت گوی

اگر چه این روش اندازه گیری ، در مقایسه با سایر روش های توضیح داده شده در بالا معایب زیادی دارد ، هنوز هم گهگاه مورد استفاده است ، شکل ۷- ۱۰ را ببینید .

با این روش فقط اندازه گیری غیر مستقیم ممکن است . به این معنی که قبل از هر تست کل مدار با استفاده از جفت گوی کالیبره می شود . در طول تست ، اندازه گیری U_P غیر ممکن است .

مقاومت حفاظتی R_S برای محدود کردن جریان قوس الکتریکی لازم است . مقدار آن حدوداً ۱ Ω/V می باشد ، بند ۵ ضمیمه ۱۰ ، اندازه گیری ولتاژهای ضربه را ببینید .



R_S = مقاومت حفاظتی
SG = جفت گوی
VT = ترانسفورماتور ولتاژ
TT = ترانسفورماتور مورد آزمایش

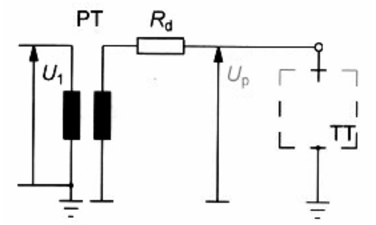
شکل ۷- ۱۰ : اندازه گیری با جفت گوی

ضمیمه ۷- ۲- ۴ مقاومت میرا کنندهٔ R_D

مقاومت میرا کنندهٔ R_D ، منبع تغذیهٔ ولتاژ را در مقابل اضافه ولتاژهای ناشی از شکست الکتریکی احتمالی در مدار ثانویه ، در جفت گوی یا در ترانسفورماتور مورد آزمایش حفاظت می کند . این مقاومت باید در حد امکان کم باشد [21] . بر طبق تجربیات ما مقاومت میرا کننده باید طوری انتخاب شود که با اتّصال کوتاه شدن ترانسفورماتور مورد آزمایش :

- افت ولتاژ دو سر آن بیشتر از ۱۵ % ولتاژ تست U_P نگردد .
- هیچ قوس الکتریکی روی R_D رخ ندهد .
- قابلیت تحمل حرارت ناشی از جریان اتّصال کوتاه احتمالی را داشته باشد ؛ شکل ۷- ۱۱ را ببینید .

برای ترانسفورماتورهای واسطه با امپدانس اتّصال کوتاه نسبتاً بالا و سیستم های تست با رزونانس سری ، استفاده از مقاومت میرا کننده لازم نیست .



R_d = مقاومت میرا کننده

شکل ۷- ۱۱ : مقاومت میرا کننده در مدار ثانویه

ضمیمه ۷- ۲- ۵ ترانسفورماتور ولتاژ UW برای اندازه گیری ولتاژ اولیهٔ U_1

ولتاژ اولیهٔ مورد نیاز U_1 تقریباً با استفاده از نسبت ولتاژ r (نسبت دورها) ترانسفورماتور واسطه به صورت زیر محاسبه می شود :

$$U_1 = \frac{U_P}{r}$$

این مقدار فقط برای کنترل ولتاژ تست استفاده می شود ، زیرا ولتاژ در ترانسفورماتور تحت تست دقیقاً با نسبت ولتاژ r متناسب نیست (بخاطر افزایش ولتاژ ناشی از بار خازنی ، هارمونیک ها و غیره) .

تست ترانسفورماتورهای قدرت

۸- تست ولتاژ القایی

۱-۸ مراجع/ استانداردها

- IEC 60076 (2000) , clause 7.3: "Dielectric tests ",clause 12: "Induced AC voltage tests (ACSD,ACLD)" [3]
- IEEE C57.12.90-1999 , clause 10.7 and 10.8 : " Induced voltage tests" [51]
- IEEE C57.12.00-2000 , clause 5.10: "Insulation levels" [50]

توجّه :

تست ولتاژ القایی مطابق استاندارد IEC [1] و استاندارد IEEE [50] تستی روتین (routine) می باشد؛ برای جزییات بخش ۲ : " صحت عایق بندی " و بند ۸- ۳ را ببینید .

۸- ۲ منظور از تست

تست ولتاژ القایی برای اثبات استقامت الکتریکی AC (withstand strength) هر ترمینال خط و سیم پیچ (های) وصل شده از آن نسبت به زمین یا سایر سیم پیچ ها می باشد؛ همچنین این تست استقامت الکتریکی بین فازها و در طول سیم پیچ (های) مورد آزمایش (عایق بندی- حلقه- به- حلقه) را اثبات می نماید .

۸- ۳ کلیات

چند اختلاف اساسی بین تست های ولتاژ القایی تعیین شده توسط IEC و IEEE وجود دارد. این اختلاف ها در پاراگراف های زیر توضیح داده شده است.

استاندارد **IEC** [3]

استاندارد IEC عمدتاً بین حالات زیر تمایز قائل می شود:

- تست های " AC کوتاه مدت " (ACSD) و " AC بلند مدت " (ACLD)
- تست ترانسفورماتور با عایق بندی یکنواخت یا با عایق بندی غیر یکنواخت
- تست ترانسفورماتور با U_m بالاتر یا پایین تر از ۷۲/۵ kV

جدول ۱(ستون های ۳ ، ۴ و ۵) بخش ۲- ۶- ۱ انواع مختلف تست هایی را که باید انجام شود معین می کند. سه نوع مختلف تست وجود دارد : تست روتین (routine) ، تست تایپ (type) و تست ویژه (special) . در موارد معین ، بسته به بالاترین ولتاژ دستگاه ، تست مشخص شده ای قابل اعمال نیست و نباید انجام شود.

استاندارد تصریح می کند که اندازه گیری همزمان (PD) لازم است ،بخش ۹ ؛ استثنا : ترانسفورماتورهای با U_m کمتر یا مساوی ۷۲/۵ kV .

جداول ۲ ، ۳ و ۴ IEC 60076-3 [3] ، سطوح ولتاژ تست را برای سیم پیچ تعریف شده با بالاترین ولتاژ دستگاه ، U_m معین می کند. برای ترانسفورماتورهای با عایق بندی یکنواخت ، ولتاژ دو سر سیم پیچ بدون تنظیم ولتاژ بایستی در حد امکان مساوی و یا نزدیک به دو برابر ولتاژ نامی باشد [3] .

برای مقدار ولتاژ تست در موارد تکرار تست های دی الکتریک ، بخش ۲- ۶- ۳ را ببینید.

استانداردهای **IEEE** [50] ، [51]

IEEE بین ترانسفورماتورهای دسته **I** (۶۹ kV و پایین تر) و دسته II (۱۱۵ kV و بالاتر) تمایز قائل می شود. برای ترانسفورماتورهای دسته II تست بلند مدت (" سطح یک ساعت") در ترکیب با اندازه گیری تخلیه جزئي همیشه لازم است .

مقادیر ولتاژ تست مطابق IEEE در جدول ۵ و ۷ برای ترانسفورماتورهای دسته I و در جدول ۶ برای ترانسفورماتورهای دسته **II** ارائه شده است. این مقادیر همیشه بر پایه مقادیر BIL می باشد . [50]

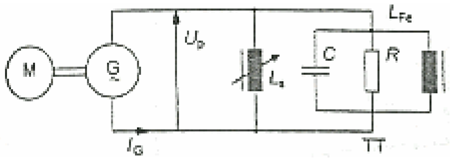
۸- ۴ اصول اولیه و مدار تست

۸- ۴- ۱ اصول اولیه

نظر به اینکه در تست ولتاژ القایی ولتاژ تست اغلب بالاتر از دو برابر ولتاژ نامی است ، برای جلوگیری از اضافه- تحریک هسته آهنی ، فرکانس تست بایستی حداقل دو برابر گردد.

$U = k \cdot f \cdot \hat{\beta}$ (بخش ۶ را ببینید .)

مدار تست ولتاژ القایی در شکل ۸- ۱ نشان داده شده است.



M = موتور محرک
G = ژنراتور فرکانس متوسط (معمولاً با فرکانس متغیر)
L_s = راکتور جبران کننده (در حد امکان متغییر)
TT = ترانسفورماتور مورد آزمایش
C = ظرفیت خازنی معادل TT
R = مقاومت اکتیو
L_{Fe} = اندوکتانس بی باری TT
Up = ولتاژ تست
I_G = جریان ژنراتور

شکل ۸-۱ : مدار ساده شده تست

محاسبه بار در این تست به همراه یک مثال و ملزومات مربوط به جبران سازی (compensation) طی بند۱ضمیمه ۸ ارائه شده است .

برای الزامات تجهیزات اندازه گیری بند ۲ ضمیمه ۸ را ببینید .

جدول ۱ : جمع بندی :
تست ولتاژ القایی برای ترانسفورماتورهای سه- و تک- فاز مطابق استاندارد IEC [3] و IEEE [51]

نوع سیم پیچ	بالاترین ولتاژ دستگاه U_m [kV]	ترانسفورماتورهای سه- فاز			ترانسفور. تک- فاز	
		ACLD	ACSD		ACLD	ACSD
			تست تک فاز فاز-به- زمین	تست سه فاز فاز- به- فاز		تست تک فاز فاز-به- زمین
تست ولتاژ القایی مطابق IEC [3]						
عایق بندی یکنواخت	≤۷۲/۵			o		o
	$۷۲/۵<U_m<۱۷۰$			PD		PD
	$۱۷۰<U_m<۳۰۰$	PD			PD	
	≥۳۰۰	PD			PD	
عایق بندی غیریکنواخت	$۷۲/۵<U_m<۱۷۰$		PD	PD		PD
	$۱۷۰<U_m<۳۰۰$	PD			PD	
	≥۳۰۰	PD			PD	
مدار تست	شکل	۸-۷	۸-۶	۸-۷	۸-۸	۸-۸
تست ولتاژ القایی مطابق IEEE [51]						
دسته I عایق بندی یکنواخت	<۱۱۵			o		o
دسته I عایق بندی غیر یکنواخت			o	o		
دسته II	۱۱۵ و بالاتر	PD			PD	
مدار تست	شکل	۸-۷	۸-۶	۸-۷	۸-۸	۸-۸

علائم: o تست روتین بدون اندازه گیری PD

PD تست روتین با اندازه گیری PD

۸- ۵ فرآیند اندازه گیری

۸- ۵- ۱ آماده سازی برای تست

تست باید پس از سپری شدن مـدت زمـان مناسـب از زمـان روغـن زنـی انجـام شـود . این " زمان ایستایی" به ولتاژ نامی ترانسفورماتور بسـتگی دارد و حـدود ۳ روز بـرای هـر ترانسفورماتور ۲۰۰ kV و ۵ روز برای ترانسفورماتور ۴۰۰ kV است .

رله بوخهولتس و تمام بوشینگ ها بایستی قبل از تست هـواگیری شـود؛ بـرق گیرهـای خارجی و شاخک های جرقه گیر بوشینگ ها باید حذف شود .
سیم پیچ ثانویه ترانسفورماتورهای جریان بوشینگی باید اتصال- کوتاه و زمین شوند .

استفاده از الکترودهایی همچون کره یا کرونارینگ روی سر بوشینگ ها توصیه می شـود، زیرا این تجهیزات استقامت الکتریکی خارجی را ، بویژه در ولتاژهای تست بالا ، به مقـدار زیادی افزایش می دهند. استفاده از این الکترودها یا کره ها بـر روی تمـام بوشـینگ هـا (شامل بوشینگ زمین شده) هنگام اندازه گیری تخلیه جزئی به همراه تست ولتاژ القـایی اجباری می باشد (برای مثال در تست ACLD مطابق IEC [3] یا تست ولتاژ القایی برای ترانسفورماتور های دسته II مطابق IEEE [5]) ، بخش ۹ را ببینید.

۸- ۵- ۲ مدار تست عملی

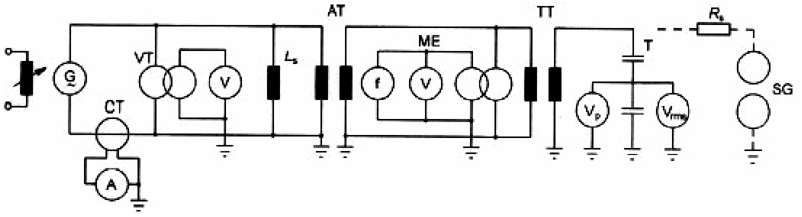
فرآیند اندازه گیری برای تست ولتاژ القایی مطابق جدول ۱ به پارامترهای مختلفی بستگی دارد.

مدار تست قبل از همه به طرح ترانسفورماتور وابسته است. جهـت جلـوگیری از بحـث یـا سوء تفاهم در مورد مدارات تست بهتر است که ایـن مـورد بطـور واضـح در قـرارداد بـین مشتری و سازنده بیان گردد.

قاعده زیر بایستی برای تست ترانسفورماتورهای دارای سیم پیچ تنظیم ولتاژ رعایت گردد:

ولتاژ تست متناسب با سیم پیچی با بالاترین U_m تعیین می شود. اگر نسـبت تبـدیل بـین سیم پیچ ها توسط کلید قابل تغییر باشد، ولتاژ تست برا ی سیم پیچ های با U_m پایین تـر بایستی توسط کلید به نزدیکترین ولتاژ مناسب تنظیم گردد[3] .

مدار تست پایه برای تست ولتاژ القایی در شکل ۸- ۲ نشان داده شده است.



G = ژنراتور فرکانس متوسط (در حد امکان با فرکانس متغیر)
LS = راکتور جبران کننده (در حد امکان متغیر)
AT = ترانسفورماتور تغذیه
ME = تجهیزات اندازه گیری فرکانس و ولتاژ
T = مقسم خازنی یا ترکیبی ولتاژ برای اندازه گیری HV با ولتمتر
SG = جفت گوی با مقاومت حفاظتی
TT = ترانسفورماتور مورد آزمایش
CT = ترانسفورماتور جریان و آمپر متر اندازه گیری
VT = ترانسفورماتور ولتاژ و ولتمتر برای اندازه گیری ولتاژ ژنراتور
VP = ولتمتر (۲√ / پیک)

شکل ۸-۲ : مدار پایه برای تست ولتاژ القایی

۸- ۵ – ۳ نکات مهم در رابطه با روال تست IEC [3]

الف) تمام ترانسفورماتورهای سه- فاز با عایق بندی یکنواخت بایستی با استفاده از منبع تغذیه سه- فاز متقارن تست ACSD (تست فاز-به- فاز) شوند. اگر ترانسفورماتور دارای نوترال باشد، این ترمینال بایستی هنگام تست زمین شود.

ب) برای ترانسفورماتورهای با U_m > ۷۲/۵ kV، در طی تست ولتاژ القایی ، اندازه گیری PD اجباری است ، برای U_m < ۷۲/۵ kV معمولاً نیازی به اندازه گیر یPDs نیست ، بخش ۹ را ببینید.

پ) برای ترانسفورماتورهای با U_m > ۷۲/۵ kV، هنگام انجام تست ACSD فاز- به- فاز با اندازه گیری PD ، نمودار ولتاژ- توالی زمانی بایستی مطابق شکل ۸-۳ باشد ، همچنین بخش ۹ را ببینید.

ت) طی تست ACSD برای ترانسفورماتورهای دارای سیم پیچ HV با عایق بندی غیر یکنواخت ، ولتاژهای اعمالی فاز- به – زمین هستند.

ث) تست ACSD برای ترانسفورماتورهای دارای سیم پیچ HV با عایق بندی غیر یکنواخت :

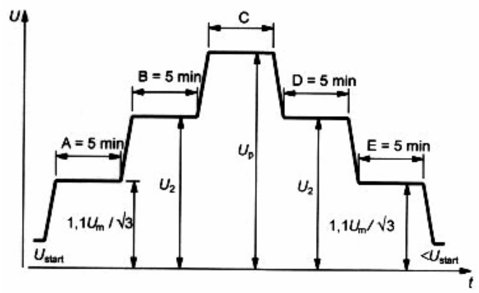
دو مجموعه تست ACSD برای ترانسفورماتورهای سه فاز لازم است که عبارتند از :

- یک تست فاز- به- زمین با ولتاژ ایستادگی نامی (rated withstand voltage) بین فاز و زمین مطابق جدول ۲ ، ۳ و ۴ از IEC 60076-3 [3] همراه با اندازه گیری تخلیه جزئي. این تست به صورت سه تست تک- فاز انجام می شود . مدارات تست مطابق شکل ۸- ۶ می باشد .
- یک تست فاز- به- فاز با نوترال زمین شده تحت ولتاژ ایستادگی نامی بین فازها مطابق جداول ۲ ، ۳ و ۴ از IEC 60076-3 [3] . این تست به صورت سه- فاز (مطابق توضیحات بند پ فوق) انجام می شود. مدارات تست مطابق شکل ۸ – ۷ می باشد.

برای ترانسفورماتورهای تک- فاز تنها انجام تست فاز- به- زمین لازم است. مدارات تست مطابق شکل ۸- ۸ می باشد.

ج) تست ACLD برای سیم پیچ HV با عایق بندی غیر یکنواخت و / یا یکنواخت:

- تست بایستی با مداری مشابه حالت بهره برداری انجام گیرد ؛ این به معنی مدار سه فاز متقارن برای ترانسفورماتورهای سه- فاز است.
- توالی زمانی بایستی مطابق شکل ۸- ۴ باشد ، همچنین بخش ۹ را ببینید.

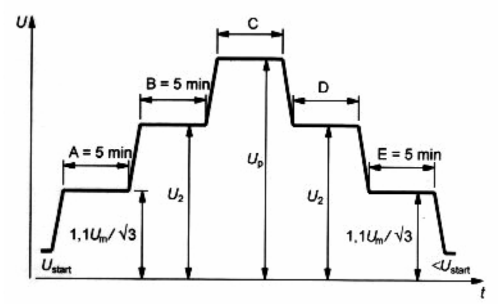


C = زمان تست مطابق بند ۸- ۵- ۸

U_2 = (فاز به فاز) 1.3 U_m / √3

= (فاز به زمین) 1.3 U_m / √3

شکل ۸- ۳ : توالی زمانی ولتاژ القایی برای تست ACSD



C = مدت زمان تست مطابق بند ۸- ۵- ۸

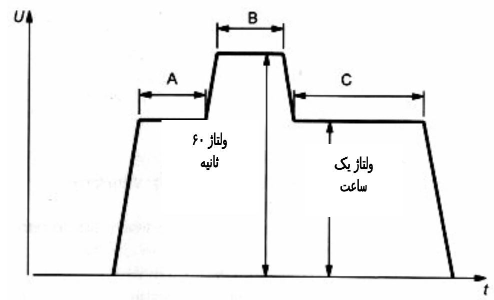
D = 30min برای U_m<300kV یا

60min برای U_m >300kV

U_2 = (فاز به زمین) 1.5 U_m / √3

U_D = (فاز به زمین) 1.7 U_m / √3

شکل ۸-۴: توالی زمانی ولتاژ القایی برای تست ACLD



A = زمان لازم برای اندازه گیری PD

B = ۷۲۰۰ سیکل

C = ۶۰ دقیقه

شکل ۸-۵ : توالی زمانی برای تست ولتاژ القایی ترانسفورماتورهای کلاس II

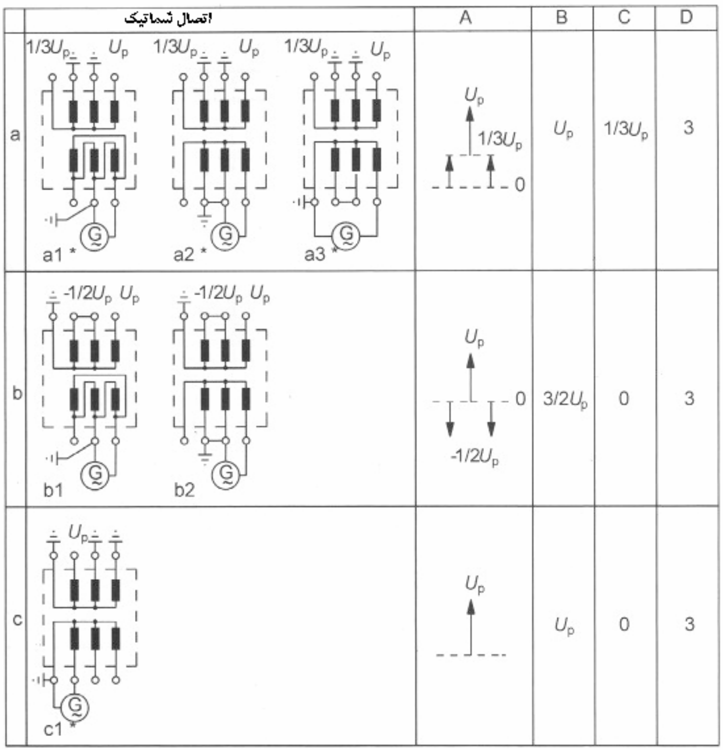
۸- ۵- ۴ نکات مهم در رابطه با روال تست IEEE [50] ,[51]

الف) ترانسفورماتورهای دسته I (HV ≤ ۶۹ kV)

- بر طبق ستون ۶ جدول ۵ از IEEE Std C57.12.00 [50] ، ولتاژی نسبت به زمین (و نه ضرورتاً نسبت به نوترال) بایستی سر هریک از ترمینال های ترانسفورماتور ایجاد شود . این وضعیت ممکن است با استفاده از تست ولتاژ اعمالی (مطابق بخش ۷) برا ی سیم پیچ های با عایق بندی یکنواخت یا با تست ولتاژ القایی تک فاز برای سیم پیچ های با عایق بندی غیر یکنواخت فراهم گردد.
- بر طبق ستون ۶ جدول ۵ ، یا ستون ۲ جدول۷ از IEEE Std C57.12.00 [50] ، ولتاژی فاز- به- فاز بایستی بین ترمینال های خط هر ترانسفورماتور سه- فاز واقع شود .

ب) ترانسفورماتورهای دسته II (HV ≥ ۱۱۵ kV)

- تست بایستی با مدار مشابه حالت بهره برداری انجام گردد . این به معنی تست ترانسفورماتور سه- فاز با تغذیه سه- فاز متقارن با نوترال زمین شده (در صورت وجود) است.
- توالی تست در شکل ۸- ۵ نشان داده شده است.
- در مورد اندازه گیری تخلیه جزئی ، بخش ۹ را ببینید.



A = نمودار برداری
B = ولتاژ بین فازها
C = ولتاژ روی نوترال HV
D = تعداد تست ها

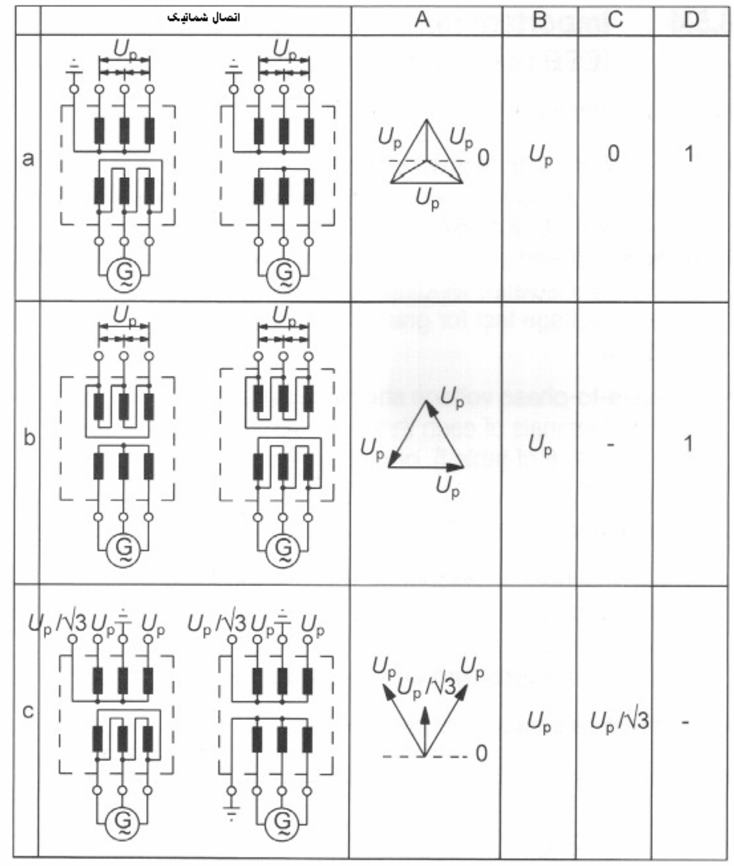
توجه ۱ : مدارهای a1 ، a2 و a3 فقط در صورت طراحی نوترال برای ایستادگی تا 1/3 ولتاژ تست قابل استفاده است.

توجه ۲: برای ترانسفورماتورهای ۵ ستونه یا shell-type فقط استفاده از مدار a1 ممکن است.

توجه ۳: مدرات b در صورت انجام سه تست تک- فاز برا ی سه فاز در تست ACLD مطابق IEC [3] کاربرد دارد.

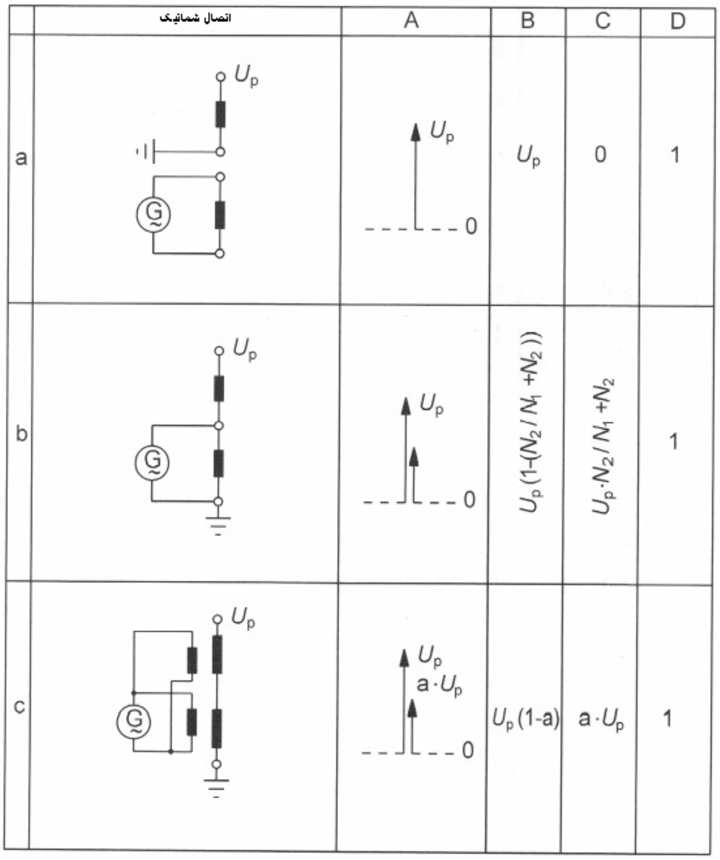
توجه ۴: مدار C فقط هنگامی قابل استفاده است که ترانسفورماتور ستون اضافه ای برا ی برگشت شار مغناطیسی تولید شده در ستون تحت آزمایش داشته باشد(ساختمان ۵ ستونه) ؛ در صورت وجود سیم پیچی با اتصال مثلث ، لازم است اتصال آن در طی آزمایش باز شده باشد.

شکل ۸ -۶ : مثال هایی از مدارات تک-فاز تست ترانسفورماتورهای سه فاز برای جلوگیری از اعمال اضافه ولتاژ غیر مجاز بین ترمینال های خط [3] , [100]



A = نمودار فازروری
B = ولتاژ بین فازها
C = ولتاژ نوترال HV
D = تعداد تست ها

شکل ۸- ۷ : مثال هاي مدارات تست سه فاز [100]



A = نمودار برداری
B = ولتاژ بین فازها
C = ولتاژ نوترال HV
D = تعداد تست ها
N1 = تعداد دور سیم پیچ HV
N2 = تعداد دور سیم پیچ LV

شکل ۸- ۸ : مثال های مدارات تست ترانسفورماتور های تک فاز [100]

۸- ۵- ۵ مثال مدارات تست برای تست های ترانسفورماتورهای سه- فاز [100]

مدارات تست مشخص شده با * در شکل ۸- ۶ طی بند های IEC, 12.3 , 12.4 [3] پیشنهاد شده اند ولی سایر مدارات نیز قابل استفاده اند .

۸- ۵- ۶ تنظیم جبران ساز (در صورت نیاز)

جبران سازی با تغییر فرکانس یا اندوکتانس رئاکتور کمکی انجام می شود . این عمل برای کاهش جریان ژنراتور I_G به کمترین مقدار انجام می شود .

برا ی جلوگیری از اضافه ولتاژهای خطرناک ناشی از پدیده خود تحریکی ، طبق توضیحات بند ۱ ضمیمه ۸ ، می توان یک جفت گوی در مدار تغذیه یا بین ترمینال HV و زمین قرار داد . فاصله این جفت گوی حفاظتی را بایستی طوری تنظیم کرد که در حدود ۵۰% موارد ولتاژ تست جرقه بزند . در صورت عدم وجود خطر خود- تحریکی ، می توان گوی ها را حذف کرد .

۸- ۵- ۷ کالیبراسیون ولتاژ تست

در صورت حذف مقسم ولتاژ هنگام اعمال ولتاژ کامل تست ، لازم است ولتاژ ترانسفورماتور تحت آزمایش با استفاده از ولت متر در طرف LV آن تنظیم شود . این ولت متر برای مثال در ۵۰% ، ۶۰% ، ۸۰% ولتاژ تست با استفاده از مقسم ولتاژ کالیبره می شود .

$$U_P = \frac{\hat{U}}{\sqrt{2}} = f(U_{LV})$$

نمودار کالیبراسیون خط مستقیمی است که از مبداء مختصات عبور می کند . کالیبراسیون به وسیله جفت گوی نیز به همین روش انجام می شود .

۸- ۵- ۸ مدت زمان تست

در ولتاژ کامل تست ، برا ی هر فرکانس تا دو برابر فرکانس نامی ، مدت زمان تست بایستی ۶۰ ثانیه باشد. اگر فرکانس تست ازدو برابر فرکانس نامی بیشتر شود ، مدت زمان تست t بر حسب ثانیه از فرمول زیر بدست می آید:

$$t = 120 \cdot \frac{f_r}{f_P}$$

که در آن:

t = مدت زمان تست بر حسب ثانیه

f_r = فرکانس نامی ترانسفورماتور

f_P = فرکانس تست

فرکانس تست هر چه که باشد ، مدت زمان نباید از ۱۵ ثانیه کمتر شود.

برا ی تست ولتاژ القایی به همراه اندازه گیر ی تخلیه جزئـی (ACSD و ACLD مطـابق IEC [3]) توالی تست در شکل ۸-۳ و ۸-۴ برای ترانسفورماتورهای دسته II مطابق IEEE [51] در شکل ۸- ۵ ارائه شده است. همچنین بخـش ۹ " انـدازه گیـری تخلیـه جزئی " را ببینید .

۸- ۵- ۹ تفسیر نتیجه تست

تست هنگامی موفق است که ترانسفورماتور در ولتاژ تست دچار شکست عایقی نگردد .

برای ترانسفورماتورهای مورد اندازه گیری تخلیه جزئی ، معیار موفقیت در بخش ۹ توضیح داده شده است .

۸- ۶ عدم قطعیت اندازه گیری

در صورت استفاده از مقسم خازنی یا ترکیبی بـه همـراه تجهیـزات انـدازه گیـری AC یـا ترانسفورماتور ولتاژ ، دقت تنظیم ولتاژ تست به ۱٪ می رسد .

در صورت استفاده از جفت گوی برا ی اندازه گیری ، انتظار می رود دقـت حـداکثر تـا ۳٪ باشد .

در فرکانس های بالاتر تست برا ی تست ولتاژ القایی ، اصلاح افت ولتاژ دو سر مقاومـت حفاظتی R_S جفت گوی لازم است ، بند ۳ ضمیمه ۸ را ببینید .

ضمیمهٔ ۸ :

تست ولتاژ القایی

ضمیمه ۸-۱ محاسبه بار برای تست ولتاژ القایی

مدار تست ولتاژ القایی در شکل ۸- ۱ بخش ۸- ۴- ۱ نشان داده شده است . در عمل مدار تست پیچیده تر است ، و در اینجا از راکتانس نشتی ترانسفورماتورها (ترانسفورماتور تغذیه و ترانسفورماتور مورد آزمایش) و راکتانس ژنراتور برای درک بهتر صرف نظر شده است . مدار تست یک مدار تشدید جریان است و در آن ترانسفورماتور تحت آزمایش با اتصال موازی R،C و L_{Fe} معادل سازی شده است .

بنابراین ، امپدانس بار ژنراتور مدار نوسانی موازی R-L-C است که در آن L عبارت است از اندوکتانس موازی L_{Fe} و L_S (شکل ۸- ۱) . اگر میرایی به میزان کافی پایین باشد (که این برای ترانسفورماتور در طی تست ولتاژ القایی طبیعی است) فرکانس ω_R تشدید از رابطه زیر بدست می آید:

$$\omega_R = \frac{I}{\sqrt{LC}}$$

در صورت تساوی فرکانس تست ω با فرکانس تشدید ω_R ، جریان ژنراتور I_G به حداقل مقدار خود می رسد. با تغییر فرکانس ژنراتور و یا با تغییر اندوکتانس رئاکتور کمکی L_S این کار قابل انجام است.

جهت حفظ پایداری ، امپدانس معادل کل مدار بایستی سلفی (Inductive) باشد .

چنانچه در مثال زیر نشان داده شده است برای تست ترانسفورماتورهای قدرت بزرگ با فرکانس دو برابر یا بیشتر بدون استفاده از رئاکتور کمکی بر آوردن نیاز فوق تقریباً غیر ممکن است .

مثال:

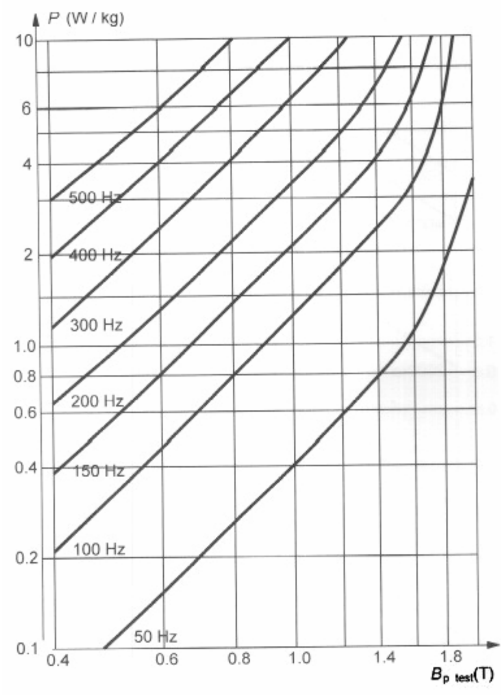
برا ی ترانسفورماتور تک- فاز ۱۰۵ MVA ؛ ۵۰ Hz ؛ ۱۵/۷۵ kV / ۴۲۰/√۳

- چگالی شار در ولتاژ نامی : $\hat{B}_r$ = ۱/۷۷ T.
- وزن مدار مغناطیسی = ۴۴۰۰۰ kg
- ظرفیت C_E بین HV و زمین ≈ ۸۰۰۰ pF
- ولتاژ تست (ACSD – تست) ، U_P = ۶۳۰ kV
- فرکانس تست = ۱۵۰ Hz

$$\frac{U_P}{U_r} = \frac{630}{420/\sqrt{3}} = 2{,}6$$

$$\frac{f_P}{f_r} = \frac{150}{50} = 3$$

$$B_{test} = \frac{2{,}6}{3}.\hat{B}_r = 0{,}87\hat{B}_r = 1{,}53 \text{ T}$$



شکل ۸- ۹ : تلفات ویژه آهن به نسبت تابعی از چگالی شار و فرکانس تست

محاسبه توان اکتیو تغذیه شده توسط ژنراتور :

با چگالی شار تست T ۱/۵۳ و فرکانس تست Hz ۱۵۰ تلفات ویژه از شکل ۸- ۹ ۵ W /kg بدست می آید ، که در آن بار اکتیو P_W به صورت زیر محاسبه می شود :

P_W = ۵ * ۴۴۰۰۰ = ۲۲۰ ۰۰۰ W ⟶ ۲۲۰ kW

توان رئاکتیو S_M برای مغناطیس کردن ترانسفورماتور مورد آزمایش به همان روش قابل محاسبه است. مطابق شکل ۸- ۱۰ ، توان ظاهری ویژه برای T ۱/۵۳ و Hz ۱۵۰ در حدود ۷ VA /kg است :

S_M = ۷ * ۴۴۰۰۰ = ۳۰۸ ۰۰۰ VA = ۳۸۰ kVA

مولفه کاملاً سلفی S_{ind} با تفریق برداری S_M و P_W قابل محاسبه است :

$$S_{ind} = \sqrt{(S_M^2 - P_W^2)} = \sqrt{(308^2 - 220^2)} = 216 \text{ kvar}$$

توان خازنی S_{cap} با استفاده از فرمول تقریبی زیر برای ترانسفورماتورهای معمولی دو سیم پیچه قابل تخمین است:

$$S_{cap} = \frac{U^2 \cdot \omega C_E}{3}$$

که در آن:

S_{cap} = توان خازنی بر حسب var

U = حداکثر اختلاف ولتاژ برای ظرفیت خازنی HV - زمین بر حسب V

C_E = ظرفیت خازنی بر حسب F

برای این مورد:

U = ۶۳۰ - ۲/۶ * ۱۵/۷۵ = ۵۸۹ kV

$$S_{cap} = -\frac{589000^2 \cdot 2\pi \cdot 150 \cdot 10^{-12}}{3} = -871000 \text{ var} \rightarrow -871 \text{ kvar}$$

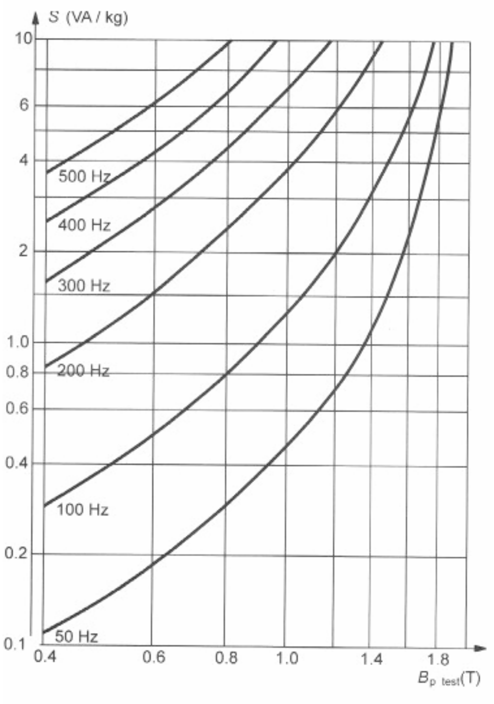
بایستی توجه کرد که مقدار بدست آمده از فرمول تقریبی فوق برا ی توان خازنی ، در مورد ترانسفورماتورهای چند فازه و ترانسفورماتورهای با سیم پیچ دارای جابجایی (interleaved) ، عددی بسیار پائین است.

این بدان معناست که ترانسفورماتور تحت آزمایش ، حتی در فرکانس های پائین تست ، همچون Hz ۱۵۰ بار خازنی بالایی ایجاد می کند . افزایش بیشتر فرکانس نسبت S_{cap} / S_{ind} را باز هم بیشتر می کند . با افزایش فرکانس تست ، توان خازنی بطور خطی بیشتر می شود ، در حالیکه توان مغناطیس کنندگی سلفی به مقدار زیادی کاهش می یابد .

با استفاده از مقادیر فوق ، اما در فرکانس تست Hz ۲۰۰ :

S_{ind} = ۱۴۰ kvar S_{cap} = -۱۱۶۰ kvar

بنابراین ، حتی برای آزمایشگاههایی با قابلیت تغییر فرکانس ، جهت جلوگیری از پدیده ناخواسته خود- تحریکی ، استفاده از رئاکتور کمکی از ابتدای آزمایش اکیداً توصیه می شود ، همچنین ضمیمه ۷- ۱ را ببینید . این عمل مزایای قابل توجهی را برای ترانسفورماتور مورد آزمایش خواهد داشت.



شکل ۸- ۱۰ : توان ظاهری مغناطیسی ویژه به نسبت تابعی از چگالی شار و فرکانس تست

برخی از آزمایشگاهها با استفاده از برنامه های کامپیوتری نوشته شده مخصوص ، مدار آزمایش را بهینه می کنند. این برنامه ها هر یک اجزای مدار آزمایش و ولتاژها و جریان ها را در نظر گرفته و امکان وقوع پیشامدهای ناخوشایند را در تست ولتاژ القایی کاهش می دهد .

ضمیمه ۸- ۲ الزامات عمومی تجهیزات اندازه گیری

(شکل ۸- ۲ را ببینید)

منبع ولتاژ G

برا ی تست ولتاژ القایی معمولاً ژنراتوری با فرکانس متوسط متغیّر به صورت تک- فاز یا سه- فاز در محدوده فرکانس ۴۰۰ Hz – ۵۰ استفاده می شود.

رئاکتور

معمولاً جبران سازی در طرف LV ترانسفورماتور تغذیه (testing transformer) انجام می شود . از لحاظ نظری این عمل در سمت فشار قوی و یا ثالثیه ترانسفورماتور تغذیه نیز ممکن است . بدلیل لزوم پایین بودن مقدار تخلیه جزیی کل برای مجموعه تجهیزات آزمایشگاهی بهترین انتخاب ، انجام این عملیات در نزدیکترین محل به ژنراتور می باشد .

ترانسفورماتور تغذیه

برای تطبیق ولتاژ ژنراتور با ولتاژ طرف LV ترانسفورماتور مورد آزمایش از ترانسفورماتور تغذیه AT استفاده می شود . اگر این ترانسفورماتور سیم پیچ های دیگری دارد که در حال تست مورد استفاده نیست ، بایستی یکی از دو سر آنها را زمین کرد .

تجهیزات اندازه گیری ولتاژ و فرکانس ME

ولتاژ در طرف LV ترانسفورماتور مورد آزمایش با استفاده از ترانسفورماتور ولتاژ و ولت متر سنجیده می شود . ولتاژ لازم بطور تقریبی با فرمول زیر از نسبت تبدیل r محاسبه می شود .

$$U_1 \cong \frac{U_P}{r}$$

که در آن :

U_1 = ولتاژ اولیه (LV) ترانسفورماتور مورد آزمایش

U_P = ولتاژ تست

r = نسبت تبدیل ترانسفورماتور مورد آزمایش

برای مثال در بند ۱ ضمیمه ۸ با U_P = ۶۳۰ kV

$$r = \frac{420/\sqrt{3}}{15{,}75} = 15{,}4$$

$$U_1 \cong \frac{630}{15{,}4} \cong 41\,\text{kV}$$

این مقدار فقط برای کنترل کاربرد دارد . قرائت ولت متر در طرف اولیه بایستی در ابتدا توسط تجهیزات اندازه گیری در طرف HV (برای مثال مقسم خازنی) کالیبره گردد .

بدلیل افت ولتاژ منفی Z_k . I_{ca} = ΔU) ناشی از جریان خازنی I_{cap} در امپدانس نشتی Z_k) نسبت ولتاژ U_P / U_I به طور کامل برابر ولتاژها در حالت بی باری r نیست ؛ اگر ترانسفورماتور تحت آزمایش با ولتاژ $U_1 = U_P / r$ تغذیه شود ، در حقیقت ولتاژ بسیار بالاتر از ولتاژ مقرر خواهد شد.

بدلیل وابستگی مستقیم مدت زمان تست به فرکانس ، لازم است فرکانس تست همزمان اندازه گیری شود .

مقسم ولتاژ خازنی یا ترکیبی به همراه دستگاه اندازه گیریT, AC

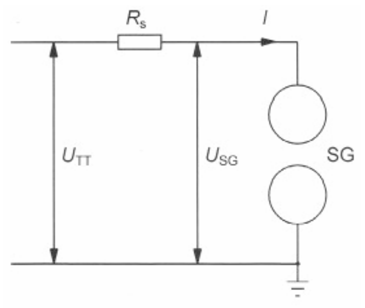
این روش کاملاً امتحان شده و می توان آن را تا بالاترین ولتاژ تست به کار برد . قرائت مستقیم مقدار پیک (peak) و موثر (r.m.s) ولتاژ تست بدین روش ممکن است.

به جای مقسم خازنی مجزا می توان از خروجی بوشینگ تپ (measuring tap) به عنوان سیگنال ورودی دستگاه اندازه گیری ولتاژ استفاده کرد. به هر حال لازم است قبل از هر تست سیگنال خروجی بوشینگ تپ را کالیبره کرد.

اندازه گیری با جفت گوی SG

گر چه این روش اندازه گیری در مقایسه با سایر روش های فوق معایب زیادی دارد ، هنوز هم در صورت کمبود تجهیزات اندازه گیری مناسب به کار برده می شود .

با این روش اندازه گیری فقط به صورت غیر مستقیم ممکن است. بدین معنی که قبل از هر تست کل مجموعه کالیبره می شود. در حال انجام تست اندازه گیری U_P ممکن نیست . مقاومت حفاظتی R_s برای محدود کردن جریان قوس جفت گوی لازم است مشخصات فنی آن حدود 1Ω/ V است، بخش ۷ ، بند ۷- ۲ را ببینید .



R_S = مقاومت حفاظتی

S_G = جفت گوی

U_{SG} = ولتاژ دو سر جفت گوی

U_{TT} = ولتاژ ترانسفورماتور تحت آزمایش

شکل ۸- ۱۱ : اصلاح خطا برای جفت گوی

ضمیمه ۸- ۳ اصلاح افت ولتاژ بر سر مقاومت حفاظتی جفت- گوی

$$I = U_{SG} \cdot \omega C$$

$$U_R = I \cdot R_S = U_{SG} \cdot \omega C \cdot R_S$$

$$U_{TT} = \sqrt{\left(U_{SG}^2 + U_R^2\right)} = U_{SG} \cdot \sqrt{\left(1 + \omega^2 C^2 R_S^2\right)}$$

برای فرکانس تست ۲۵۰ Hz ، جفت گویی با ظرفیت خازنی ۲۰۰ pF و مقاومت حفاظتی ۱ M Ω ، ولتاژ بر سر ترانسفورماتور مورد آزمایش عبارت است از:

$$U_{TT} = U_{SG} \cdot 1{,}05$$

بدون اصلاح ، ولتاژ بر سر ترانسفورماتور مورد آزمایش ۵% بیشتر خواهد شد.

تست ترانسفورماتورهای قدرت

۹- اندازه گیری تخلیه جزئی

۹- ۱ مراجع/ استانداردها

- IEC 60076- 3 (2000) , Annex A " Application guide for partial discharge measurements during a.c. withstand test on transformers according to 12.2, 12.3 and 12.4 " [3]
- IEC 60270 (2000) " Partial discharge measurement " [26]
- IEEE C57.12.90 – 1999 , clause 10.8 and 10.9 " induced voltage tests " [51]

توجه :

اندازه گیری تخلیه جزئی یک **تست روتین** برای ترانسفورماتورهای با $U_m >$ ۷۲/۵ kV مطابق IEC [3] یا با $U_m \geq$ ۱۱۵ kV مطابق IEEE [50] می باشد؛

۹- ۲ منظور از اندازه گیری

اندازه گیر ی تخلیه جزیی (PD–measurement) ابزاری غیر مخرب برای مشخص کردن وضعیت سیستم عایق بندی ترانسفورماتور است . هدف از اندازه گیری تخلیه جزئی گواهی کردن عدم وجود منبع PD خطرناک درون ترانسفورماتور است. اندازه گیری PD ، شناسایی و مکان یابی نقاطی از ترانسفورماتور را که در معرض تنش های عایقی غیر مجاز قرار گرفته اند ممکن می سازد . این تنش ها در دراز مدت بهره برداری ایمن از ترانسفورماتور را به خطر می اندازد.

اندازه گیر ی تخلیه جزئی صراحتاً در استانداردها یا مشخصات درخواست مشتری (specification) تعیین می گردد. لازم است این اندازه گیری همزمان با تست های عایقی در آزمایشگاه فشار قوی با استفاده از ولتاژ AC در محدودة ولتاژ فرکانس توان (power frequency) انجام شود.

برای ترانسفورماتورهای HVDC ، اندازه گیری PD طی تست های عایقی با ولتاژ DC نیز انجام می شود.

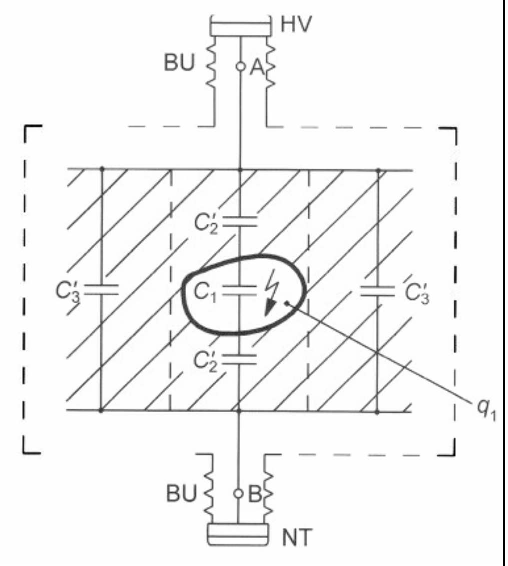
برای اندازه گیری PD در سایت بهره برداری (برا ی مثال روی ترانسفورماتورهای تعمیری) ممکن است سیستم تغذیه بدون تخلیة جزئی (PD-free) نیز مورد نیاز باشد . [221]

معمولاً ، اندازه گیری تخلیه جزئی آخرین تست عایقی انجام شده بر روی ترانسفورماتور است .

۹- ۳ کلّیات

تخلیه جزئی عبارت است از شکست جزئی و موضعی داخل مجموعه ای از اجزای عایقی بین دو الکترود غیر هم پتانسیل ، (خازن های C'_2 و C'_3 ، شکل ۹- ۱) . در طی اندازه گیری عملی PD ، میزان تخلیه های جزئی به صورت تابعی از ولتاژ اعمالی ثبت می گردد .

تخلیة جزئی حرکت سریع بارها در موضع تخلیه است و برای توضیح این پدیده ، سیستم عایقی را می توان توسط اتصال تعدادی خازن طبق شکل ۹- ۱ مدل نمود .



BU = بوشینگ
HV = ولتاژ فشار قوی
NT = ترمینال نوتزال
$C'_{2,3}$ = اکتیو پارت ترانسفورماتور(شامل روغن)
C_1 = ناحیة ضعیف

شکل ۹- ۱ : نمایش فیزیکی قسمتی از عایق بندی ترانسفورماتور

اگر دو ترمینال خط از طریق خازن خارجی C_k به هم وصل شوند (شکل ۹- ۲) حرکت بار در داخل عناصر عایقی موازی (خازن های C'_2 و C'_3 ، شکل ۹- ۱) روی بار خازن خارجی C_k هم اثر می گذارد . حرکت بارها به شکل پالس های جریان $i(t)$ گردشی در دو خازن با اتصال موازی C_k و C_t قابل آشکارسازی است .

دو شرط بایستی برآورده شود تا تخلیه جزئی (یعنی شکست موضعی الکتریکی) در داخل ناحیهٔ ضعیف یک سیستم عایقی گسترده آغاز گردد :

- شدت میدان الکتریکی موضعی E در ناحیهٔ ضعیف بزرگتر از میدان الکتریکی شروع PD باشد .
- الکترون های آزاد برای آغاز شکست الکتریکی موجود باشند ، بند ۱ ضمیمهٔ ۹ را ببینید .

تنش بیش از اندازه در ناحیهٔ ضعیف ممکن است ناشی از اشتباهات طراحی ، آلودگی یا انحراف از تولرانس های مجاز در حین فرآیند ساخت ، عیب مواد عایقی ,و یا حتی صدمه به عایق بندی ناشی از تست های پیشین باشد.

۹- ۴ اصول اولیه اندازه گیری PD

تمام روش های اندازه گیریPD بر اساس آشکارسازی پالس های جریان PD ($i(t)$ است.
این پالس ها در خازن های موازی C_k (خازن کوپلاژ) و C_t (ظرفیت خازنی مورد آزمایش) از طریق امپدانس اندازه گیری Z_m در گردش هستند .

مدار معادل مبنای اندازه گیری PD در شکل ۹- ۲ ارائه شده است [212] .

امپدانس اندازه گیری Z_m را می توان به شکل سری با خازن کوپلاژ C_k یا ظرفیت خازنی مورد آزمایش C_t قرار داد .

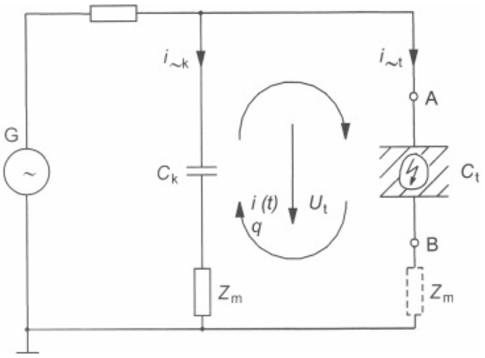
همانطور که در بخش ۹- ۳ گفته شد ، پالس های جریان PD با انتقال بار بین دو خازن موازی C_k (خازن کوپلاژ) و C_t (ظرفیت خازنی مورد آزمایش) ایجاد می شود .

هر دو استاندارد IEEE و IEC مقرراتی را برای اندازه گیری و ارزیابی سیگنال های ناشی از تخلیه های جزئی تعیین و اندازه های مجاز را مشخص نموده اند .

نگرش IEC به پردازش سیگنال الکتریکی ضبط شده با نگرش IEEE متفاوت است. IEC این سیگنال را به بار الکتریکی ظاهری تبدیل می کند که معمولاً با واحد پیکو کولمب (pC) سنجیده می شود ، در حالیکه IEEE آن را به ولتاژ تداخل رادیویی RIV تبدیل می کند که معمولاً با واحد میکرو ولت (μV) سنجیده می شود .

استفاده از روش های RIV برای شناسایی سیگنال PD منسوخ خواهد شد ، گر چه این موضوع تاکنون بطور رسمی توسط IEEE تایید نشده است. روشی که امروزه بنا به توصیهٔ IEEE Std C57.113 [56] بکار برده می شود شناسایی بار ظاهری بر حسب pC است .

برای شناسایی بار ظاهری انتگرال گیری پالس های جریان PD ، $i(t)$ لازم است .



C_t = ظرفیت خازنی مورد آزمایش
C_k = خازن کوپلاژ
G = منبع ولتاژ
$i(t)$ = پالس های جریان PD
$i_{\sim k,\sim t}$ = جریان های جابجایی
Z = اتصالات منبع ولتاژ
q = بار انتقالی
U_t = ولتاژ خازن های موازی
Z_m = امپدانس اندازه گیری

شکل ۹- ۲ : مدار معادل برای اندازه گیری PD

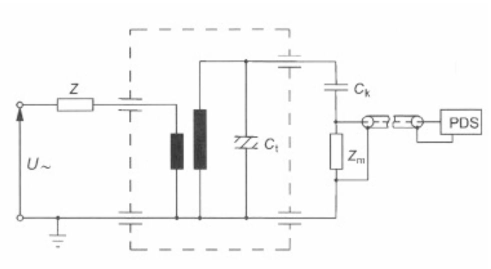
این انتگرال گیری ممکن است در حوزهٔ زمان (توسط اسیلوسکوپ دیجیتال) یا در حوزه فرکانس (توسط فیلتر باند- گذر ، band–pass) انجام شود . اکثر سیستم های PD موجود در بازار از فیلتر استفاده می کنند و در واقع یک " شبه انتگرال گیری " بر روی پالس های جریان PD انجام می دهند.

این عمل با استفاده از فیلتر " باریک- باند" یا " پهن- باند" در حوزه فرکانس صورت می گیرد ، بند ۲ ضمیمه ۹ را ببینید.

توجه:

در عمل منبع ولتاژ آزمایش برای جریان های کوتاه مدت (در محدوده ns) ، توسط امپدانس القائی Z (مدار ترانسفورماتور تغذیه) از مدار اندازه گیری PD (اتصال موازی C_k و C_t) ایزوله می باشد .

برای دستگاههای HV بدون بوشینگ ، یک خازن کوپلاژ بیرونی C_k بایستی موازی با دستگاه مورد آزمایش C_t وصل شود ، شکل ۹- ۳ را ببینید.



PDS	=	سیستم PD
C_k	=	خازن کوپلاژ
C_t	=	ظرفیت خازنی مورد آزمایش
Z	=	اتصال منبع ولتاژ
Z_m	=	امپدانس اندازه گیری

شکل ۹- ۳ : مدار تست برای اندازه گیری بدون استفاده از بوشینگ تپ

۹- ۵ اندازه گیری PD برای ترانسفورماتور

پالس های جریان گردشی PD - تولیدی توسط منبع PD خارجی (در مدار تست) یا توسط منبع PD داخلی (در سیستم عایق بندی ترانسفورماتور) - تنها از طریق بوشینگ های ترانسفورماتور قابل اندازه گیری است . مطابق شکل ۹- ۵ الف ، خازن بوشینگ C_1 همان خازن کوپلاژ C_k می باشد که بطور موازی به خازن C_t (دستگاه مورد آزمایش = ظرفیت خازنی کل سیستم عایق بندی ترانسفورماتور) وصل شده است . نمونه ای از سیستم عایق بندی ترانسفورماتور در شکل ۹- ۴ نشان داده شده است .

در ترانسفورماتور های قدرت ، امپدانس اندازه گیری معمولاً بین بوشینگ تپ و زمین ، یعنی بطور موازی با خازن C_2 وصل می شود (شکل ۹- ۵ الف) .

در صورتی که بوشینگ تپ نباشد ، لازم است یک خازن کوپلاژ بیرونی C_k بطور موازی به بوشینگ وصل شود (شکل ۹- ۵ ب) .

بین دو استاندارد (IEC و IEEE) در مورد ارزیابی پالس های جریان PD چند اختلاف اساسی وجود دارد.

۹- ۵- ۱ استاندارد IEC [3]

مطابق IEC ، اندازه گیری PD از طریق اندازه گیری " بار ظاهری ، q " انجام می شود . بدین ترتیب که بار ظاهری با انتگرال گیری از پالس های جریان PD با استفاده از فیلتر " پهن باند " یا " باریک باند" بدست می آید ، بند ۲ ضمیمه ۹ را ببینید .

سیستم اندازه گیری PD توسط یک کابل کواکسیال به امپدانس اندازه گیری Z_m وصل می شود (شکل ۹- ۵) .

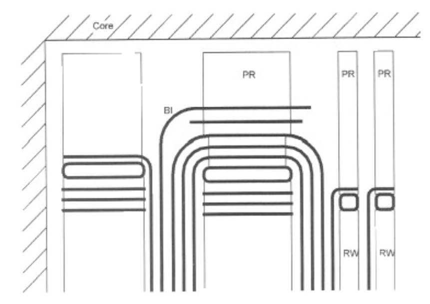
بار ظاهری q ، با واحد پیکو کولمب (pC) ، با بار انتقالی در طی فرآیند جبران سازی افت ولتاژ ΔU متناسب است. این افت ولتاژ در یکی از خازن های موازی C_t (عایق بندی ترانسفورماتور) ، ظرفیت خازنی بوشینگ C_1 یا خازن کوپلاژ C_k صورت می گیرد (شکل ۹- ۲ و ۹- ۵) .

افت ولتاژ در دستگاه مورد آزمایش در اثر تخلیه جزئی داخلی در بوشینگ یا سیستم عایق بندی ترانسفورماتور، و در مدار تست در اثر تخلیه جزئی خارجی بوجود می آید . اگر وجود PD در طی تست آشکار شود ، منبع PD بایستی جستجو گردد ، بخش ۹- ۷ را ببینید.

برای هر مدار تست ، اندازة بار ظاهری قابل اندازه گیری q_m بر حسب pC بایستی با کالیبراسیون تعیین گردد.

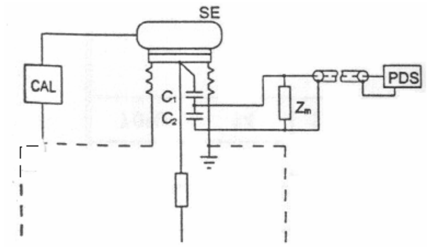
کالیبراسیون

کالیبراسیون مدار تست PD با استفاده از یک کالیبراتور با تغذیة باطری انجام می شود. کالیبراتور یک مولد موج مربعی با دامنة قابل تنظیم U_0 است که بطور سری با یک خازن کوچک C_0 وصل شده است (C_0 بایستی کوچکتر از ۱۰% C_k باشد) . برای اندازه گیری PD بر روی ترانسفورماتور ، کالیبراتور به دو سر بوشینگ یا دو سر خازن کوپلاژ موازی با بوشینگ وصل می شود (شکل ۹- ۵) . برای هر بوشینگ ،کالیبراسیون بایستی جداگانه انجام شود .



PR = پرس رینگ
BI = دیواره های عایقی
LV = فشار ضعیف
HV = فشار قوی
RW = سیم پیچ تنظیم ولتاژ

شکل ۹- ۴ : سیستم عایق بندی ترانسفورماتور؛ سیستم عایق گذاری با رینگ های عایقی و رینگ های زاویه ای بطرف یوغ



C_1=C_k = خازن کوپلاژ
SE = الکترود کروناگیر
PDS = سیستم PD
CAL = کالیبراتور
C_2 = بوشینگ تپ
Z_m = امپدانس اندازه گیری

شکل ۹- ۵ الف : مدار کالیبراسیون برای اندازه گیری PD ترانسفورماتور دارای بوشینگ با تپ خازنی

با فرض اینکه $C_0 << C_k$ ، پالس تزریقی از ژنراتور موج مربعی متناسب با بار q_0 ، از قبل روی مقادیر مشخص (۱۰۰ pC ، ۱۰۰۰ pC و غیره) با تنظیم دامنهٔ U_0 میزان گردیده است. مطابق پیشنهاد IEC 60270 زمان صعود پالس تزریقی بایستی کوچکتر یا مساوی ۶۰ µs ، دامنه U_0 بین ۲ V و ۵۰ V ، پلاریته قابل انتخاب و نرخ تکرار پالس ۱۰۰ Hz باشد .

$$q_0 = U_0 . C_0$$

که در آن :

q_0 = بار تزریقی

U_0 = ولتاژ قابل تنظیم ژنراتور موج مربعی

C_0 = ظرفیت خازنی کالیبراتور

مدار تست شامل خازن تحت آزمایش C_t مربوط به دستگاه مورد آزمایش ، خازن کوپلاژ C_k ، امپدانس اندازه گیری Z_m ، کابل کواکسیال و سیستم اندازه گیری کالیبره شده است ، (شکل ۹- ۵) . در طی تست PD مقادیر سیستم اندازه گیری مستقیماً بر حسب pC خوانده می شود. مقدار خوانده شده هنگامی معتبر است که کالیبراسیون از بوشینگ مورد اندازه گیری انجام شده باشد.

۹- ۵- ۲ استاندارد IEEE [50] , [51]

استاندارد IEEE برای تست روتین PD ، اندازه گیری "RIV" (Radio interference voltage) را لازم می داند . RIV بر حسب µV (ولتاژ تداخل) بیان می شود. از یک فیلتر " باریک باند" برای شبه- انتگرال گیری (quasi – integration) پالس های جریان PD از طریق شبه آشکار سازی پیک (quasi-peak detection) در فرکانس مرکزی بین ۰/۸۵ MHz و ۱/۱۵ MHz استفاده می شود . یک فیلتر باریک-باند برای حذف نویزهای خارجی موجود در آزمایشگاه های بدون حفاظ الکترو مغناطیسی (non-shielded) که فرکانس مرکزی آن قابل تنظیم است در مسیر اندازه گیری قرار می گیرد. این سیستم اندازه گیری RIV - سنج یا نویز سنج رادیویی نام دارد .

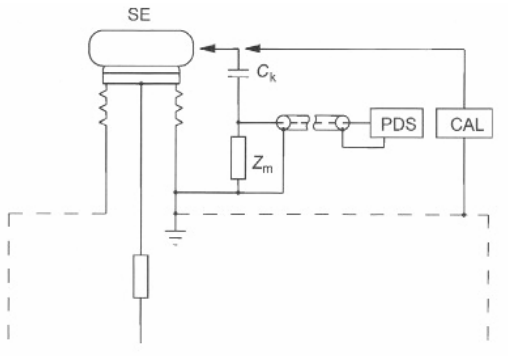
RIV با واحد µV هم به میزان بار الکتریکی انتقالی و هم به نرخ تکرار پالس های PD (تعداد پالس های PD در ثانیه) بستگی دارد. به همین دلیل است که مقادیر اندازه گیری شده RIV بر حسب µV را نمی توان به مقدار بار ظاهری بر حسب pC تبدیل کرد. بند۲ ضمیمه ۹ را ببینید .

بار الکتریکی منتقل شده (اندازه گیری شده با واحد µV) نتیجه فرآیند جبران سازی افت ولتاژ ΔU روی یکی از خازن های موازی C_t (عایق بندی ترانسفور ماتور) و ظرفیت خازنی بوشینگ C_1 یا خازن کوپلاژ C_k می باشد (شکل ۹- ۵) .

کالیبراسیون

مدار تست PD با روشی مشابه مدار اندازه گیری pC بار ظاهری کالیبره می شود ، شکل ۹- ۵ را ببینید. با فرض $C_0 << C_k$ ، ولتاژ سینوسی اعمالی دقیقاً بر مقادیرتعریف شده با دامنه قابل تنظیم U_0 بر حسب µV (۱۰۰ µV ، ۱۰۰۰ µV و غیره) منطبق است.

در طی تست PD مقادیر سیستم اندازه گیری بر حسب µV خوانده می شود. مقدار خوانده شده هنگامی معتبر است که کالیبراسیون از بوشینگ مورد اندازه گیری انجام شده باشد .



PDS = سیستم PD
CAL = کالیبراتور
C_k = خازن کوپلاژ
Z_m = امپدانس اندازه گیری
SE = الکترود کروناگیر

شکل ۹- ۵ ب : مدار کالیبراسیون برای اندازه گیری PD ترانسفورماتور؛ بوشینگ بدون تپ خازنی

مطابق استاندارد IEEE C57.12.90 [51] اندازه گیری PD داخل ترانسفورماتور به شکل بار ظاهری (پیکو کولمب) نیز ممکن می باشد. این رویه مزایای زیادی دارد که از جملهٔ آن تضعیف کم سیگنال است.

۹- ۵- ۳ حساسیت اندازه گیری PD

بار واقعی q_1 که در طی شکست الکتریکی جزئی در یک ناحیهٔ ضعیف از سیستم عایق بندی ترانسفورماتور آزاد می شود ، قابل اندازه گیری نیست ، شکل ۹- ۱ را ببینید. تنها انتقال بار بین خازن ناحیهٔ ضعیف C_1 و خازن های سیستم عایق بندی (C'_2 و C'_3 در شکل ۹- ۱) ازطریق بوشینگ (C_k) قابل آشکارسازی است . خازن های C'_2 و C'_3 (سیستم عایق بندی ترانسفورماتور و سیم پیچ) مستقیماً به این بوشینگ وصل شده اند . رابطهٔ بین بار واقعی q_1 ، بار ظاهری q و بار قابل اندازه گیری q_m در بند ضمیمهٔ ۹-۳ توضیح داده شده است .

حساسیت اندازه گیری PD (یعنی بار ظاهری قابل اندازه گیر ی q_m با واحد pC یا ولتاژ تداخل با واحد µV) کاملاً به عناصر مدار تست وابسته است ؛ بویژه به نسبت مقدار خازن تحت آزمایش C_t (سیستم عایق بندی ترانسفورماتور)به مقدار خازن کوپلاژ C_k (ظرفیت خازنی بوشینگ) .تأثیر مقدار خازن کوپلاژ به حساسیت مدار PD در شکل ۹- ۶ نشان داده شده است [212] . با توجه به توضیحات فوق ، در صورت تغییر زیاد در مدار تست (وصل یک خازن کوپلاژ جدید و غیره) لازم است کالیبراسیون تکرار گردد.

برای سیستم عایق بندی گسترده ای همچون ترانسفورماتور ، کالیبراسیون فوق تنها برای معایب PD نزدیک به بوشینگ ، مقدار واقعی را بدست می دهد.

جریان های پالسی واقعی PD - بویژه آنهایی که در منابع PD داخلی در عمق سیستم عایق بندی تولید می شوند - شدیداً توسط شبکهٔ RLCM (اندوکتانس متقابل ، خازن ، سلف ، مقاومت : RLCM) ترانسفورماتور تضعیف می شوند[214] . این پالس های PD " کند ، slow " فقط از بوشینگ ها قابل آشکار سازی است و لزوماً همیشه بدرستی توسط سیستم PD قابل اندازه گیری نمي باشد ، بند ۲ ضمیمهٔ ۹ را ببینید .

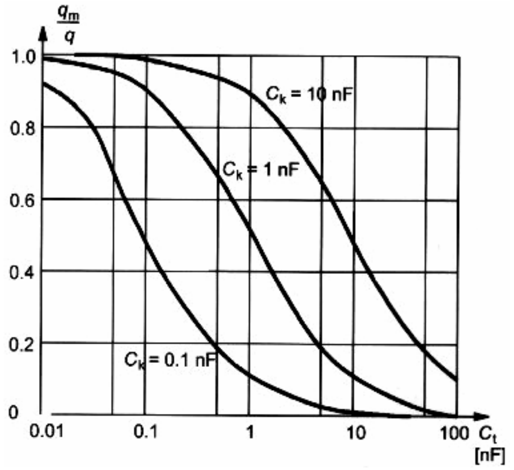
بنابراین دامنهٔ بار ظاهری q_m همیشه معیاری یگانه برای خطرناک بودن منبع PD درون سیستم عایق بندی نیست . فرآیند جستجوی منبع PD داخلی در بخش ۹- ۷ توضیح داده شده است .

توجه ۱ :

معمولاً Z_m و سیستم اندازه گیری بایستی باهم متناسب باشند تا شبه انتگرال گیری پالس های جریان PD بدرستی انجام گیرد. ترکیب امپدانس اندازه گیری Z_m از یک سازنده با سیستم اندازه گیری سازندگان دیگر توصیه نمی شود.

توجه ۲ :

برای تست PD جهت کنترل کیفیت و تحویل ترانسفورماتور به مشتری اندازه گیری تنها از بوشینگ های $U_m >$ ۷۲/۵ kV (IEC) یا از بوشینگ های $U_m >$ ۱۱۵ kV (IEEE) ضروری دانسته شده است.



q = بار ظاهری

q_m = بار قابل اندازه گیری

$$\frac{q_m}{q} = \frac{C_k}{C_t + C_k}$$

شکل ۹- ۶ : تأثیر خازن کوپلاژ C_k بر حساسیت اندازه گیری $\frac{q_m}{q}$

توصیه می شود که برای اطمینان از امکان آشکار سازی همزمان فعالیت های PD ، همهٔ بوشینگ های ترانسفورماتور مورد آزمایش به امپدانس اندازه گیری Z_m مجهز شوند . اگر فعالیت PD در مدار تست آشکار شود ، بدینوسیله مکان یابی و تعیین نوع منبع PD بسیار سریع تر انجام می گیرد ، بخش ۹- ۹ را ببینید .

برای جلوگیری از تخلیهٔ خارجی (کرونا) در مدار اندازه گیری PD لازم است سر تمام بوشینگ ها (شامل بوشینگ های زمین شده) با کلاهک کروناگیر پوشانده شود ، شکل ۹- ۵ را ببینید. برای نقاط فلزی تیز روی درپوش ترانسفورماتور و اتصالات تغذیه ولتاژ نیز بایستی از کلاهک کروناگیر استفاده کرد ، بند ضمیمهٔ ۹- ۸ را ببینید. منبع ولتاژ آزمایشگاه بایستی بدون PD (PD – free) باشد ، تمام تجهیزات فلزی داخل آزمایشگاه نزدیک ترانسفورماتور تحت آزمایش بایستی زمین گردد. نمونه های نویز خارجی در بند ضمیمهٔ ۹ -۴ توضیح داده شده است.

۹- ۶ فرآیند اندازه گیری PD

فرآیند اندازه گیری PD در اصل وابسته به فرآیند تست ولتاژ القایی می باشد ، که در جدول ۱ بخش ۸ نشان داده شده است. بین فرآیند اندازه گیری PDی معین شده در استانداردهای IEC و IEEE اختلافاتی وجود دارد. برخی اوقات مشتری بر اساس تجربیات خود و یا توصیه های کمیته های فنی ملی فرآیند ویژه ای را برای اندازه گیری PD تعیین می کند.

۹- ۶- ۱ استاندارد IEC [3]

مطابق IEC ، اندازه گیری PD بایستی به همراه تست ولتاژ القایی برای تمام ترانسفورماتورهایی که بالاترین ولتاژ آنها (U_m) بیشتر از یک حد معین باشد ، انجام گردد. اندازه گیری PD همزمان با تست ولتاژ القایی بلند مدت (ACLD) و تست ولتاژ القایی کوتاه مدت (ACSD) اجباری است. توالی زمانی برای ACSD و ACLD در بخش ۸ ، شکل های ۸- ۳ و ۸- ۴ ارائه شده است.

فعالیت PD بایستی از تمام بوشینگ های با ولتاژ سیستم بالاتر از ۷۲/۵ kV چک شود. فعالیت PD با واحد pC اندازه گیری می شود . هر فیلتر پهن- باند گذر (wide band pass filter) یا باریک- باند گذر در سیستم اندازه گیری PD قابل استفاده است ، بند ۲ ضمیمه ۹ را ببینید .

اولین اندازه گیری (مقادیر بار ظاهری با واحد pC) بایستی در پایین ترین سطح ولتاژ تست (برای مثال U_r %۱۰) انجام گیرد . مقدار اندازه گیری شده ، سطح نویز زمینه را در آزمایشگاه بدست می دهد . مطابق استاندارد IEC ، سطح نویز زمینه بایستی کمتر از نصف مقدار pC تعیین شده به عنوان بار ظاهری ترانسفورماتور مورد آزمایش باشد. در آزمایشگاههای دارای حفاظ الکترومغناطیسی (قفس فارادی) ، سطح نویز زمینه بسیار پایین است.

اندازه گیری PD بایستی در سطوح ولتاژی معین شده در شکل های ۸- ۳ و ۸- ۴ (قسمت های E,D,B,A) به استثنای سطح ۶۰ ثانیه (قسمت C) انجام گیرد . تمام مقادیر PD اندازه گیری شده از تمام بوشینگ های ترانسفورماتور بایستی ثبت گردد (مثال جدول ۱ را ببینید) .

جدول ۱ : ثبت نتایج PD

بوشینگ PD کالیبراسیون	HV pC ۱۰۰ k_C=	LV pC ۱۰۰ k_C=	NT pC ۱۰۰ k_C=	ملاحظات
%۱۰				
A				
B				
C	–	–	–	۶۰- ثانیه
D				
E				

k_C = ضریب کالیبراسیون (تقویت سیستم PD)

در طی تست بلند مدت (قسمت D شکل ۸- ۴) ، فعالیت PD بایستی حداقل هر ۵ دقیقه یکبار از هر بوشینگ چک شود .بهترین راه برای چک کردن فعالیت PD درون سیستم عایق بندی ترانسفورماتور استفاده از سیستم اندازه گیری PD چند- کاناله می باشد که قادر است فعالیت PD را همزمان از تمام بوشینگ ها (برای مثال با ۸ کانال اندازه گیری) آشکار کند. توضیح دقیق سیستم اندازه گیری PD (ICMsys8) که توسط آزمایشگاههای ABB HV استفاده می شود در بند ۵ ضمیمه ۹ ارائه شده است .

معیار پذیرش تست PD

تست PD موفقیت آمیز است اگر فعالیت پیوستهٔ PD آشکار شده از تمام بوشینگ ها، بزرگتر از دامنهٔ تعیین شدهٔ بار ظاهری بر حسب pC ، نگردد و همچنین در طی تست بلند- مدت دامنهٔ بار ظاهری تمایل به افزایش نداشته باشد. مقدار مجاز پیشنهادی برای بار ظاهری مطابق استاندارد IEC عبارت است از:

- ۳۰۰ pC در U_m %۱۳۰
- ۵۰۰ pC در U_m %۱۵۰
- ۱۰۰ pC برای مقدار فعالیت پیوسته PD در U_m ۱/۱

که در آن :

U_m = بالاترین ولتاژ دستگاه مطابق IEC یا به عبارت دیگر بالاترین ولتاژ r.m.s فاز به فاز که سیم پیچ ترانسفورماتور بر مبنای آن طراحی شده است .

۹- ۶- ۲ استاندارد **IEEE** [50] , [51]

مطابق استاندارد IEEE لازم است اندازه گیری PD در " سطح یک ساعت"، قبل از " سطح ۶۰ ثانیه" و در طی" سطح یک ساعت" بعد از " سطح ۶۰ ثانیه " انجام گردد ، شکل ۸- ۵ را در بخش ۸ ببینید. ولتاژ تست قبلاً با توافق مشتری تعیین می شود . طول مدت قسمت A باید به اندازهٔ کافی بلند باشد تا فعالیت PD ، در صورت وجود ، در سیستم عایق بندی غوطه ور در روغن ترانسفورماتور آغاز گردد (حداقل ۱۰ دقیقه) . ماهیت فیزیکی فعالیت PD در سیستم عایق بندی غوطه ور در روغن در بند۱ ضمیمه ۹ بررسی می شود.

فعالیت PD باید از تمام بوشینگ های با ولتاژ سیستم بزرگتر یا مساوی ۱۱۵ kV چک گردد. فعالیت PD با واحد µV اندازه گیری می شود. به عنوان سیستم اندازه گیری PD از فیلتری باریک- باند گذر استفاده می شود. فرکانس مرکزی پیشنهادی برای سیستم باریک- باندگذر ۱ MHz است. در صورت بالا بودن نویز زمینه ، فرکانس مرکزی، بین ۰/۸۵ MHz و ۱/۱۵ MHz قابل تغییر است.

اولین اندازه گیری PD (مقدار RIV بر حسب µV) بایستی در سطح ولتاژ پایین (حدود U_r %۱۰) انجام شود . این مقدار سطح نویز زمینهٔ آزمایشگاه است. مطابق استاندارد ، سطح نویز زمینه باید کمتر از نصف µV تعیین شده به عنوان حد مجاز برای ترانسفورماتور مورد آزمایش باشد. در آزمایشگاههای دارای حفاظ الکترومغناطیسی ، سطح نویز زمینه در حد چند µV است.

اندازه گیری PD بایستی در هر یک از سطوح ولتاژی معین شده در شکل ۵- ۸ (قسمت های A و C) بخش ۸ به استثنای سطح ۶۰ ثانیه (قسمت B) انجام گیرد.

تمام مقادیر µV اندازه گیری شده از تمام بوشینگ های ترانسفورماتور بایستی ثبت گردد ، مثال جدول ۲ را ببینید.

در طی تست یک- ساعت (قسمت C شکل ۸- ۵) ، فعالیت PD بایستی حداقل هر ۵ دقیقه یکبار از هر بوشینگ چک شود.

معیار پذیرش تست PD

تست PD موفقیت آمیز است اگر فعالیت پیوسته PD ، بزرگتر از سطح تعیین شدهٔ RIV بر حسب µV ، از هیچ بوشینگی آشکار نشود و همچنین در طی تست بلند مدت مقدار RIV تمایل به افزایش نداشته باشد. مطابق استاندارد IEEE ، تست PD در صورت برقراری شرایط زیر موفقیت آمیز است:

- اندازه سطح PD از µV ۱۰۰ بیشتر نشود.
- افزایش سطح PD در طی تست یک- ساعت از µV ۳۰ بیشتر نشود.
- سطح PD در طی تست یک- ساعت تمایل به افزایش پیوسته نداشته باشد و هیچ افزایش ناگهانی پایداری ، در طی ۲۰ دقیقه آخر تست ، برای سطح PD پیش نیاید.

جدول ۲ : ثبت نتایج PD

ملاحظات	NT µV ۱۰۰ k_c=	LV µV ۱۰۰ k_c=	HV µV ۱۰۰ k_c=	بوشینگ ولتاژ کالیبراسیون
				٪۱۰
				A
				B
۶۰- ثانیه	–	–	–	C
				D
				E

k_c = ضریب کالیبراسیون (تقویت سیستم PD)

۹- ۷ فرآیند جستجوی منبع PD

اگر فعالیت PD از مقدار تعیین شده توسط مشتری یا مقررات کنترل کیفی تولید کننده بیشتر شود ، نوع منبع PD و محل آن (در خارج یا داخل سیستم عایق بندی) بایستی جستجو گردد . در فرآیند جستجوی منبع PD بایستی رفتارهای از پیش ثبت شدهٔ (registered) منابع PD مورد استفاده قرار گیرد .

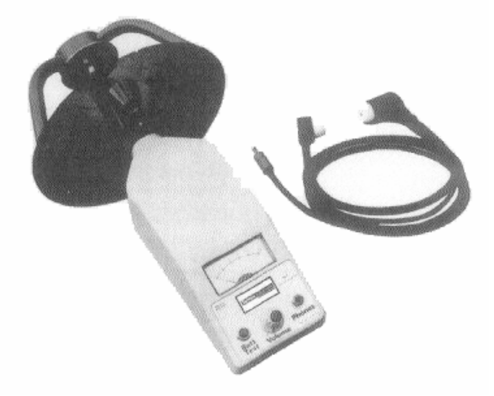
۹- ۷- ۱ جستجوی منابع PD خارجی

اولین مرحله ، حذف تمام منابع ممکن PD خارجی می باشد. نمونه هایی از منابع خارجی به شرح زیر است ، همچنین بند ۴ ضمیمهٔ ۹ را ببینید :

- ذرات هادی روی سطح بوشینگ
- نقاط تیز بدون کلاهک روی ترانسفورماتور یا در مدار آزمایش
- اتصالات ناقص کلاهک های کروناگیر
- اشیا فلزی زمین نشده در اطراف ترانسفورماتور
- نویز یا PD داخلی از منبع ولتاژ تغذیه

تخلیه های الکتریکی در هوا (کرونا) ، تولید شده توسط الکترودهای تیز (الکترودهای سوزنی) ، براحتی توسط آشکار ساز دستی مافوق صوت (portable ultrasonic detector) قابل تشخیص می باشد ، شکل ۹- ۷ را ببینید.

مشکل PD منبع ولتاژ را می توان براحتی با جداسازی ترانسفورماتور مورد آزمایش و اندازه گیری مجزای PD از منبع ولتاژ چک نمود .



شکل ۹-۷ : آشکار ساز مافوق صوت برای PD خارجی در مدار تست

۹- ۷- ۲   جستجوی نوع منبع PD

نوع منبع PD بر اساس رفتار آماری ویژهٔ آن (الگوی PD) مشخص می شود. رفتار آماری منبع PD کاملاً به میزان موجود الکترون های آغازگر(starting) وابسته است . این الکترون ها باعث آغاز تخلیهٔ الکتریکی در ناحیهٔ ضعیف سیستم عایق بندی ترانسفورماتور می شوند ، ماهیت فیزیکی فرآیند تخلیه جزئی را در بند ۱ضمیمهٔ ۹ ببینید. وجود الکترون های آغازگر کاملاً به جنس منبع PD (مادهٔ هادی یا غیر هادی) و به موقعیت منبع PD نسبت به الکترود فلزی وابسته است. در نتیجه ، پنج الگوی نمونهٔ PD وجود دارد که نمایندهٔ فرآیندهای فیزیکی منابع PD می باشند (برای درک بیشتر ، جدول ۳ را ببینید).

این الگوهای نمونهٔ PD براساس فرآیندهای فیزیکی تخلیه الکتریکی در ناحیهٔ ضعیف تعیین شده اند (بند ۱ ضمیمهٔ ۹) و از لحاظ نظری برای هر سیستم عایق بندی قابل آشکار سازی هستند (اگر مدار اندازه گیری به اندازهٔ کافی حساس باشد). الگوهای PD (آنالیز آماری سیگنال های PD) توسط ساختمان سیستم عایق بندی تحت تأثیر قرار نمی گیرند[213] .

توجه:

ساختمان سیستم های عایق بندی گسترده ، همچون سیستم مربوط به ترانسفورماتور ، دامنهٔ پالس های جریان PD داخلی اصلی را بشدت تضعیف می کند ، اما رفتار آماری آنها را تغییر نمی دهد.

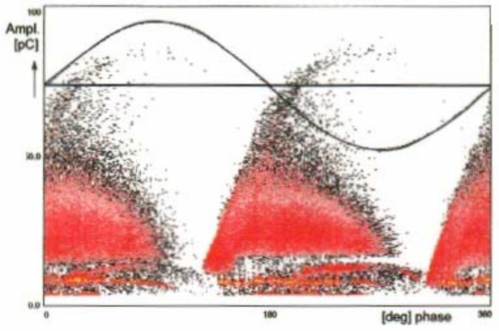
از یک سیستم PD " آنالایزر تخلیهٔ جزئی وابسته به فاز " (Phase Resolving Partial Discharge Analyzer) = سیستم PRPDA برای ضبط الگوی PD استفاده می شود [215] . این سیستم PD پیشرفته (بند ۵ ضمیمهٔ ۹) آنالیز آماری داده های ضبط شده PD را انجام می دهد . در ولتاژ تست معین ، فعالیت PD به صورت تابعی از موقعیت فاز و دامنهٔ بار ظاهری در آن زمان ذخیره می شود (آنالایزر دو بعدی چند کاناله) . نتایج در نهایت به صورت الگویی دو بعدی نمایش داده می شود (شکل ۹- ۸ الف) . بعد سوم (رنگ) تعداد کل پالس های PD جمع آوری شده در یک زمان را نشان می دهد . برای آنالیز آماری هر منبع PD طی شدن حداقل ۳۰۰۰ سیکل لازم است (برای ۵۰ Hz مدت زمان از پیش تعیین شدهٔ اندازه گیری بایستی ۶۰ ثانیه باشد).

شکل ۹- ۸ ب نمودار معروف پالس های PD در طی یک سیکل نشان می دهد که توسط یک سیستم PD معمولی ضبط شده است.

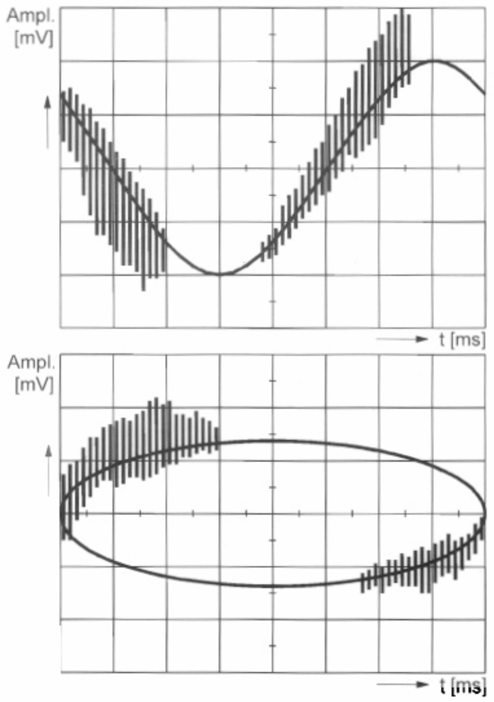
برای جستجوی منبع PD ، در مرحلهٔ اول باید الگوی PD تحت شرایط تست زیر ضبط شود[216] :

- ولتاژ شروع PD (هنگام بالا بردن ولتاژ)
- ولتاژ قطع PD (هنگام پایین آوردن ولتاژ)
- ۱۰% بالاتر از ولتاژ شروع

شرایط بعدی برای جستجوی منبع PD به نتایج آنالیز الگوی PD بستگی دارد .



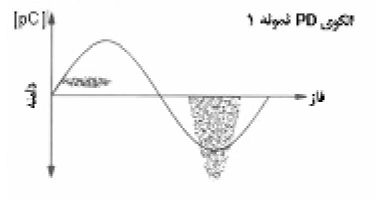
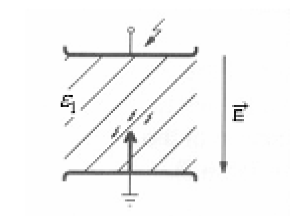
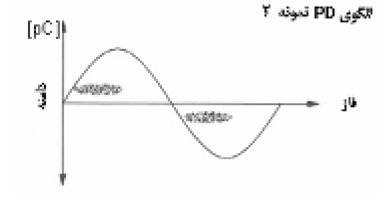
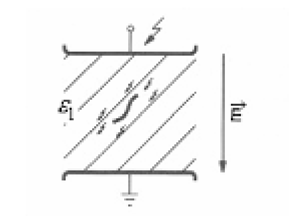
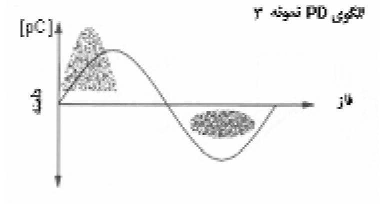
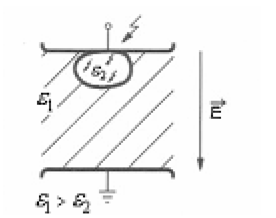
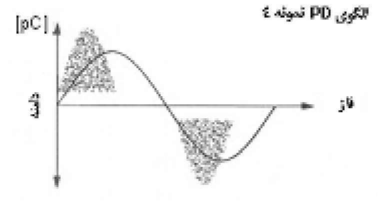
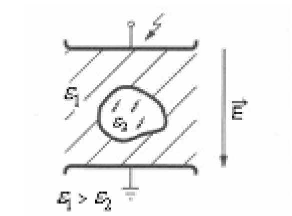
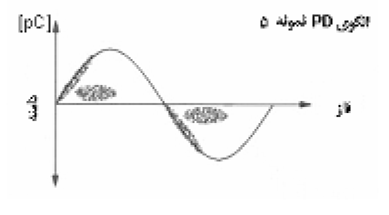
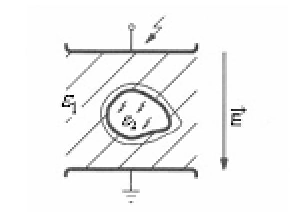
شکل ۹- ۸ الف : ثبت پالس های PD (حباب و تخلیهٔ سطحی)؛ سیستم پیشرفته PD (آنالیز آماری پالس های PD)



شکل ۹- ۸ ب : ثبت پالس های PD (حباب و تخلیهٔ سطحی)؛ اندازه گیری با سیستم کلاسیک ، فقط یک سیکل

آنالیز الگوی PD بر اساس مقایسهٔ الگوی عملی PD ضبط شده در عمل ، با الگوی نمونهٔ PD ارائه شده در جدول ۳ انجام می شود ، شکل ۹- ۹ را ببینید .

جدول ۳ : نمونه های منبع **PD** در سیستم عایق بندی ترانسفورماتور

الگوی نمونهٔ PD	بیان تصویری منبع PD	شرح منبع PD
		مادهٔ هادی (الکترود سوزنی) دارای تماس مستقیم با الکترود فلزی
		مادهٔ هادی بدون تماس با الکترود فلزی
		مادهٔ غیر هادی (حفره) دارای تماس با الکترود فلزی
		مادهٔ غیر هادی (حفره) بدون تماس با الکترود فلزی
		مادهٔ غیر هادی (حفره) بدون تماس با الکترود فلزی با سطح متغیر بدلیل تخلیهٔ جزئی

شکل ۹ – ۹ : الگوهای نمونهٔ PD

در عمل معمولاً پنج الگوی PD در شکل های بسیار متنوع ظاهر می شوند . بدلیل تغییر پیوسته هم در محیط اطراف مکان منبع PD و هم در خود منبع PD (بدلیل تخلیة الکتریکی) ، تنها چند الگوی PD وجود دارد که در طول مدت تست رفتار ثابتی از خود نشان می دهند.

مشخصات پایه ای هر الگوی PD که لازم است آنالیز گردد به شرح زیر است [216] :

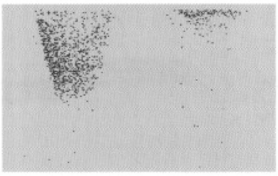
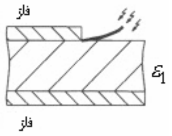
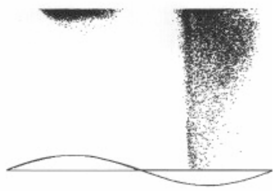
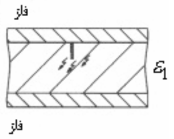
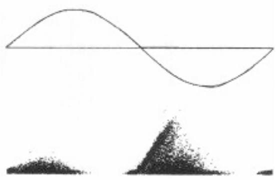
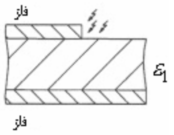
- موقعیت فاز سیگنال های PD
- تقارن سیگنال های PD در بخش مثبت و منفی موج سینوسی
- تعداد سیگنال های PD در هر سیکل
- قابلیت بازیابی (reproducibility) الگوی PD

تفسیر و جدا سازی نمونة صحیح الگوی PD از الگوهای بدست آمده از اندازه گیری ، نیاز به تجربه و مهارت بالا دارد. در صورت وقوع هم زمان چند عیب PD ، مقایسه با انواع الگوهای نمونه و یافتن الگوی نمونة صحیح بسیار مشکل تر است .

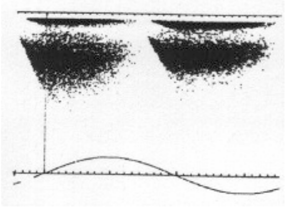
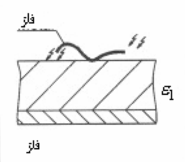
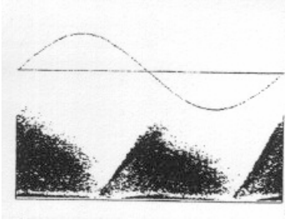
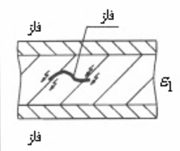
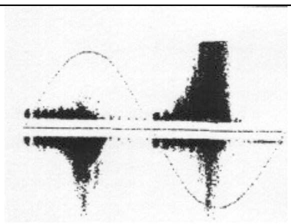
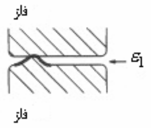
جدولی در مورد منابع PD نمونه درون سیستم عایق بندی ترانسفورماتور ، الگوی آنها و نحوة رفتار در طول تست در شکل ۹- ۱۰ ارائه شده است .

در صورت آشکار شدن وجود فعالیت PD در داخل سیستم عایق بندی ترانسفورماتور ، مکان یابی منبع PD بایستی انجام گردد ، بخش های ۹- ۸ و ۹- ۹ را ببینید .

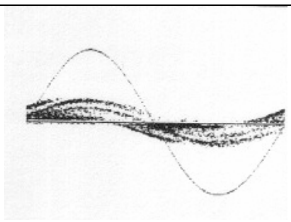
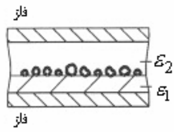
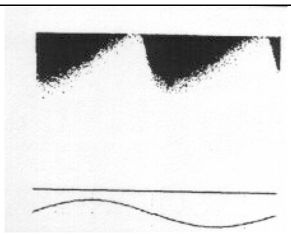
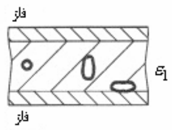
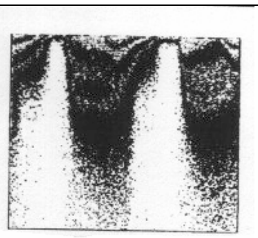
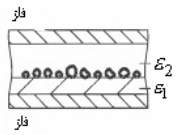
جدول ۴ : نمونه های منبع **PD** در سیستم های عایق بندی ترانسفورماتور (شکل های ۹- ۱۰ الف ، ب و پ)

فرآیند پیشنهادی	رفتار در طول تست	الگوی PD اندازه گیری شده	بیان تصویری عیب PD	شرح عیب PD
اصلاح تیزی (conditioning) الکترود سوزنی با تست بلند مدت توجه: ممکن است موجب شکست الکتریکی گردد.	تأخیر در شروع تغییر الگوی PD			الکترود سوزنی در روغن
تست بلند مدت به همراه کنترل رفتار الگوی PD توجه: ممکن است موجب شکست الکتریکی گردد.	تغییر الگوی PD الگوی **PD** نمونه۵ ممکن است رگه های کربنی ایجاد شود			الکترود سوزنی در مادة عایقی جامد
تست بلند مدت به همراه کنترل رفتار الگوی PD توجه: ممکن است موجب شکست الکتریکی گردد.	تغییر الگوی PD تخلیة سطحی الگوی **PD** نمونه۵ ممکن است رگه های کربنی ایجاد شود			الکترود سوزنی روی سطح مادة عایقی جامد

شکل ۹- ۱۰ الف : نمونه های عیب PD در عایق بندی ترانسفورماتور؛
جسم هادی = الگوی PD نمونة ۱

فرآیند پیشنهادی	رفتار در طول تست	الگوی PD اندازه گیری شده	بیان تصویری عیب PD	شرح عیب PD
اصلاح تیزی الکترود سوزنی با تست بلند مدت توجه: ممکن است موجب شکست الکتریکی گردد.	تأخیر در شروع تغییر الگوی PD **الگوی PD نمونة۵**			ذرة هادی در روغن
تست بلند مدت به همراه کنترل رفتار الگوی PD توجه: ممکن است موجب شکست الکتریکی گردد.	تغییر الگوی PD ممکن است رگه های کربنی ایجاد شود **الگوی PD نمونة۵**			ذرة هادی در مادة عایقی
تست بلند مدت به همراه کنترل رفتار الگوی PD	قطع PD در ولتاژ تست بالاتر **الگوی PD نمونة۵**			تماس نامناسب

شکل ۹- ۱۰ ب : نمونه های عیب PD در عایق بندی ترانسفورماتور؛
جسم هادی= الگوی PD نمونة ۲

فرآیند پیشنهادی	رفتار در طول تست	الگوی PD اندازه گیری شده	بیان تصویری عیب PD	شرح عیب PD
زمان ایستایی طولانی تر پس از روغن زنی تست بلند مدت گازگیری از روغن سیرکولة روغن تحت خلأ	تغییر احتمالی در الگوی PD			حباب در روغن
تست بلند مدت به همراه کنترل رفتار الگوی PD توجه: ممکن است موجب شکست الکتریکی گردد.	تغییر الگوی PD ممکن است رگه های کربنی ایجاد شود			حباب در عایق جامد (کاغذ، مقوا، چسب)
خشک کردن مجدد ترانسفورماتور	دامنة بسیار بالای بار ظاهری			حباب ناشی از رطوبت در سیستم عایق بندی (رطوبت موضعی)

شکل ۹- ۱۰ پ : نمونه های عیب PD در عایق بندی ترانسفورماتور ؛ **حباب = الگوی نمونة ۳ و ۴**

۹- ۸ آشکار سازی سیگنال های صوتی PD

سیگنال صوتی PD عبارت است از ارتعاش مکانیکی در محیط الاستیک (موج صوتی) . مکان یابی منبع PD تولیدی که همان موضع تخلیة الکتریکی در ناحیة ضعیف عایق است ، بر اساس آنالیز امواج صوتی با اندازه گیری تأخیر زمانی بین دریافت سیگنال الکتریکیPD (تریگر اسیلوسکوپ) و سیگنال صوتی انجام می شود . سیگنال صوتی توسط حداقل سه سنسور صوتی که روی مخزن ترانسفورماتور نصب شده دریافت می شود . جزئیات مربوط به انتشار امواج صوتی درون سیستم عایق بندی ترانسفورماتور و سیستم صوتی پیشرفته در بند ۶ ضمیمة ۹ توضیح داده شده است [217] .

ترانسدیوسرهای پیزوالکتریک (کریستال) با فرکانس تشدید بین ۶۰ تا ۱۵۰ kHz معمولاً به عنوان سنسور صوتی بکار گرفته می شوند. یک اسیلوسکوپ دیجیتال چهار کاناله برای آنالیز سیگنال های صوتی PD لازم است . یک نمونه از سیگنال صوتی به همراه سیگنال الکتریکی PD در شکل ۹- ۱۱ نشان داده شده است .

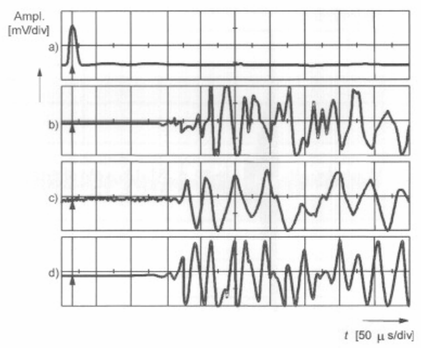
مکان منبع PD در سیستم عایق بندی از تأخیر زمانی بین سیگنال های الکتریکی و صوتی به روش فاصله یابی مثلثی (triangulation) بدست می آید (شکل ۹- ۱۲) [217] . سرعت امواج صوتی در روغن حدود ۱۴۰۰ m/S است . این روش از لحاظ نظری تنها برای " امواج مستقیم" یعنی امواج صوتی منتشر شده فقط در روغن قابل استفاده است .

انتشار امواج صوتی در داخل ترانسفورماتور(بند ۶ ضمیة ۹) توسط ساختمان پیچیدة سیستم عایق بندی (دیواره های عایقی ، هسته ، دیواره های مخزن) کاملاً تحت تأثیر قرار می گیرد . در چنین ساختمان پیچیده ای سیگنال ارسال شده از منبع PD در طول مسیر انتشار خود تغییر می کند. هم دامنه (تضعیف) و هم شکل سیگنال (جذب ، پراکندگی) تحت تأثیر قرار مي گیرد. بنابراین ، هنگام آنالیز اختلاف زمانی بین سیگنال های صوتی و الکتریکی PD به منظور مکان یابی ، تشخیص بین امواج مستقیم و منعکس شده از دیواره ها بایستی ممکن باشد (شکل ۹- ۱۲) . اطلاعات در این مورد از لحاظ نظری در پیشانی سیگنال صوتی آشکار شده توسط سنسور روی دیوار مخزن نهفته است (شکل ۹- ۱۳) .

۹- ۸- ۱ حساسیت اندازه گیری

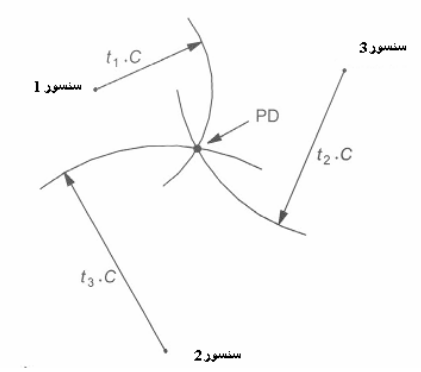
مکان یابی PD برای عیب هایی که موجب ارسال مستقیم امواج صوتی از طریق روغن می شوند (دامنة بار ظاهری > ۱۰۰ pC) براحتی ممکن است (برای نمونه این PD می تواند از یک ذرة فلزی چسبیده به روی سطح عایق ایجاد شود).

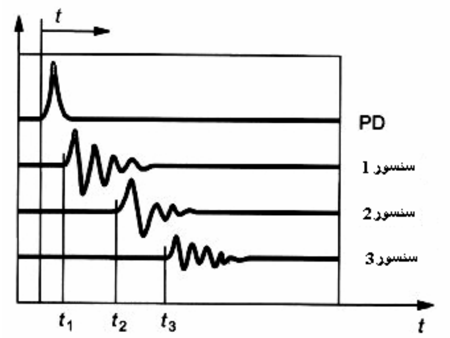
عیوب PD درون عایق جامد ، برای نمونه ناشی از ذره ای فلزی داخل عایق ، بسختی قابل آشکار سازی است (دامنة بار ظاهری > ۱۰۰۰ pC) . دلیل این امر سرعت های متفاوت انتشار امواج صوتی در مواد مختلف و پدیدة انعکاس در سیستم گستردة عایق بندی ترانسفورماتور است ، بند ۶ ضمیة ۹ را ببینید.



a) = سیگنال الکتریکی PD [0.50 V/div]
b) = سیگنال صوتی PD [20 mv/div] ، سنسور ۱
c) = سیگنال صوتی PD [10 mv/div] ، سنسور ۲
d) = سیگنال صوتی PD [50 mv/div] ، سنسور ۳

شکل ۹- ۱۱ : آشکارسازی سیگنال های PD صوتی





C = سرعت موج صوتی
t_1, t_2, t_3 = زمان رسیدن سیگنال به سنسور

شکل ۹- ۱۲ : مکان یابی منبع PD با استفاده از روش فاصله یابی مثلثی

POWEREN.IR

آشکار سازی عیوب PD موجـود در عـایق هـای اصـلی ترانسـفورماتور ، بـدلیل وجـود دیواره های عایقی و سیم پیچ های بیرونی بسیار دشوار است ، شکل ۹- ۴ را ببینید .

آنالیز امواج صوتی ناشی از عیب PD در هسته خیلی دشـوار اسـت و احتمـالاً بـه نتـایج منحرف کننده ای منجر می شود .

توجه:

آشکار سازی سیگنال های صوتی PD بایستی در سطح ولتاژی نزدیک به ولتاژ شـروع PD انجام گیرد تا ارتباطی مطمئن بین سیگنال های صوتی و الکتریکی بدست آیـد. در ولتاژ بالاتر تعداد پالس های PD در هر سیکل بیشتر می شود و این ممکن است باعـث ایجاد منابع جدید PD شود .

در صورت وجود فعالیت ناشناختهٔ PD ، جستجوی عمقـی و دقیـق منبـع PD بایسـتی دنبال گردد. حداقل یک روز برای اندازه گیری و یک روز دیگر بـرای آنـالیز نتـایج لازم است ، بخش ۹- ۹ را ببینید .

۹- ۹ جستجوی جزء به جزء منبع PD

جستجوی جزء به جزء منبع PD خارج از الزامـات اسـتانداردهای IEEE و IEC اسـت. فرآیند جستجو بستگی به منبع PD دارد. هدف جستجو یافتن منبع PD در کوتـاهترین زمان ممکن می باشد [219]، [216] .

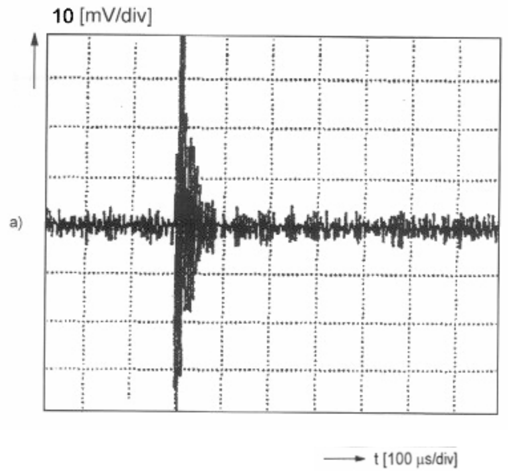
جستجوی دقیق منبع PD نیاز به تجهیزات زیر دارد که قابل تهیه از بازار است:

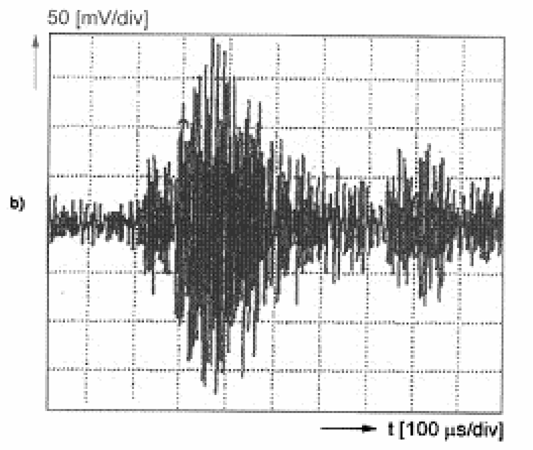
ترانسفورماتور جریان فرکانس بالا: این ترانســـفورماتور جـــریـــان (HF CT, 100kHZ-30MHZ) به عنوان امپـدانس انـدازه گیری بکـار مـی رود و وظیفـهٔ آن آشکارسازی پالس های واقعی جریان PD است. HF CT به هر یک از بوشـینگ هـای ترانسفورماتور وصل می شود (اندازه گیری چند کاناله).

اسپکتروم آنالایزر: یک اسپکتروم آنالایزر هم برای آنـالیز پـالس هـای جریـان PD در حوزهٔ فرکانس به منظور مکان یابی و هـم بـرای آشکارسـازی سـیگنال هـای PD بـا عملکرد به صورت یک فیلتر باند گذر متغیر (شبه انتگرال گیـری پـالس هـای جـریان PD) جزء اصلی هر سیستم پیشرفتهٔ PD می باشد .

سیسـتم پیشـرفتهٔ آشکارسـازی و انـدازه گیـری PD : بـرای مثـال سیسـتم ICM یـا ICMsys8 به منظور ضبط و آنالیز رفتار آماری سیگنال های PD برای تشـخیص نـوع منبع PD (الگویPD) بکـــار می رود.

اسیلوسکوپ دیجیتال : اسیلوسکوپ دیجیتال به عنوان ابـزار کنترلـی بـرای سـیگنال های دیجیتالـــــی شده و ابزار آنالیز مبتنی بر زمان (time resolved) ســـیگنال ها هنگام مکان یابی منبع PD بکار می رود.





شکل ۹- ۱۳ : آنالیز امواج صوتی منبع PD
a) موج مستقیم صوتی (از طریق روغن)
b) موج انعکاسی یا عبوری از محیط های مختلف

۹- ۹- ۱ جستجو و مکان یابی منبع PD

جستجوی منبع PD بایستی با توالی زیر انجام شود:

- آنالیز طیف فرکانسی پالس های جریان PD
- آنالیز الگوی PD (آنالیز آماری سیگنال های PD)
- تلاش برای تعیین مکان منبع PD با استفاده از آنالیز سیگنال های الکتریکی PD در حوزهٔ فرکانس
- تلاش برای تعیین مکان منبع PD با استفاده از آنالیز سیگنال های الکتریکی PD در حوزهٔ زمان

این مراحل بایستی در سطوح ولتاژی زیر تکرار گردد:

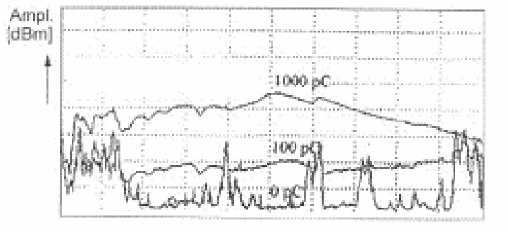
- در ولتاژ تست شروع PD
- در ولتاژ تست قطع PD
- در سطوح مختلف ولتاژی در محدودهٔ ولتاژ تست
- در ولتاژهایی که مقدار آنها تابع مدت زمان اعمال ولتاژ است .

آنالیز نتایج بر مقایسهٔ رفتار واقعی سیگنال PD با نتایج تحلیل ویژگی سیستم عایق بندی ترانسفورماتور که از طریق کالیبراسیون به دست آمده است استوار می باشد. ویژگی سیستم عایق بندی ترانسفورماتور تحت آزمایش بایستی توسط " فرآیند کالیبراسیون" تعیین گردد.

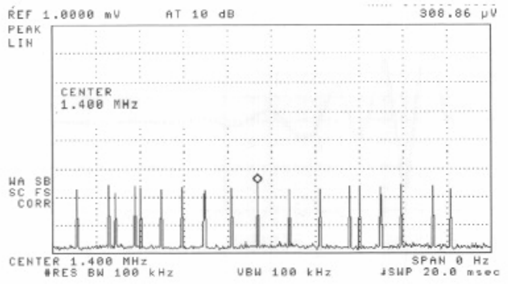
مثالی از مشخصهٔ بدست آمده برای یک ترانسفورماتور با استفاده از یک کالیبراتور معمولی در شکل ۹- ۱۴ نشان داده شده است:

- طیف فرکانسی از هر بوشینگ (اسپکتروم آنالایزر با بازهٔ کامل) ، شکل ۹- ۱۴ الف .
- حساسیت مدار اندازه گیری (با واحد pC) از هر بوشینگ (اسپکتروم آنالایزر با بازهٔ صفر) ، شکل ۹-۱۴ ب (فیلتر باند-گذر)
- ثبت حساسیت با واحد pC از هر بوشینگ با سیستم ICM (سیگنال خروجی ویدئو از اسپکتروم آنالایزر) شکل ۹-۱۴ پ (الگوی PD) .
- کوپلاژ تزویجی (cross-coupling) سیگنال های کالیبراسیون در حوزهٔ فرکانس ، شکل ۹-۱۴ ت (مکان یابی منبع PD) .
- کوپلاژ تزویجی سیگنال های کالیبراسیون در حوزهٔ زمان ، شکل ۹-۱۴ ث (مکان یابی منبع PD) .

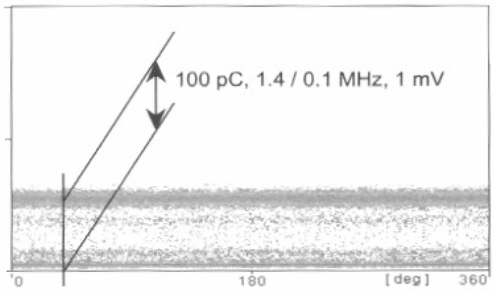
برای بدست آوردن مشخصات کوپلاژ تزویجی سیستم عایق بندی ، یک سیگنال کالیبراسیون ۱۰۰ pC به بوشینگی معین تزریق شده ، پاسخ بدست آمده از تمام بوشینگ ها اندازه گیری می شود (روش چند- ترمینال) . این فرآیند برای تک تک بوشینگ ها تکرار می شود (زمان لازم برای یک ترانسفورماتور سه فاز ۶ ساعت است).



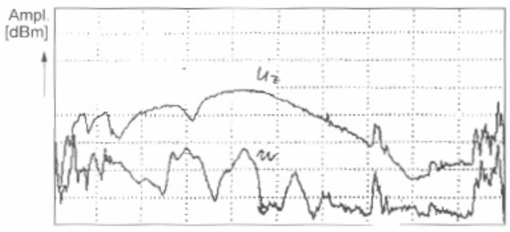
شکل ۹-۱۴ الف : تحلیل ویژگی ترانسفورماتور ، کالیبراسیون در حوزهٔ فرکانس



شکل ۹- ۱۴ ب : تحلیل ویژگی ترانسفورماتور؛ کالیبراسیون با واحد pC (اسپکتروم آنالایزر به عنوان فیلتر باند گذر)



شکل ۹- ۱۴پ : تحلیل ویژگی ترانسفورماتور؛ کالیبراسیون با واحد pC (خروجی ثبت شدهٔ ICM برای پالس کالیبراسیون)

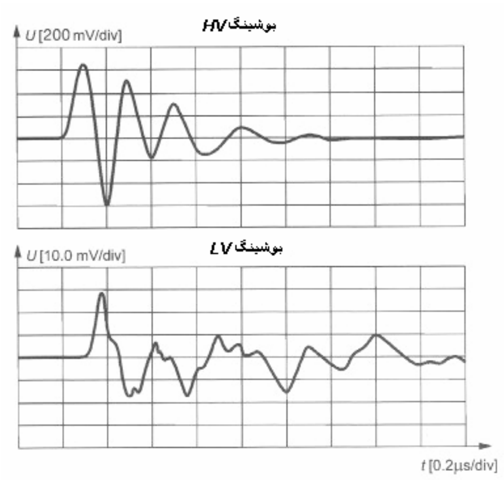


شکل ۹-۱۴ت: تحلیل ویژگی ترانسفورماتور؛ کوپلاژ تزویجی در حوزهٔ فرکانس

مکان یابی

مکان یابی منابع PD بر نظریة زیر استوار است :

سیگنال های الکتریکی PD (پالس های جریان PD) از منبع PD از طریق شبکة RLCM ترانسفورماتور منتشر می شوند، بند ۷ضمیة ۹ را ببینید. پاسخ این شبکه به تحریک پالس جریان PD در هر نقطه از سیستم عایق بندی تنها از بوشینگ قابل آشکارسازی است. پالس های واقعی جریان PD اندازه گیری شده از بوشینگ ها با ویژگی های بدست آمده از فرآیند کالیبراسیون فوق الذکر هم در حوزة فرکانس و هم در حوزة زمان مقایسه می شوند (شکل ۹- ۴) . نظریة انتشار سیگنال های الکتریکی PD از طریق شبکة RLCM ترانسفورماتور در بند ۷ضمیمة ۹ توضیح داده شده است .



شکل ۹- ۱۴ث : تحلیل ویژگی ترانسفورماتور ؛ کوپلاژ تزویجی در حوزة زمان

آنالیز پالس های جریان PD در حوزة فرکانس [216] , [219]

جهت تعیین مقدار نویز زمینه برای کل مدار آزمایش (طیف فرکانسی زمینه) قبل از اندازه گیری PD یک سری داده با استفاده از اسپکتروم آنالیز در حدود U_r ۱۰% از تمام بوشینگ ها ثبت می شود. طیف فرکانسی زمینه به عنوان پایه ای برای تعیین قطعی فعالیت تکراری PD آشکار شده از یک بوشینگ بکار می رود .

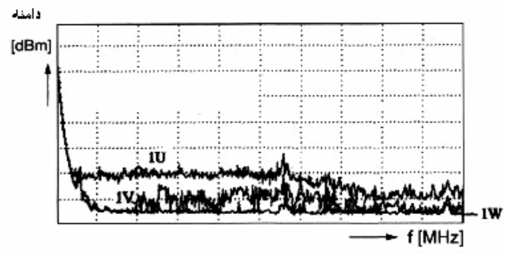
برای هر ولتاژ تست ، طیف فرکانسی بدست آمده و با طیف فرکانسی زمینه مربوط به هر بوشینگ مقایسه می شود. هر فعالیت PD در مدار آزمایش تغییری در طیف فرکانسی زمینه ایجاد می کند (تفسیر چشمی).

سیگنال های PD بسیار نزدیک به بوشینگ فرکانسی شبیه سیگنال کالیبراسیون ایجاد می کنند ، شکل ۹- ۱۵ را ببینید(1U) .

سیگنال های PD رسیده به بوشینگ از طریق شبکة RLCM سیستم عایق بندی ترانسفورماتور ، طیفی با رزونانس های معین تولید می کنند ، شکل ۹- ۱۵ را ببینید (1V) .

مشخصه های اصلی طیف فرکانسی که لازم است آنالیز شوند عبارتند از :

- دامنة طیف توان (power spectrum amplitude) بر حسب dBm
- محدودة فرکانسی طیف توان
- فرکانس های رزونانس نوعی
- قابلیت بازیابی طیف توان



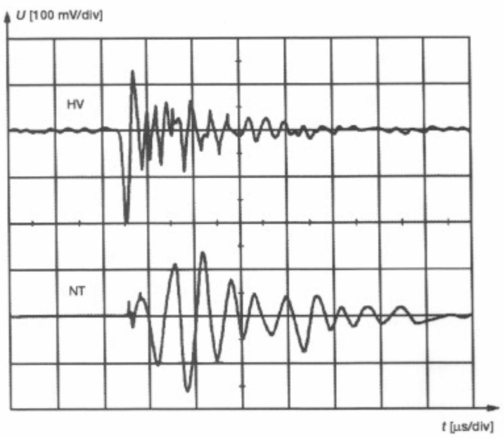
1U = منبع PD نزدیک به بوشینگ
1V = منبع PD کوپل شده از فاز U
1W= نویز زمینه

شکل ۹- ۱۵ : سیگنال واقعی PD در حوزة فرکانس آشکار شده از بوشینگ های مختلف

مقایسة طیف فرکانس سیگنال PD با نتایج تحلیل ویژگی (characterization) ترانسفورماتور اولین سرنخ را برای مکان یابی منبع PD بدست می دهد .

توجه :

آنالیز سیگنال های PD در حوزة فرکانس تنها برای سیگنال های تکراری PD قابل انجام است. سیگنال های PD تکی تنها توسط آشکار ساز پیک قابل ثبت است (سیستم اندازه گیری PD کلاسیک یا پیشرفته) .



HV = منبع PD نزدیک به بوشینگ HV
NT = سیگنال PD کوپل شده به ترمینال نوترال

شکل ۹- ۱۶ : سیگنال واقعی PD در حوزهٔ زمان

آنالیز جریان های PD در حوزهٔ زمان [214]

در کنار آنالیز سیگنال های PD در حوزهٔ فرکانس (اسپکتروم آنالایزر) ، پالس های جریان PD در حوزهٔ زمان نیز آنالیز می شود (اسیلوسکوپ). بلندترین دامنهٔ جریان PD بعنوان سیگنال تریگر به (کانال HV) اسیلوسکوپ و پاسخ شبکهٔ RLCM از سربوشینگ ها برای آنالیز سیستماتیک به کانال دوم (NT) اسیلوسکوپ وصل می شود ، شکل ۹- ۱۶ را ببینید. بعلاوه ضبط همزمان از چهار کانال دیگر ممکن است برای تأیید نتایج قبلی بکار رود .

سیگنال های جریان PD ضبط شده در حوزهٔ زمان دوباره با سیگنال های کالیبراسیون مقایسه می شود (تفسیر چشمی).

سیگنال های PD بسیار نزدیک به بوشینگ از نظر تحلیل زمانی ، سیگنالی مشابه سیگنال کالیبراسیون تولید می کنند ، شکل ۹- ۱۶ (HV) را ببینید .

سیگنال های PD انتقالی به بوشینگ از طریق شبکهٔ RLCM سیستم عایق بندی ترانسفورماتور ، سیگنالی مبتنی بر زمان تولید می کند که با پاسخ فیلتر RLC قابل مقایسه است ، شکل ۹- ۱۶ (NT) را ببینید.

مشخصه های اصلی سیگنال PD مبتنی بر زمان (time resolved) که لازم است آنالیز شود عبارتند از:

- حداکثر دامنهٔ سیگنال جریان PD بر حسب mV
- مدت زمان صعود (rise-time) سیگنال جریان PD
- نوسانات سیگنال جریان PD
- قابلیت بازیابی سیگنال های جریان PD

مقایسهٔ سیگنال های PD ضبط شده در حوزهٔ زمان با نتایج تحلیل ویژگی برای ترانسفورماتور دومین سرنخ را برای مکان یابی منبع PD بدست می دهد .

توجه:

در صورت وجود همزمان منابع PD ، تشخیص بین دو سیگنال جریان PD مختلف با تغییر سطح تریگر امکان پذیر است .

همزمان با اقدام به مکان یابی منبع PD ، نوع فعالیت PD (الگوی PD) به همان روش توضیح داده شده در بخش ۹- ۷ بطور پیوسته آنالیز می شود .

۹- ۹- ۲ آنالیز نهایی نتایج

قبل از هرگونه تصمیم گیری در مورد مراحل بعدی فرآیند جستجو ، تمام نتایج بدست آمده در طی جستجوی دقیق منبع PD در شرایط مختلف تست ، بایستی آنالیز گردد (۴ ساعت کار برای یک شخص با تجربه). آنالیز عمقی تمام نتایج به نحو قابل اطمینانی ، نوع منبع PD (الگوی PD) را تعیین کرده ، اطلاعاتی را راجع به مکان عیب PD بدست می دهد . ایده ای کلّی در این مورد که منبع PD تا چه اندازه برای سیستم عایق بندی ترانسفورماتور خطرناک است نیز حاصل می شود .

رفتار منبع PD در طی فرآیند جستجو ، تشخیص بین PD خطرناک و غیر خطرناک را ممکن می کند. دامنهٔ بار ظاهری همیشه معیاری قابل استناد برای تصمیم فوق نیست ، بند ۳ ضمیمهٔ ۹ را ببینید.

برای سیستم عایق بندی ترانسفورماتور ، منابع PD خطرناک عبارتند از:

- منبع PD با ولتاژ شروع زیر U_r ۱۰۰%
- منبع PD با ولتاژ قطع زیر U_r۱۰۰%
- منبع PD درون عایق جامد
- منبع PD با الگوی دائماً در حال تغییر
- منبع PD که دامنهٔ بار ظاهری آن با گذشت زمان اعمال ولتاژ افزایش می یابد
- منبع PD که تعداد سیگنال های PD آن در هر سیکل با گذشت زمان اعمال ولتاژ افزایش می یابد

و منابع PD کم خطرتر عبارتند از:

- منبع PD با ولتاژ شروع بالاتر از سطح حفاظت (برق گیرهای خارجی) در خط تغذیه
- منبع PD با ولتاژ قطع بالای U_r۱۰۰%
- حباب گاز در روغن
- منبع PD با الگوی PD ثابت
- منبع PD که تعداد سیگنال های PD آن در هر سیکل با گذشت زمان اعمال ولتاژ کاهش می یابد

حصول موفقیت آمیز نتیجه برای مشکل PD در نهایت با مذاکره و هم فکری با مهندسین طراحی و تولید بدست می آید .

بر اساس این مذاکرات اقدامات بعدی ممکن است شامل مراحل زیر باشد :

- کالیبراسیون
- جستجوی بیشتر منبع PD در آزمایشگاه
- تغییر وضعیت منبع PD
- خشک کردن مجدد عایق ترانسفورماتور
- اصلاح ناحیهٔ ضعیف تعیین شده (دلیل عیب PD)
- دمونتاژ ترانسفورماتور

مدار تست القایی سه فاز به همراه اندازه گیری تخلیهٔ جزئی

۹- ۱۰ عدم قطعیت اندازه گیری

مقادیر کالیبره شدهٔ بدست آمده از اندازه گیری بار ظـاهری بـر حسـب pC و نیـز RIV بر حسب µV فقط در صورت نزدیک بودن عیب PD به بوشینگ معتبـر هسـتند. بـرای تمام معایب PD دور از بوشینگ ، عدم قطعیت ممکن است بیشتر از ۵۰ % باشد (بند ۳ ضمیمهٔ ۹) .

بدلیل ناشناخته بودن پدیدهٔ رزونـانس در مـدار آشکارسـازی PD (بوشـینگ ، امپـدانس اندازه گیری ، کابل اندازه گیری و فیلتر باند گذر مربوط بـه سیسـتم انـدازه گیـری) ، در صورت مساوی بودن فرکانس مرکزی فیلتـر باریـک بانـد گـذر (معمـولاً ۱ MHz) بـا فرکانس رزونانس مدار اندازه گیری PD ، ممکـن اسـت سیسـتم RIV نتـایجی گمـراه کننده بدست دهد (بند ۲ ضمیمهٔ ۹) .

تبدیل دقیق مقادیر اندازه گیری شدهٔ ولتاژ تداخل برحسبµV بـه بـار ظـاهری مربوطـه تنها در موارد خاصی ممکن است (بند ۲ ضمیمهٔ ۹) .

ضمیمهٔ ۹ :
اندازه گیری تخلیهٔ جزئی

ضمیمهٔ ۹- ۱ فیزیک تخلیهٔ جزئی

تخلیهٔ جزئی (PD) عبارت است از شکست الکتریکی موضعی در ناحیه ای ضعیف از سیستم گستردهٔ عایق بندی (شکل ۹- ۱۷) .

شکست الکتریکی در مادهٔ عایقی بین دو الکترود بدین معنی است که فاصلهٔ بین دو الکترود توسط بارهای الکتریکی پل شده است (مقاومت اهمی بزرگ به مقاومت اهمی کوچک تبدیل شده است) . شکست الکتریکی در صورت برقراری شرایط زیر روی می دهد:

- میدان الکتریکی موضعی E با واحد kV/mm بزرگتر از شدت میدان شکست E_b با واحد kV/mm برای یک مادهٔ عایقی معین گردد (مقادیر متفاوت برای مواد عایقی مختلف)
- الکترون های آغازگر موجود باشد

برای میدان الکتریکی یکنواخت در عایق اصلی بین سیم پیچ ها (شکل ۹- ۱۷) شدت میدان شکست E_b با رابطهٔ زیر تعریف می شود :

$$E_b = \frac{V_b}{d}$$

که در آن :

E_b = شدت میدان شکست با واحد kV/mm

V_b = ولتاژ شکست با واحد kV

d = فاصلهٔ دو الکترود با واحد mm

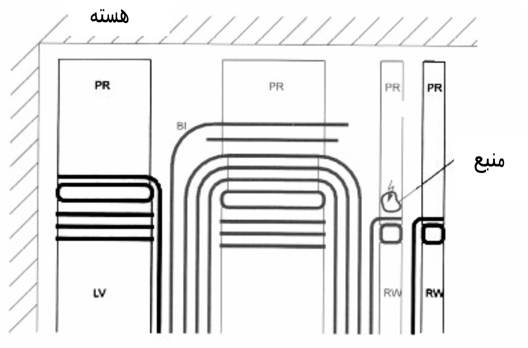
توجه:

نقاط زیادی در سیستم عایق بندی ترانسفورماتور موجود است که میدان الکتریکی- غیر همگن دارند ، شکل ۹- ۱۷ را ببینید. در این نقاط میدان الکتریکی همگن محاسبه شده بایستی در ضریب شکل الکترود ضرب گردد تا میدان الکتریکی ماکزیمم تخمین زده شود .

هنگام طراحی ترانسفورماتور ، حداکثر شدت میدان الکتریکی مناطق بحرانی بایستی با برنامه های تحلیل میدان محاسبه شود.

مکانیزم های فیزیکی زیر موجب شکست الکتریکی بین دو الکترود می شود : [220], [111]

- تولید الکترون های اولیه برای شروع شکست الکتریکی
- ازدیاد تصاعدی بار و پدیدهٔ انتقال برای پر کردن فاصلهٔ بین الکترون ها
- پدیدهٔ ذخیرهٔ بار (charge storage) برای پشتیبانی شکست الکتریکی بعدی (اثر حافظه ای منبع PD)



PR = پرس رینگ
BI = دیوارهای عایقی
LV = فشار ضعیف
HV = فشار قوی
RW = سیم پیچ تنظیم ولتاژ

شکل ۹- ۱۷ : منبع PD در سیستم عایق بندی ترانسفورماتور

تولید الکترون های اولیه

تولید الکترون های اولیه به شرایط زیر بستگی دارد :

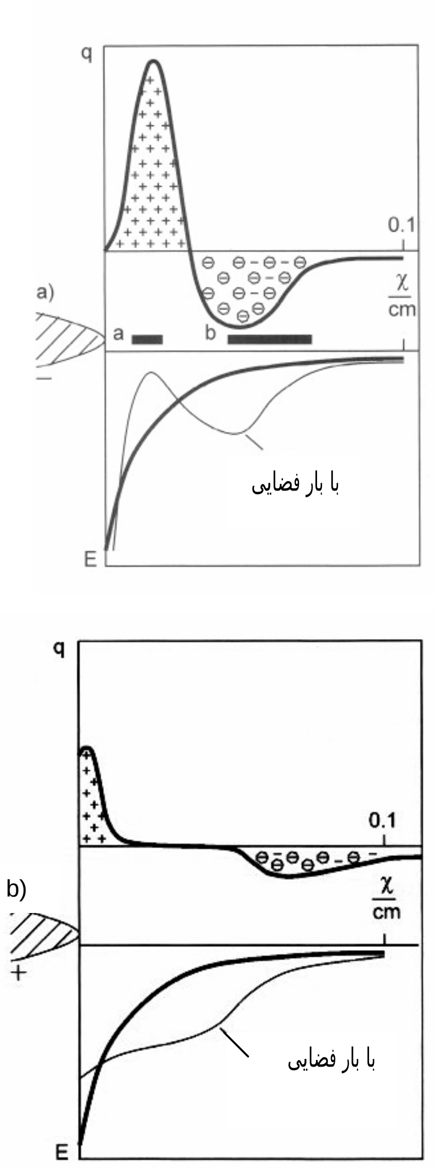
- حداکثر میدان الکتریکی E_{max}
- جنس الکترود (هادی ، غیر هادی)
- شکل الکترود (میدان الکتریکی همگن یا غیر همگن)
- وضعیت سطح الکترود (بدون پوشش یا پوشیده با مادة عایقی)
- ناصافی سطح (الکترودهای بسیار ریز سوزنی)

بهترین شرایط تولید الکترون های آغازگر برای یک سوزن فلزی بدون پوشش مطابق شکل ۹- ۱۸ پیش می آید. اگر اندازة میدان الکتریکی موضعی E از مقدار صدور میدانی (field emission) مادة بخصوص تجاوز کند ، الکترون های آغازگر در اثر پدیدة صدور میدانی از روی سطح تولید می شوند. فعالیت PD به محض برقراری میدان الکتریکی موضعی شروع می شود.

محلی که تولید الکترون های آغازگر در آنجا به سختی ممکن است ، ناحیة ضعیف بدون تماس با الکترودهای فلزی ، مطابق شکل ۹- ۹می باشد. در این موقعیت ، الکترون های آغازگر توسط یونیزاسیون رادیواکتیو (تشعشات کیهانی ، اشعه X و غیره) تولید می شود. بدلیل عدم وجود الکترون های آغازگر ، حتی در صورت عبور از ولتاژ شروع ، فعالیت PD با تأخیر آغاز می شود (تا چندین دقیقه).

توجه:

برا ی منبع PD درون سیستم عایق بندی ترانسفورماتور ، الکترود ممکن است یا سطح تماس بین دو مادة عایقی مختلف (برای مثال عایق جامد با حباب گاز) و یا یک مادة هادی (برای مثال مس پوشیده شده با عایق کاغذ) باشد .



E = میدان الکتریکی
X = فاصله از الکترود

شکل ۹- ۱۸ : توزیع بار (منحنی بالا) و توزیع میدان الکتریکی (منحنی پائین) برای الکترود تیز منفی (شکل بالا، a) و برای الکترود تیز مثبت (شکل پائین ، b)

ازدیاد تصاعدی بار و فرآیند انتقال آن

ازدیاد تصاعدی بار و فرآیند انتقال (شکل ۹- ۲۰) بر اساس مکانیزم بهمنی بـا فرمـول زیر صورت می گیرد :

$$n = n_0 e^{\alpha d}$$

که در آن :

n = تعداد الکترون ها در فاصلهٔ d

d = فاصلهٔ بین الکترودها

n_0 = تعداد الکترون های آغازگر موجود

$e^{\alpha d}$ = بهمن الکترون

بهمن الکترون تنها هنگامی موجب شکست الکتریکی (پر شدن فضای بـین الکترودهـا) می شود که شرط زیر برقرار شود :

$$e^{\alpha d} \approx 10^7$$

که در آن :

α = ضریب یونیزاسیون تابع میدان الکتریکی موضعی E

d = فاصلهٔ بین الکترود ها

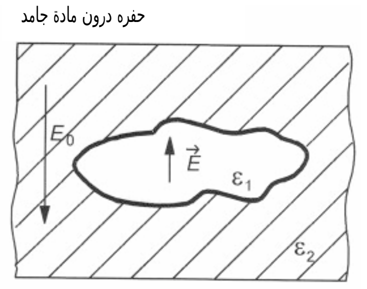
ایجاد هر دو فرآیند فیزیکی فوق الذکر زمان بر است (تأخیر زمـانی شکسـت) شـــکل ۹- ۲۱ را ببینید. در طی این زمان ، ولتـاژ اعمـالی (یعنـی میـدان الکتریکـی موضـعی) بایستی ثابت بماند .

پارامترهای تشدید کنندهٔ فعالیت PD در ناحیهٔ ضعیف سیستم عایق بندی عبارتند از :

- تجاوز میدان الکتریکی موضعی از مقدار نامی طراحی شده (ضریب α)
- کافی بودن بزرگی ناحیهٔ ضعیف (حباب) (فاصلهٔ بین الکترودها در ناحیهٔ ضعیف)
- کافی بودن زمان اعمال ولتاژ (میدان الکتریکی موضعی) برای ایجاد فرآیند تخلیه

توجه :

برای آشکارسازی منبع PD خطرناک در سیستم عایق بندی ترانسفورماتور ، مدت زمان اعمال ولتاژ تست بایستی برای انجام فرآیند شکست فوق الذکر کافی باشد .

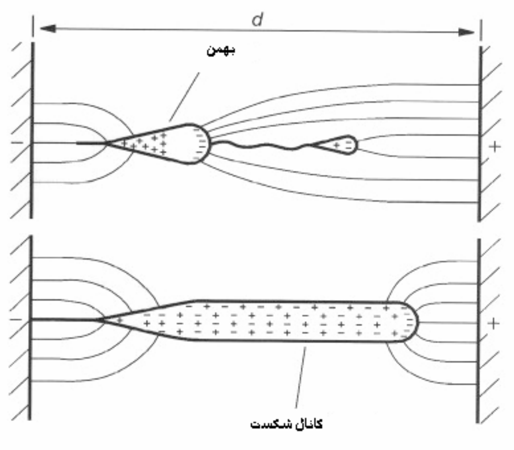


$\vec{E}$ = میدان الکتریکی موضعی

E_0 = میدان الکتریکی

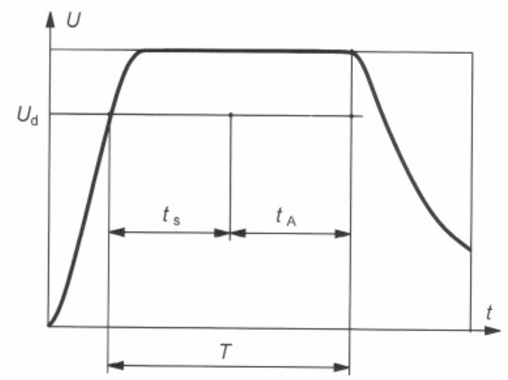
ε = هدایت ویژهٔ عایقی ماده

شکل ۹- ۱۹ : عیب PD بدون الکترود



d = فاصلهٔ بین الکترودها

شکل ۹- ۲۰ : ایجاد شکست الکتریکی



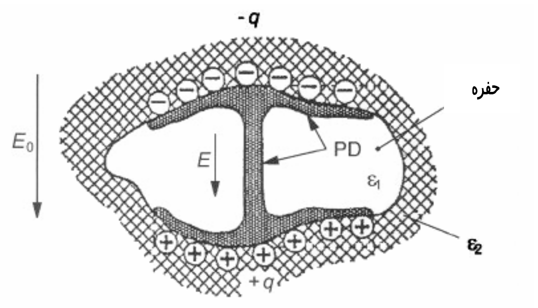
T = تأخیر زمانی کل

t_S = الکترون های آغازگر

t_A = بهمن

U_d = ولتاژ شکست آماری

شکل ۹- ۲۱ : تأخیر زمانی شکست الکتریکی



q = بار
E = میدان الکتریکی موضعی
PD = تخلیهٔ الکتریکی
E_0 = میدان الکتریکی
$\varepsilon_1, \varepsilon_2$ = هدایت ویژهٔ عایقی مولکول ها

شکل ۹-۲۲ : نمایش شماتیک ذخیرهٔ بار

ذخیرهٔ بار

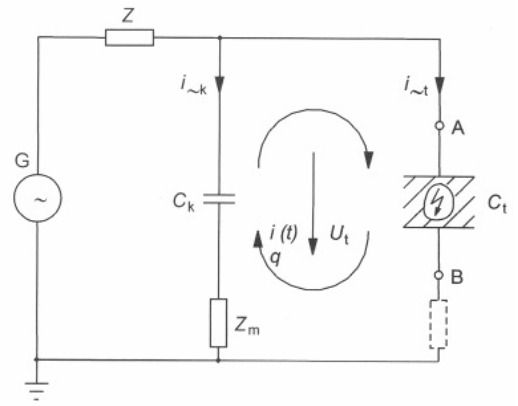
مکانیزم ذخیرهٔ بار در نواحی ضعیف و بدون تماس با الکترودهای هادی (حباب در سیستم عایق بندی) اهمیت می یابد ، شکل ۹- ۲۲ را ببینید. مکانیزم های ذخیره و رهایی (de-trapping) بار وقوع شکست الکتریکی در ناحیهٔ ضعیف را بشدت تحت تأثیر قرار می دهد. نرخ تکرار پالس های PD (نوع PD الگوی ۵ جدول ۳) پیوسته در حال تغییر است. پدیدهٔ فیزیکی ناشی از مکانیزم ذخیرهٔ بار از روی الگوهای PD ضبط شده در طی تست بلند مدت (چندین ساعت با ولتاژ تست ثابت) قابل مشاهده است . نرخ تکرار در حال افزایش ، تأیید کنندهٔ آسیب رسیدن به عایق های مجاور منبع PD بطور پیوسته می باشد .

توجه :

این مقدمهٔ کوتاه در مورد فیزیک تخلیهٔ جزئی نشان می دهد که شکست الکتریکی در مواد عایقی از رفتار آماری (تصادفی یا احتمالی) مکانیزم های تخلیه ، شدیداً تأثیر می پذیرد. برای تفسیر نتایج PD نه تنها در نظر گرفتن دامنهٔ بار ظاهری ، بلکه آنالیز رفتار آماری منبع PD اهمیت دارد . آنالیز آماری فعالیت PD با استفاده از سیستم پیشرفتهٔ PD (آنالایزر تخلیهٔ جزئی وابسته به فاز) انجام می گیرد ، بند ۵ ضمیمهٔ ۹ را ببینید .

ضمیمهٔ ۹- ۲ اساس شبه انتگرال گیری

سیگنال PD معمولاً بصورت جریان $i(t)$ عبوری از امپدانس Z_m [212] آشکار می شود ، شکل ۹- ۲۳ را ببینید .



C_t = ظرفیت خازنی موردآزمایش
C_k = خازن کوپلاژ
G = منبع ولتاژ
$i(t)$ = پالس جریان PD
$i_{\sim k,\sim t}$ = جریان های جابجایی
Z = اتصال منبع ولتاژ
q = بار انتقالی
U_t = ولتاژ خازن های موازی

شکل ۹- ۲۳ : مدار معادل اندازه گیری PD

استانداردهای بین المللی (IEC 60270) [26] اندازه گیری بار ظاهری را لازم می دانند :

$$q = \int i(t)dt$$

که در آن :

q = بار ظاهری بر حسب pC
$i(t)$ = سیگنال جریان PD

انتگرال گیری پالس های جریان ممکن است در حوزهٔ زمان (اسیلوسکوپ دیجیتال) یا در حوزهٔ فرکانس (فیلتر باند- گذر) انجام گیرد. اکثر سیستم های PD موجود در بازار بر اساس " شبه انتگرال گیری" از پالس های جریان PD در حوزهٔ فرکانس با استفاده از فیلتر " پهن باند" یا "باریک- باند" کار می کنند .

انتگرال گیری پالس های غیر متناوب جریان PD در حوزهٔ فرکانس با استفاده از فیلتر باند گذر با فرض زیر انجام شده است ، شکل ۹- ۲۴ را ببینید [109] :

$$q = F(0) = F(f)$$

که در آن:

q = بار ظاهری

$F(0)$ = طیف فرکانسی دامنه در فرکانس f = 0Hz

$F(f)$ = طیف فرکانسی دامنه در فرکانس f Hz

مطابق شکل ۹- ۲۴ ، محدوده فرکانسی در حالتی که چگالی دامنهٔ طیفی ثابت باشد (constant spectral amplitude density) ، یعنی برای انتگرال گیری صحیح پالس های PD در حوزهٔ فرکانس ، به شکل پالس PD بستگی دارد [109] .

برای پالس PD با زمان پیشانی T_1 = ۱ μs و زمان پشت موج ۵ μs = T_2 ، محدودهٔ فرکانسی برای $F(f) = F(0)$ حدود ۵ kHz است. بنابراین برای سیستم های PD بر اساس " شبه انتگرال گیری " پالس های PD ، فرکانس قطع پائین (lower cut-off frequency) f_1 باید در حد امکان کم باشد (محدودهٔ kHz) ، در غیر این صورت اندازه گیری صحیح غیر ممکن خواهد بود .

سیستم اندازه گیری PD " پهن- باند" شامل یک فیلتر باند گذر با فرکانس های قطع پائین و بالای f_1 و f_2 می باشد (شکل ۹- ۲۵) [212] . مقادیر پیشنهادی مطابق IEC 60270 [26] عبارتند از ۵۰ kHz = f_1 و ۱۵۰-۴۰۰ kHz = f_2 .

اگر فرکانس مرکزی f_0 فیلتر بر محدودهٔ فرکانسی پالس جریان منطبق گردد دامنهٔ پاسخ فیلتر پهن- باند به تحریک توسط هر پالس جریان PD ، S_{max} با بار ظاهری q متناسب خواهد بود که در این صورت $F(f) = F(0)$ ، شکل ۹- ۲۴ را ببینید .

نمونهٔ پاسخ فیلتر پهن- باند در شکل ۹- ۲۶ ارائه شده است [109] . برای دامنه داریم:

$$S_{max} \sim F(0) = q$$

که در آن :

S_{max} = حداکثر دامنهٔ پاسخ فیلتر

q = بار ظاهری

$F(0)$ = طیف فرکانسی دامنه در فرکانس f = 0Hz

برای فرکانس مرکزی داریم :

$$f_0 = \frac{f_1 + f_2}{2}$$

که در آن :

f_0 = فرکانس مرکزی فیلتر باند گذر

f_1 = فرکانس قطع پائین فیلتر باند گذر

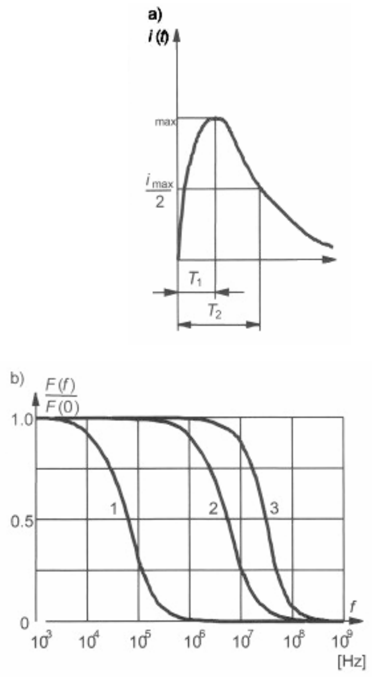
f_2 = فرکانس قطع بالای فیلتر باند گذر

مزایای سیستم PD پهن- باند عبارتند از :

- تشخیص پلاریته مثبت و منفی پالس های جریان PD
- قابلیت تفکیک بالا برای پالس های تکراری ، با فرض فیلتری با مدت پاسخ τ بین ۲ μs و ۵ μs ، پالس های PD با فرکانس تکرار تا ۱۰۰ kHz نیز قابل تفکیک است

معایب سیستم PD پهن- باند عبارت است از :

- حساسیت به نویز خارجی (نامناسب برای آزمایشگاه های بدون حفاظ الکترومغناطیسی)



a) پالس های جریان PD ایده آل

$i(t)$ = پالس های PD

T_1 = زمان تا I_{max}

T_2 = زمان نصف موج

b) چگالی دامنهٔ طیفی نرمالیزه شده

1 T_1/ T_2 =۱ µs /۵ µs

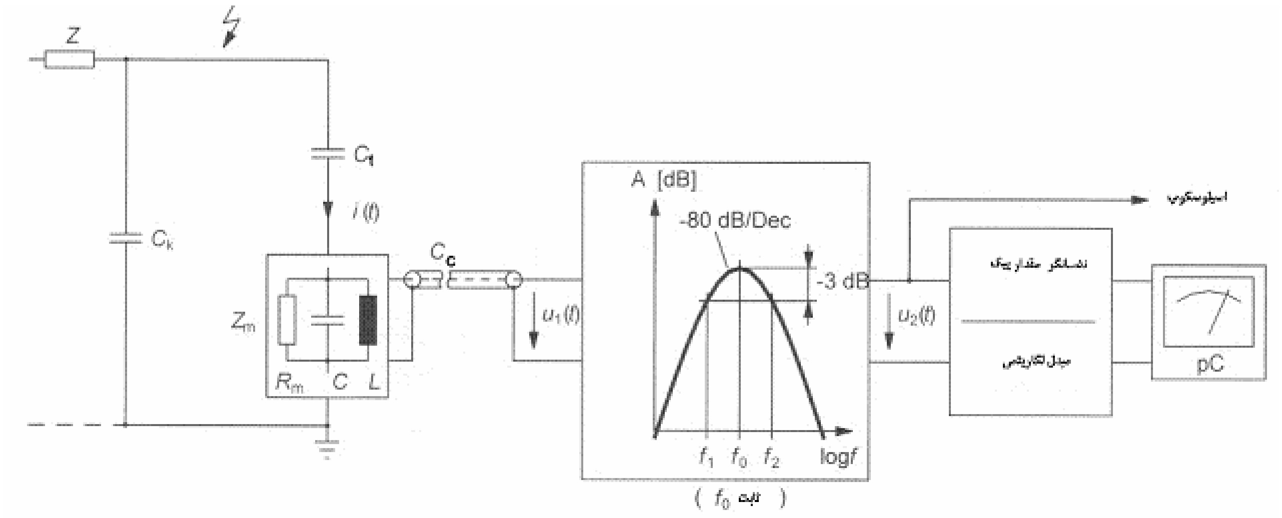
2 T_1/۵T_2 = ۵ ns / ۵۰ ns

3 T_1/۵T_2 = ۵ ns / ۱۵ ns

$F(0)$ = طیف فرکانسی دامنه در فرکانس f = 0Hz

$F(f)$ = طیف فرکانسی دامنه در فرکانس f Hz

شکل ۹- ۲۴ : شبه انتگرال پالس های PD



Z = اتصالات منبع ولتاژ
C_k = خازن کوپلاژ
C_t = ظرفیت خازنی مورد آزمایش
Z_m = امپدانس اندازه گیری (نوع R,L,C)
C_c = ظرفیت خازنی کابل اندازه گیری
$i(t)$ = پالس جریان PD
$u_1(t)$ = پاسخ امپدانس اندازه گیری Z_m
$u_2(t)$ = پاسخ فیلتر باند گذر
f_1 = فرکانس قطع پائین فیلتر باندگذر
f_2 = فرکانس قطع بالای فیلتر باندگذر
f_0 = فرکانس مرکزی فیلتر باندگذر

شکل ۹- ۲۵ : فیلتر پهن- باندگذر

سیستم اندازه گیری PD " باریک- باند" ، شکل ۹- ۲۷ را ببینید [212] ، شامل یک فیلتر باند- گذر با فرکانس مرکزی f_0 و پهنای باند باریک Δf (بین ۳ kHz و ۳۰ kHZ) می باشد . مقادیر مورد پذیرش IEEE C57.12.90.1999 [51] عبارتند از :

- فرکانس مرکزی f_0 بین ۰/۸۵ MHz و ۱/۱۵ MHz (۱ MHz پیشنهادی)
- پهنای باند Δf بین ۳ kHz و ۱۰kHz (۹kHz پیشنهادی)

اگر فرکانس متغیر مرکزی f_0 بر محدودة فرکانسی پالس جریان منطبق شود ، دامنه S_{max} (شکل ۹- ۲۸) پاسخ فیلتر باریک- باند به تحریک توسط هر پالس جریان PD با بار ظاهری q متناسب می گردد که در این صورت $F(f) = F(0)$ ، (شکل ۹- ۲۴) .

نمونة پاسخ فیلتر باریک- باند در شکل ۹- ۲۸ ارائه شده است [109] .

مزیت سیستم PD باریک- باند عبارتند از:

- حساسیت کمتر به منابع نویزخارجی PD (مناسب برای آزمایشگاه های HV بدون حفاظ الکترومغناطیسی)

معایب سیستم PD باریک- باند عبارتند از:

- عدم امکان تشخیص پلاریتة پالس های PD (نوسان سیگنال با فرکانس مرکزی f_0)
- تشخیص پائین برای پالس های PD تکراری ، با فرض فیلتری با مدت پاسخ $\tau' \sim ۲۰۰$ µs ، فقط پالس PD با فرکانس تکرار ۴ KHz قابل تشخیص است

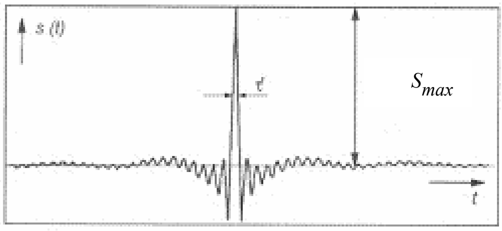
مدت پاسخ فیلتر باریک- باند به ورودی پالس جریان PD تقریباً برابر است با :

$$\tau' \approx \frac{2}{\Delta f}$$

که در آن :

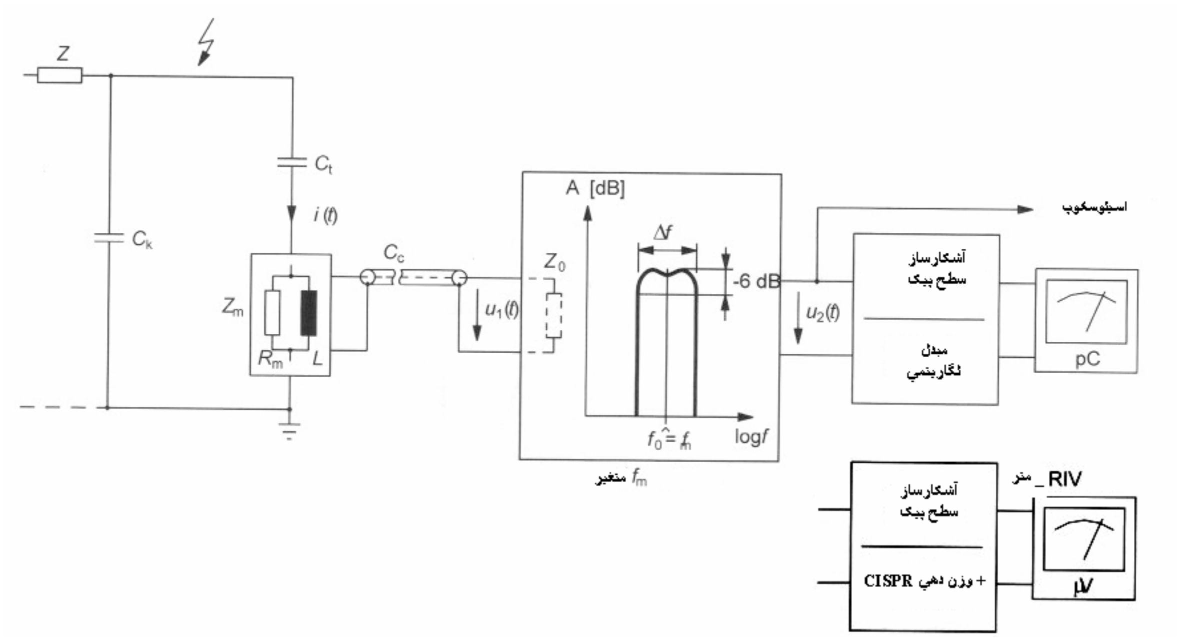
τ' = مدت پالس (پاسخ فیلتر)

Δf = پهنای باند فیلتر



S_{max} = حداکثر دامنه
τ' = مدت پالس (پاسخ فیلتر)

شکل ۹- ۲۶ : نمونة پاسخ فیلتر پهن باندگذر



Z = اتصالات منبع ولتاژ
C_k = خازن کوپلاژ
C_t = ظرفیت خازنی مورد آزمایش
Z_m = امپدانس اندازه گیری (نوع R,L,C)
C_C = ظرفیت خازنی کابل اندازه گیری
$i(t)$ = پالس جریان PD
$u_1(t)$ = پاسخ امپدانس اندازه گیری Z_m
$u_2(t)$ = پاسخ فیلتر باند گذر
f_0 = فرکانس مرکزی فیلتر باندگذر= f_m (متغییر)

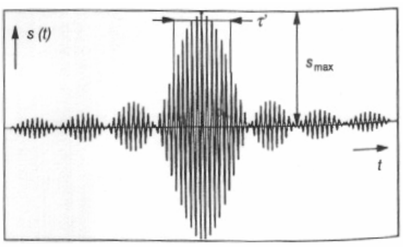
شکل ۹-۲۷ : فیلتر باریک باند گذر

سیستم PD با اندازه گیری RIV (RIV-meter = دستگاه اندازه گیری شدت میدان یا نویز رادیویی) پیشنهادی استاندارد IEEE C57.12.90-1999 ، [51] فیلتری باند- گذر است که شامل مدار وزن دهی (weighting) CISPR (با منحنی غیر خطی psophometric ، مطابق شکل ۹- ۲۹) برای کمیت دهی به اندازة پالس های تکراری می باشد. خواندة این نوع دستگاه اندازه گیری نه تنها به دامنة بار ظاهری بلکه به نرخ تکرار پالس ها ی PD بستگی دارد .

برای یک پالس PD با دامنه ثابت و نرخ تکرار متغیر، خواندة دستگاه اندازه گیری RIV با مدار وزن دهی CISPR با افزایش نرخ تکرار تا n =۱۰۰ پالس بر ثانیه بطور خطی افزایش می یابد (شکل ۹- ۲۹) [109] . با نرخ تکرار پالس بزرگتر از ۴۰۰۰ پالس در ثانیه ، که مطابق تفکیک زمانی پالس فیلتر باریک- باند ۲۲۰ µS = τ با Δf =۱۰ kHz می باشد ، خواندة دستگاه بلا استفاده می گردد .

بدلیل وجود مدار وزن دهی CISPR ، ارتباطی بین خواندة pC و µV وجود ندارد . تنها در صورت وقوع پالس های هم دامنه در نیم سیکل های مثبت و منفی ، انجام این تبدیل امکان پذیر است . با نرخ تکرار دو برابر هر سیکل (n =۱۰۰ در سیستم ۵۰ Hz) و امپدانس اندازه گیری ۶۰ Ω ، رابطة ۲/۶ pC = ۱ µV برقرار است .

توجه:
برای منابع PD دور از بوشینگ داخل سیستم عایق بندی ترانسفورماتور (برای مثال در عایق بندی اصلی) ، پالس های جریان PD کاملاً توسط شبکة RLCM ترانسفورماتور تضعیف می شود ، در صورت بالاتر بودن فرکانس قطع پائین f_1 فیلتر پهن- باند (۵۰ kHz پیشنهادی) یا فرکانس مرکزی f_0 فیلتر باریک باند (۱MHz پیشنهادی) از محدودة فرکانسی پالس های تضعیف شدة PD ، $F(f) = F(0)$ در شکل ۹- ۲۴، این پالس های تضعیف شده ممکن است خارج از محدودة سیستم اندازه گیری PD واقع شود . در این حالت ، " شبه انتگرال گیری" درست نیست و دامنة بار ظاهری دیگر بر S_{max} انطباق ندارد .



S_{max} = حداکثر دامنه
τ' = مدت پالس (پاسخ فیلتر)

شکل ۹- ۲۸ : نمونة پاسخ فیلتر باریک باندگذر

ضمیمهٔ ۹- ۳ بار واقعی ، بار ظاهری و بار قابل اندازه گیری

تخلیهٔ جزئی را می توان حرکت سریع بار الکتریکی از یک نقطه به نقطهٔ دیگر دانست. برای تغییرات خیلی سریع یا در طی اولین لحظه پس از حرکت بار ، ارتباط سری عایق های مجزا بین دو ترمینال خط را می توان با اتصال سری تعدادی خازن شبیه سازی کرد .

اگر دو ترمینال خط توسط یک خازن بیرونی C_k به هم وصل شود ، حرکت بار در ارتباطات عایقی (خازن ها) با اتصال سری در بار خازن بیرونی C_k نیز منعکس می شود. حرکات بار به شکل پالس های جریان در گردش ، از طریق امپدانس اندازه گیری Z_m در مدار معادل ، آشکار می شود (شکل ۹- ۲۳) .

شکل ۹- ۳۰ نمودار شماتیک منبع PD (خازن C_1) در سیستم عایق بندی (خازن های C'_3 و C'_2) و مدار معادل مربوطه را نشان می دهد [212] .

اگر فرض شود که منبع PD حفره ای کوچک در عایق جامد باشد ، نسبت زیر بین خازن ها برقرار است

$$C_t \approx C'_3 >> C_1 >> C'_2$$

تخلیهٔ الکتریکی در حفره (خازن C_1) معادل جفت گوی F و مقاومت R_1 است .

تخلیهٔ الکتریکی در حفره ، جریان PD $i_1(t)$ را ایجاد می کند ، که جریانی موضعی می باشد و قابل اندازه گیری از بوشینگ نیست. افت ولتاژ $\varDelta U_1$ در حفره در اثر جریان تخلیه $i_1(t)$ بوجود می آید و" بار Δq_1 = بار واقعی " را آزاد می کند .

$$\varDelta q_1 = \varDelta U_1 C_1$$

تخلیهٔ C_1 موجب انتقال سریع بار در خازن های C'_2 و C'_3 می شود. این انتقال بار موجب افت ولتاژ قابل اندازه گیری $\varDelta U_t$ در ظرفیت خازنی مورد آزمایش C_t (در اتصال سیم پیچ به بوشینگ) می شود .

$$\varDelta U_t = \varDelta U_1 \frac{C'_2}{C'_3 + C'_2}$$

$$C_t = C'_3 + \frac{C_1 C'_2}{C_1 + C'_2}$$

با فرض:

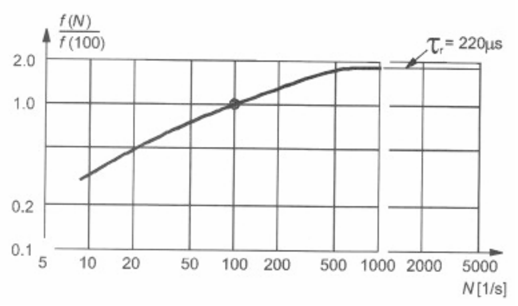
$$C_t \approx C'_3 >> C_1 >> C'_2$$

بار قابل اندازه گیری q_t از لحاظ نظری عبارت است از:

$$q_t \approx q_3$$

$$q_3 = \varDelta U_3 C_t$$

$$\varDelta U_t = \varDelta U_3$$



$f(N)$ = تغییردر خواندهٔ دستگاه اندازه گیری
N = نرخ تکرار پالس

شکل ۹-۲۹ : مشخصهٔ وزن دهی CISPR برای توالی متناوب پالس با دامنهٔ ثابت

$$q_3 = \Delta U_1 \frac{C_2'}{C_3' + C_2'}\left(C_3' + \frac{C_1 C_2'}{C_1 + C_2'}\right)$$

$$\Delta U_1 = \frac{\Delta q_1}{C_1}$$

$$q_3 \approx \frac{\Delta q_1 C_2'}{C_1 C_3'} C_3'$$

$$q_3 \approx \Delta q_1 \frac{C_2'}{C_1} = q_t$$

درهر سیستم عایق بندی گسترده مقدار ΔU_t در محدودهٔ میلی ولت است ، در حالیکه اندازهٔ ΔU_1 (در منبع PD) ممکن است در محدودهٔ کیلو ولت باشد. بار از لحاظ نظری قابل اندازه گیری q_t از طریق خازن های C_1 و C_2' با بار واقعی ارتباط دارد و طبق تعریف بار ظاهری نام دارد. بدلیل اینکه مکان منبع PD ناشناخته است ، تخمین خازن های C_1 و C_2' ممکن نیست ، بنابراین بار ظاهری (بار از لحاظ نظری قابل اندازه گیری q_t در بوشینگ) دارای ارتباط تعریف شده با بار واقعی q_1 در مکان منبع PD نیست .

حساسیت اندازه گیری :

در هر مدار تست PD بار قابل اندازه گیری واقعی q_m (انتگرال جریان PD گردشی $i(t)$) به نسبت خازن کوپلاژ C_k به ظرفیت خازنی مورد آزمایش C_t وابسته است ، شکل ۹- ۳۱ را ببینید .

فرآیندهای انتقال بار بین خازن های C_t و C_k موجب افت ولتاژ جزئی برابر ΔU_{res} می شود . اگر فعالیت PD در ترانسفورماتور مورد آزمایش (C_t) وجود داشته باشد ، بار قابل اندازه گیری واقعی q_m آزاد شده توسط خازن کوپلاژ C_k بطور تخمینی برابر است با:

$$q_m = C_k . \Delta U_{res}$$

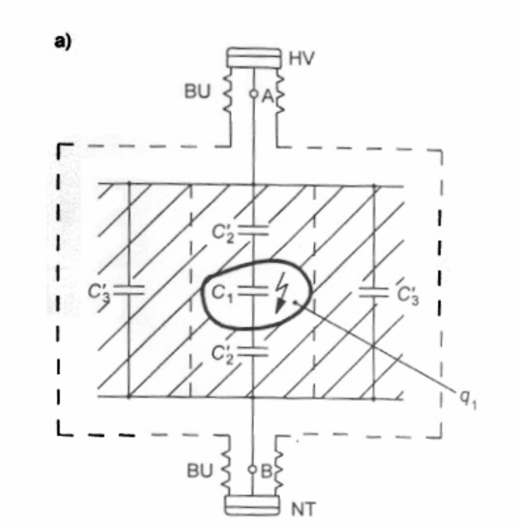
بار ظاهری q_t عبارت است از :

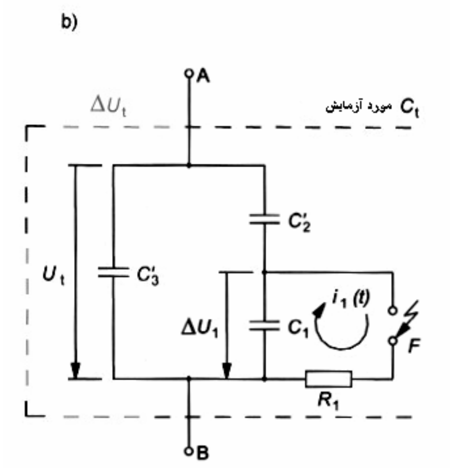
$$q_t = C_t \Delta U_t = (C_t + C_k)\Delta U_{res}$$

نسبت بار قابل اندازه گیری واقعی q_m به بار ظاهری q_t (بار قابل اندازه گیری از لحاظ نظری) با رابطهٔ زیر تعیین می شود:

$$\frac{q_m}{q_t} = \frac{C_k}{C_t + C_k}$$

برای بهبود حساسیت اندازه گیری PD ، لازم است یک خازن کوپلاژ بسیار بزرگ در مدار قرار گیرد (شکل ۹- ۳۱) [212] . در مدار PD ترانسفورماتورهای قدرت ، مقدار خازن کوپلاژ با نوع بوشینگ تعیین می شود (از ۲۰۰ تا ۶۰۰ pF) . حساسیت هر مدار PD پس از انجام فرآیند کالیبراسیون تعیین می شود .





BU = بوشینگ
HV = فشار قوی
NT = ترمینال نوترال
C_1 = ناحیهٔ ضعیف
C_t = خازن های مورد آزمایش (C'_3 و C'_2)
U_t = ولتاژ تست
F = شبیه سازی منبع PD
R_1 = مقاومت میرا کننده
ΔU_1 = افت ولتاژ داخلی ناشی از PD
ΔU_t = افت ولتاژ قابل اندازه گیری از بوشینگ
$i_1(t)$ = پالس موضعی جریان PD

شکل ۹- ۳۰ : سیگنال های قابل آشکارسازی PD
a) نمایش شماتیک بخشی از عایق ترانسفورماتور
b) مدار معادل عیب PD در سیستم عایق بندی

حداکثر حساسیت برای آشکارسازی ، پالس جریان $i(t)$ جبران ساز PD با $C_k >> C_t$ حاصل می شود (C_k =۱۰۰ C_t ، شکل ۹- ۳۱ را ببینید) . با کاهش مقدار خازن کوپلاژ C_k ، بدلیل پائین آمدن جریان جبران ساز $i(t)$ ، حساسیت مدار PD کمتر می شود .

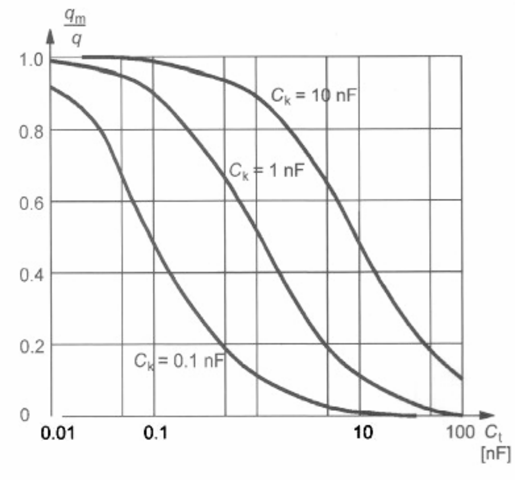
حداقل خازن کوپلاژ هر مدار تست PD عبارت است از خازن پراکندگی C_s الکترود پتانسیل HV نسبت به زمین. هر مدار تست PD با استفاده از C_s به عنوان خازن کوپلاژ حساسیت بسیار پائینی دارد زیرا $C_s << C_t$.

از لحاظ نظری بار ظاهری قابل اندازه گیری q_m در خروجی یک سیستم RIV بدون مدار وزن دهی CISPR هم دامنهٔ خروجی فیلتر باریک- باند (که بر اساس شبه انتگرال گیری جریان PD گردشی $i(t)$ کار می کند) می باشد ، به استثنای اینکه خوانده بر حسب میکروولت کالیبره شده است .

برای سیستم RIV با مدار وزن دهی ، تبدیل بین pC و µV ممکن نیست.

ضمیمهٔ ۹- ۴ نمونه های منابع نویز خارجی

هر سیستم PD حساس متصل به مدار گستردهٔ اندازه گیری PD ترانسفورماتور قادر به آشکارسازی تمام پالس های فرکانس بالا در مدار تست است. سیستم PD نمی تواند پالس PD واقعی را از نویز خارجی تمیز دهد . اگر فعالیت PD آشکار شود ، امکان خارجی بودن منبع آن بایستی بررسی شود .



q = بار ظاهری

q_m = بار قابل اندازه گیری

$$\frac{q_m}{q} = \frac{C_k}{C_t + C_k}$$

شکل ۹- ۳۱ : تأثیر خازن کوپلاژ C_k بر حساسیت اندازه گیری $\frac{q_m}{q}$

مروری بر انواع منابع PD خارجی در شکل ۹- ۳۲ ارائه شده است [212] .

منبع تغذیه فشار ضعیف (1 , 2 ,11)

نویزهایی همچون پالس های سیستم تریستوری یا هارمونیک های منبـع تغذیـة فشـار ضعیف ، تأثیر زیادی در سیستم های PD بویژه آنهایی که مستقیماً به برق تغذیه وصل هستند می گذارد ، در صورت وجود این نویزها لازم است از فیلتر پائین- گذر یا از یـک ترانسفورماتور ایزوله کننده استفاده کرد.

بدلیل اثـر فیلتـری ترانسـفورماتور افزاینـده (3) و فیلتـر HV(4) در مـدار تغذیـة مـورد آزمایش ، نویز سیستم تغذیة فشار ضعیف معمولاً حذف می شود. اگر مشکل نویز بـدین وسیله از بین نرفته باشد ، استفاده از ترانسفورماتور افزایندة دوم به عنوان فیلتر اضافی یا از سیستم PD با فیلتر باریک- باند (f_0 > ۱ MHz) توصیه می شود.

منبع فشار قوی (3)

منبع HV باید در کل بدون PD باشد . اگر مشکلی مشاهده شد می توان خازن کـوپلاژ C_k را مستقیماً (بدون مورد آزمایش) به منبع وصل کرده براحتی آن را از نظر مشـکل PD امتحان نمود .

فیلتر HV (4)

در مواردی که مشکل وجود دارد ممکن است از فیلتـر HV عـاری از PD (پـائین گـذر) استفاده شود .

اتصالات مدار آزمایش و الکترودها (5)

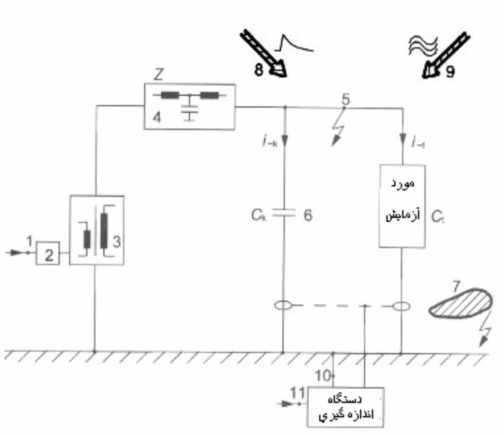
سر تمام بوشینگ ها (حتی بوشینگ های زمین شده) و قطعات تیز فلـزی روی دریـوش (بویژه در نزدیک بوشینگ) بایستی کلاهک گذاری گردد ؛ بنـد ۸ ضـمیمة ۹ را ببینیـد. تمام اتصالات بایستی بدون PD باشـد (بـه انـدازة کـافی گـرد). تمـام امپـدانس هـای اندازه گیری Z_m بایستی اتصال خوبی به زمین داشته باشند. در صورت وجـود مشـکل بایستی از یک آشکارساز مافوق صوت (corona gun) برای تعیین منبع PD خـارجی استفاده کرد. نوع PD با آنالیز آماری سیگنال های PD قابل تعیین اسـت (الگـوی PD نمونه ، جدول ۳ را ببینید) .

خازن کوپلاژ (6)

خازن کوپلاژ بایستی عاری از PD باشد . اگر مشکلی مشاهده شـد ، لازم اسـت خـازن کوپلاژ جداگانه مورد اندازه گیری قرار گیرد .

اجسام هادی نزدیک ترانسفورماتور تحت آزمایش (7)

اجسام هادی زمین نشده نزدیک ترانسفورماتور مورد آزمـایش بـدلیل میـدان الکتریکـی موجود با پتانسیل بالایی شارژ می شود. اگر شـدت میـدان لازم بـرای شکسـت برقـرار شود ، تخلیه های پالس- مانند ایجاد می شود. این پالس های PD در مدار تست ادغام شده و روی امپدانس اندازه گیری قابل آشکارسازی است و معمولاً مقدار بار ظـاهری را بسیار بالا می برد. این نوع منبع PD با مقایسة آن با الگوهای PD نمونه ، بـا مشـاهدة چشمی در آزمایشگاه یا با استفاده از آشکارساز مافوق صوت قابل تشخیص است .



1,2 = منبع تغذیة فشار ضعیف
3 = منبع فشار قوی
4 = فیلتر HV
5 = اتصالات و الکترودها
6 = C_k = خازن کوپلاژ
7 = جسم هادی
8 = تداخلات پالس شکل
9 = تداخلات هارمونیک
10 = جریان های تداخلی از سیستم زمین
11 = منبع تغذیة فشار ضعیف

شکل ۹- ۳۲ : منابع نویز نمونه (برای توضیحات ، متن را ببینید)

تداخل در آزمایشگاه های بدون حفاظ الکترومغناطیسی (8,9)

تداخل های پالسی شکل (پدیدهٔ سوئیچینگ) یا تداخل های هارمونیکی فرستنده های رادیویی ، حساسیت سیستم های PD را بشدت تحت تأثیر قرار می دهند . در چنین مواردی بایستی از یک فیلتر باریک- باند با فرکانس مرکزی متغیر برای حذف تداخلات پیرامونی استفاده کرد (بند ۲ ضمیمهٔ ۹) . بهترین راه برای حذف تداخلات خارجی فوق الذکر استفاده از یک سیستم PD پیشرفته است که یک اسپکتروم آنالایزر در ورودی خود دارد (بند ۹- ۹) . ورود منابع خارجی تکراری همچون پالس های تریستور را می توان "سد کرد" (gate out) . عمل " سد کردن" روی اکثر سیستم های PD وجود دارد . آخرین امکان برای حذف این امواج الکترومغناطیسی ساخت آزمایشگاه HV با حفاظ الکترومغناطیسی (قفس فارادی) است .

توجه:

امپدانس اندازه گیری Z_m (فرکانس قطع پائین در ۱۰ kHz) معمولاً جریان های جابجایی با فرکانس توان (power frequency) خازن های C_t و C_k را حذف می کند. اگر جریان از محدودهٔ جریان با فرکانس توان برای یک Z_m معین تجاوز نکند ، عمل حذف جریان با فرکانس توان انجام نمی گیرد . قبل از اعمال ولتاژ تست ، حداکثر جریان با فرکانس توان در مدار آزمایش که به مقادیر C_t و C_k وابسته است بایستی محاسبه گردد. حداکثر جریان با فرکانس توان برای خازن با رابطهٔ زیر تعیین می شود :

$$i_{ac} = U_{test} \cdot j\omega C$$

ضمیمهٔ ۹- ۵ سیستم PD پیشرفته

ICMsys (ساخت Power Diagnostix Systems GmbH آلمان) سیستم PD مدرنی است که بطور ویژه برای اندازه گیری تخلیهٔ جزئی ترانسفورماتورهای قدرت طراحی شده است. ICMsys از فیلتر پهن- باند هم برای جمع آوری داده دیجیتال (digital data acquisition) و در ادامه برای پردازش داده (data processing) سیگنال های PD آشکار شده به روش متداول استفاده می کند (بند ۲ ضمیمهٔ ۹) .

با استفاده از هشت امپدانس اندازه گیری وصل شده از طریق هشت پری آمپلی فایر به هشت تقویت کننده (فیلتر پهن- باند) اندازه گیری واقعاً همزمان هشت جریان پالس PD انجام می شود. فعالیت PD همزمان توسط هشت کانال آشکار شده ، توسط واحد کنترل پردازش می شود ، شکل ۹- ۳۳ الف را ببینید. خواندهٔ PD مطابق IEC با واحد pC یا مطابق IEEE با واحد µV نمایش داده می شود (اینترفیس آنالوگ برای دستگاه اندازه گیری RIV). نمونهٔ خروجی ICMsys8 در شکل ۹- ۳۳ب نشان داده شده است .

علاوه بر آشکارسازی ، سیستم ICMsys8 ، از طریق ورودی جداگانه بر روی امپدانس های اندازه گیری Z_m ، هشت کانال مستقل اندازه گیری ولتاژ را نیز در دسترس قرار می دهد .

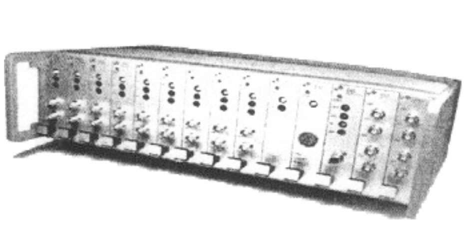
در کنار نمایشگر متداول سیگنال های PD با آشکارسازی مقدار بار ظاهری ، سیستم ICMsys8 قابلیت انجام آنالیزهای آماری فعالیت های PD را نیز دارد (یعنی آنالیز مبتنی بر زمان تخلیة جزئی برای هر کانال) ، شکل ۹- ۳۳ ب را ببینید.

اساس آنالایزر مبتنی بر زمان تخلیة جزئی (سیستم PRPDA ، سیستم های ICM) در شکل ۹- ۳۴ نشان داده شده است [215] .

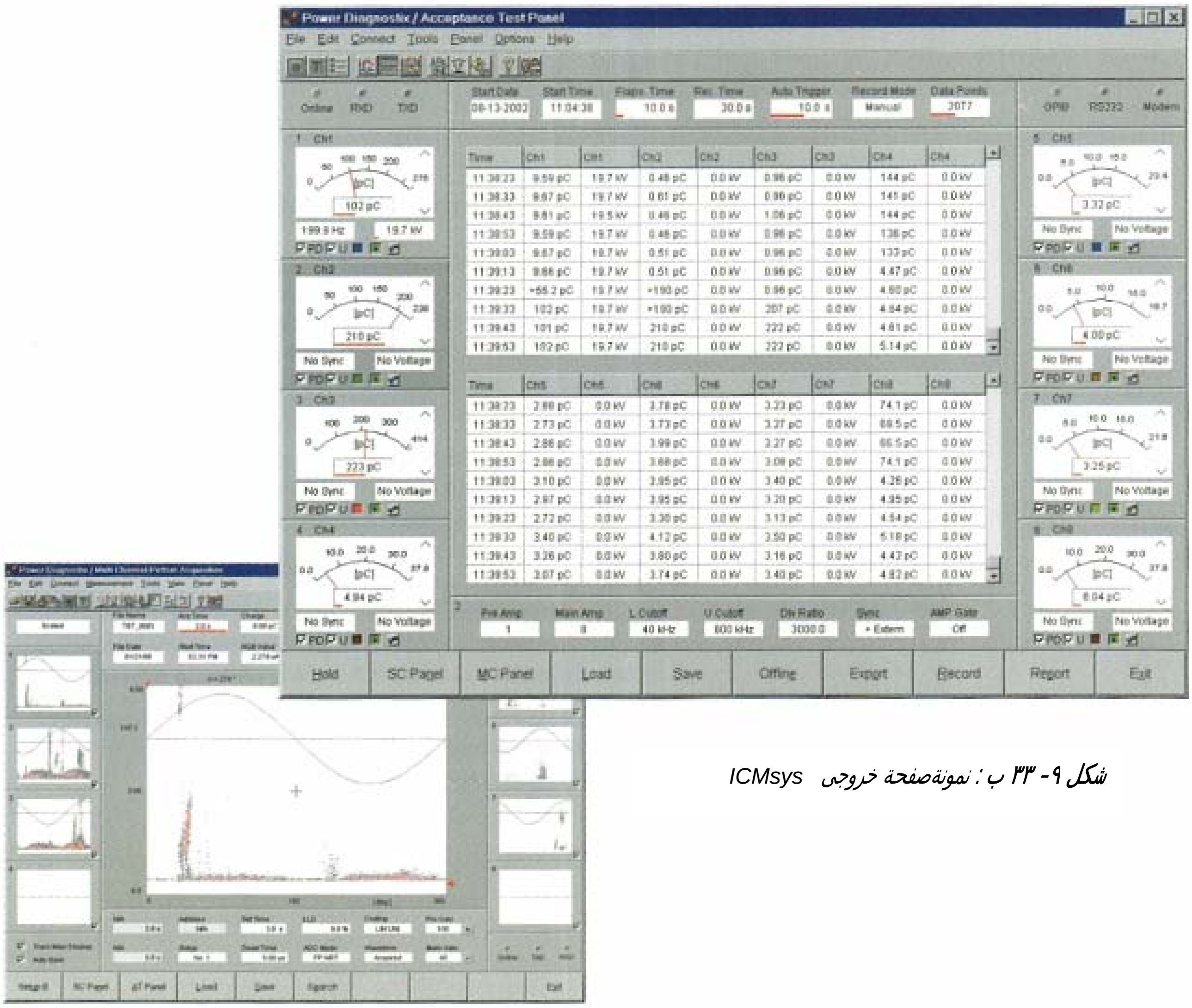
الگوی PD سیستم PRPDA دو یا سه بعدی می باشد (زاویة فاز ، اندازة تخلیه و تعداد رویداد ؛ شکل ۹- ۳۵) . برای الگوی دو بعدی ، بعد سوم (تعداد شمارش برای هر کانال) با کد رنگی مشخص می شود.

الگوی PD مجموعة تمام پالس های PD جمع آوری شده طی مدت زمان معین اندازه گیری را منعکس می کند (برای مثال زمان تنظیمی ۶۰ ثانیه معادل با ۳۰۰۰ سیکل برای ولتاژ تست با فرکانس توان ۵۰ Hz است) .

الگوی PD را می توان به عنوان سرنخ برای فعالیت PD مربوط به عیب خاصی در مورد آزمایش بکار برد.



شکل ۹- ۳۳ الف : سیستم PD پیشرفته ICMsys8



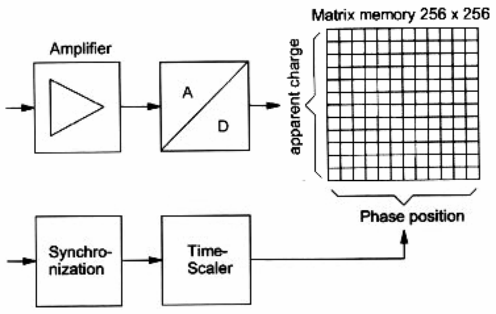
شکل ۹- ۳۳ ب : نمونةصفحة خروجی ICMsys

قابلیت تفکیک (resolution) فاز و دامنه هر دو ۸ بیت می باشد (۲۵۶کانال برای فاز و ۲۵۶ سطح برای دامنهٔ بار ظاهری)

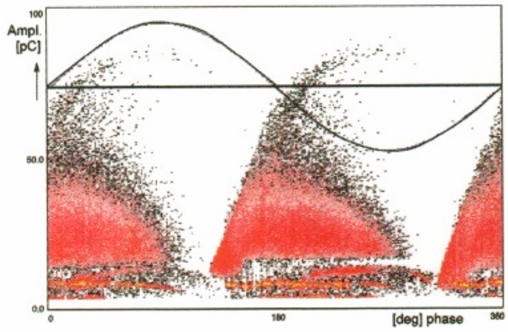
تفاوت عمدهٔ سیستم های PD کلاسیک با دیجیتال مدرن در توانایی انجام آنالیز آماری پالس های جریان PD آشکار شده (الگوی PD) می باشد . سیستم های PD کلاسیک اطلاعات مبتنی بر زمان را در مورد فعالیت PD تنها برای یک سیکل ارائه می دهد ، شکل ۹- ۸ ب را ببینید .

آنالیز تخلیهٔ جزئی مبتنی بر زمان بدلایل زیر برای تعیین نوع منبع PD اهمیت دارد :

- الگوی PD ، نوع منبع PD را مشخص می کند (تصویری از فرآیند فیزیکی ؛ جدول ۳ و ۴ بند ۱ ضمیمهٔ ۹ را ببینید)
- الگوی PD تحت تأثیر تابع انتقال سیگنال در سیستم عایق بندی گسترده قرار نمی گیرد (رفتار آماری تغییر نمی کند)
- بدلیل اینکه معایب PD مختلف ، منطبق بر الگوهای متفاوتی هستند از آنها می توان برای تشخیص وقوع همزمان دو نوع مختلف PD استفاده کرد .



شکل ۹- ۳۴ : اساس آنالیز مبتنی بر فاز تخلیهٔ جزئی (سیستم PRPDA)



شکل ۹- ۳۵ : نتیجهٔ ثبت شده پالس های PD (تخلیهٔ سطحی و حباب) سیستم پیشرفتهٔ PD (آنالیز آماری پالس های PD)

ضمیمة ۹- ۶ آشکارسازی سیگنال های صوتی PD

سیگنال صوتی PD ارتعاشی مکانیکی است که مشخصة آن فرکانس f می باشد .

از لحاظ نظری ، منبع PD نقش منبع نقطه ای امواج صوتی را دارد . شدت امـواج صـوتی منتشره با انرژی آزاد شده در طی تخلیه متناسب است.

$$\Delta W_1 = q_1 \Delta U_1$$

که در آن :

ΔW_1 = انرژی آزاد شدة موضعی

q_1 = بار موضعی

ΔU_1 = افت ولتاژ موضعی

انتشار موج صوتی فقط در صورت کوچک بودن طول موج λ در مقایسه بـا طـول مسیر انتشار انجام می پذیرد :

برای یک محیط (medium) معین ، طول موج از رابطة زیر بدست می آید :

$$\lambda = \frac{v}{f}$$

که در آن :

λ = طول موج

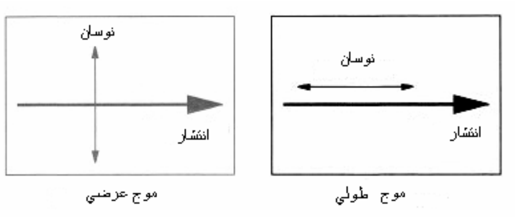
v = سرعت صدا در محیط معین (۱۴۰۰ m/s در روغن)

f = فرکانس ارتعاش مکانیکی (موج صوتی)

روغن محیط مناسـبی بـرای انتشـار بـدون تضـعیف و اعوجـاج امـواج صـوتی اسـت . در ترانسفورماتور ، انتشار امواج صوتی کاملاً تحت تأثیر ساختار پیچیدة سیستم عـایق بنـدی (دیواره های عایقی سیم پیچ ، هسته و دیواره هـای مخـزن) قـرار دارد . در یـک سـاختار پیچیده ، هم دامنه (از نظرتضعیف) و هم شکل (از نظر جذب و اعوجاج) سیگنال صوتی خروجی از منبع PD در مسیر انتشار تغییر می کند [217] .

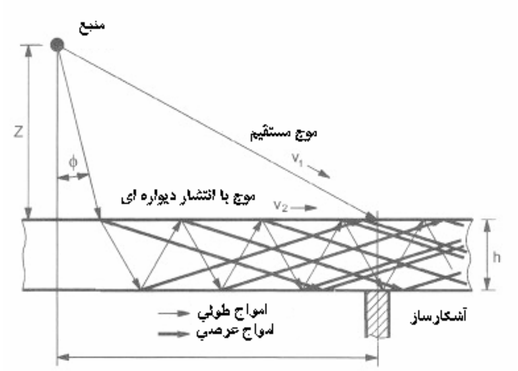
در کنار پدیدة جذب و اعوجاج ، چند گانگی نوع امواج ، آنالیز سـیگنال هـای صـوتی PD دریافتی از یک ساختار چند ماده ای را دشوار می سازد. برای آنالیز سـیگنال هـای صـوتی عموماً دو نوع موج در نظر گرفته می شود (شکل ۹- ۳۶) :

- امواج عرضی ؛ میزان تضعیف به ضخامت دیواره وابسته است
- امواج طولی ؛ سرعت بالاتر نسبت به امواج عرضی (تقریباً با ضریب دو)



شکل ۹- ۳۶ : نمایش شماتیک دو نوع موج صوتی

مسیرهای ممکن انتشار امواج صوتی از یـک منبـع PD تـا یـک آشکارسـاز روی مخـزن ترانسفورماتور در شکل ۹- ۳۷ نشان داده شده است. در اثر انعکاس و یا تلاقی ، دو مـوج ادغام شده (superimposed) در سطح تماس ایجاد می شوند ، شکل ۹- ۳۷ را ببینید . سنسور صوتی واقع شده در نقطة معین روی دیوارة مخزن هم موج بـا انتشـار مسـتقیم و هم موج با انتشار از طریق دیواره را آشکار می کند . دو نوع مـوج ، سـرعت هـای انتشـار متفاوتی دارند .



V_1 = سرعت موج مستقیم

V_2 = سرعت موج دیواره ای

Φ = زاویة تلاقی

Z = فاصلة منبع PD تا دیواره

h = ضخامت دیواره

شکل ۹- ۳۷ : امواج صوتی دریافتی توسط سنسور

برای مکان یابی منبع PD با آنالیز اختلاف زمانی بین سیگنال های الکتریکی و صوتی بایستی تمایز بین امواجی که مستقیماً منتشر می شوند با امواجی که از دیواره ها منتقل می گردند ممکن باشد . از لحاظ نظری این اطلاعات در پیشانی موج سیگنال صوتی آشکار شده توسط سنسور روی دیواره پنهان است ، شکل ۹- ۳۸ را ببینید.

توجه :

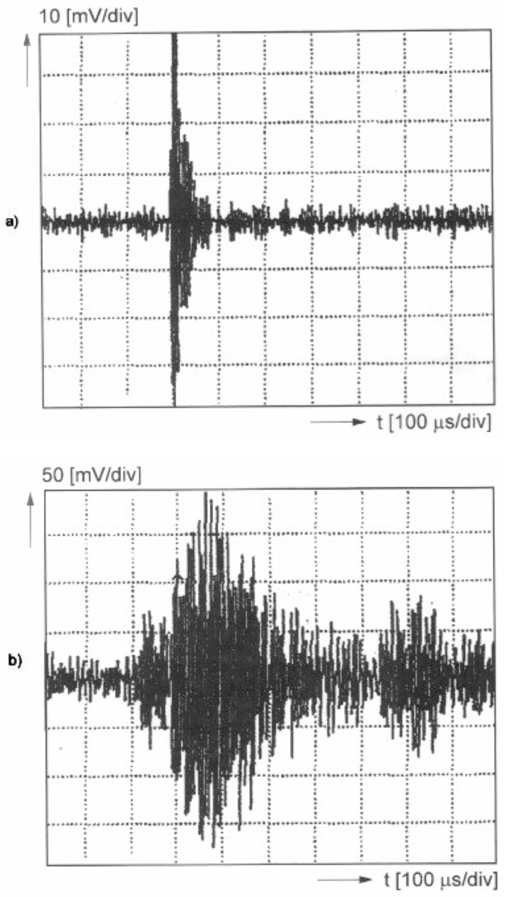
مسیر مستقیم سریعترین مسیر انتشار نیست . مسیری با زاویهٔ تلاقی Φ سریعترین مسیر انتشار می باشد ، شکل ۹- ۳۷ را ببینید :

$$\sin\Phi = \frac{v_1}{v_2}$$

که در آن :

v_1 = سرعت در محیط ۱ (برای مثال روغن)

v_2 = سرعت در محیط ۲ (برای مثال دیوارهٔ مخزن)



شکل ۹-۳۸ : آنالیز امواج صوتی منبع PD
a) موج مستقیم صوتی (از طریق روغن)
b) موج انعکاسی یا عبوری از محیط های مختلف

سیستم آشکارسازی پیشرفته :
آشکارساز سه- ترانسدیوسر (TTD)

از لحاظ نظری ، حداقل سه سنسور صوتی (ترانسدیوسر پیزو الکتریک) و یک اسیلوسکوپ دیجیتال چهار کاناله برای مکان یابی PD بر اساس اختلاف زمانی بین دریافت سیگنال الکتریکی و صوتی PD مورد نیاز می باشد. در کارخانجات ABB از یک سیستم آشکار سازی پیشرفتهٔ سه- ترانسدیوسر (TTD) استفاده می شود ، شکل ۹- ۳۹ را ببینید [218] .

توجه :

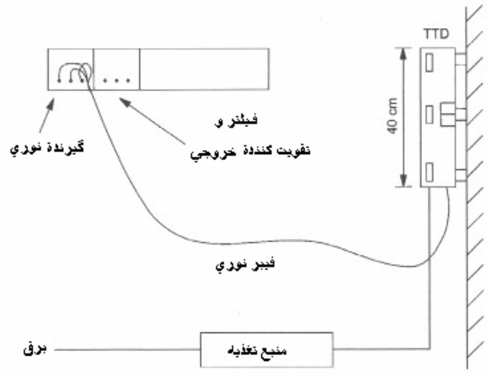
این سیستم دیگر تولید نمی شود ولی هنوز مورد استفاده است .

سه ترانسدیوسر (کریستال پیزوالکتریک) نزدیک هم قرار دارند (مثلثی متساوی الاضلاع با L = ۰/۱۵m) و بدین ترتیب می توان سه مسیر انتشار را برای امواج دریافتی سه سنسور از یک منبع PD ، یکسان فرض کرد . TTD سیستم مختصات x ، y و z (بردارهای نرمال) خود را تعریف می کند. در سیستم مختصات تعریف شده (x ، y و z) جهت واقع شدن منبع PD بر اساس اختلاف زمانی دریافت سیگنال صوتی ، توسط سیستم TTD تعیین می شود ، شکل ۹- ۳۹ پ را ببینید.

یک نتیجة نمونه که توسط سیستم TTD بدست آمده در شکل ۹- ۴۰ نمایش داده شده است.

فرآیند مکان یابی منبع PD با استفاده از نتایج TTD در ادامه ارائه شده و سپس با یک مثال تشریح گردیده است :

- در این مورد که موج ثبت شده " موج مستقیم" یا " موج دیواره ای" (wall wave) می باشد با آنالیز شکل سیگنال تصمیم گرفته می شود.
- برای تشخیص بین موج مستقیم و موج دیواره ای ، " سرعت ظاهری" ، v_{app} با فرمول تقریبی زیر محاسبه می شود :



شکل ۹-۳۹ الف : اجزاء اصلی سیستم TTD

$$v_{app} = \frac{L}{\sqrt{\frac{2}{3}[(t_1 - t_2)^2 + (t_2 - t_3)^2 + (t_1 - t_3)^2]}}$$

که در آن :

L = فاصلهٔ بین ترانسدیوسرها

t_1, t_2, t_3 = اختلاف زمانی بین سیگنال های صوتی و الکتریکی سه ترانسدیوسر

- سرعت ظاهری v_{app} با مقادیر متفاوت سرعت صدا در مواد عایقی بکار رفته برای سیستم عایق بندی ترانسفورماتور مقایسه می شود ، جدول ۵ را ببینید .
- در مورد نوع موج تصمیم گیری می شود (موج مستقیم یا دیواره ای) .
- مختصات $z, y.x$ منبع PD با استفاده از نرم افزار TTD برای موج تعیین شده (مستقیم یا دیواره ای) محاسبه می شود.

جدول ۵ : چند مثال برای مقدار سرعت صدا

ماده	سرعت [m/s]	چگالی [kg/m^3]
روغن	۱۴۰۰	۹۵۰
مقوای عایقی	۲۰۰۰ موازی با فیبرهای سلولز	۱۲۵۰
مقوای عایقی	۳۵۰۰ عمود بر فیبرهای سلولز	۱۲۵۰
ورق فولادی	۳۲۰۰ موج عرضی	۷۹۰۰
ورق فولادی	۵۲۰۰ موج طولی	۷۹۰۰

سه شرط مختلف برای سرعت ظاهری v_{app} محاسباتی وجود دارد :

عرضی $v > v_{app}$ ⇐ موج مستقیم

عرضی $v \approx v_{app}$ ⇐ موج عرضی

عرضی $v < v_{app}$ ⇐ نباید روی دهد (امکان وقوع برای دیواره های ضخیم)

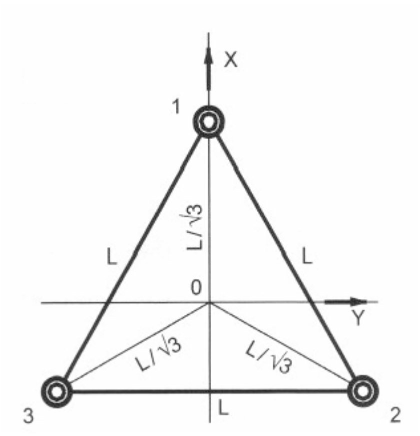
توجه :

سرعت ظاهری v_{app} همیشه بزرگتر از v_{oil} (۱۴۰۰ m/s) می باشد .

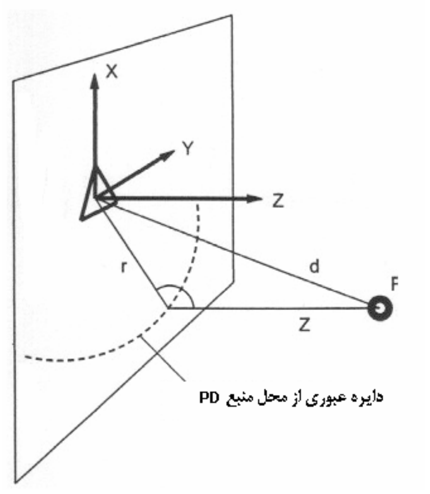
مثال :

محاسبه محل منبع PD با استفاده از نتایج ارائه شده در شکل ۹- ۴۰ :

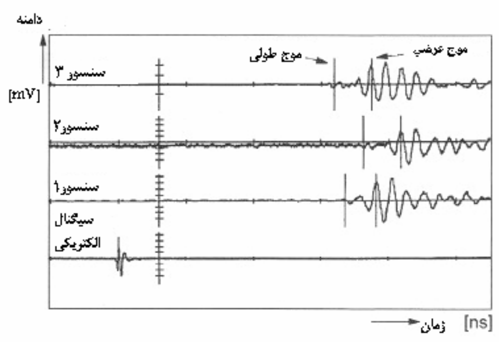
- شکل سیگنال صوتی دریافت شده یک موج دیواره ای را مشخص می کند (امواج طولی و عرضی ادغام شده) (superimposed longitudinal and transversal waves)
- سرعت ظاهری v_{app} = ۳۴۱۷ m/s برای موج طولی ، مقادیر محاسباتی برای موج طولی (t_{3L} ~ ۳۲۰ µs ، t_{2L} ~ ۳۶۳ µs ، t_{1L} ~ ۳۳۶ µs) بوضوح نشان دهندهٔ طولی بودن موج نیست .



شکل ۹-۳۹ ب : طرح هندسی



شکل ۹- ۳۹ پ : مختصات



شکل ۹- ۴۰ : نمونهٔ نتیجهٔ سیستم TTD

- سرعت ظاهری v_{app} = ۳۲۳۶ m/s برای یک موج عرضی ، مقادیر محاسباتی برای موج عرضی (t_{1T} ~ ۳۸۲ µs , t_{2T} ~ ۴۱۸ µs , t_{3T} ~ ۳۷۵ µs) نشان دهندهٔ دیواره ای بودن موج است (سرعت موج عرضی برای ورق فولادی = ۳۲۰۰ m/s)
- مکان محاسبه شدهٔ منبع PD برای موج دیواره ای (نرم افزار TTD)

x = +۰/۱۹ , y = -۰/۵۲ , z = + ۰/۳۴ m

توجه :

بدلیل مسیرهای متفاوت سیگنال های صوتی و الکتریکی PD از طریق سیستم عایق بندی ترانسفورماتور ، رابطه ای ساده بین دامنهٔ بار ظاهری و دامنهٔ امواج صوتی وجود ندارد.

برای مکان یابی منبع PD با آنالیز سیگنال های صوتی PD ، دانش سیستم عایق بندی ترانسفورماتور و تجربهٔ آنالیز نتایج ضروری می باشد .

ضمیمهٔ ۹- ۷ مکان یابی منبع PD با استفاده از آنالیز سیگنال های الکتریکی

سیگنال های الکتریکی PD (پالس های جریان PD) ناشی از منبع PD از طریق شبکهٔ RLCM ترانسفورماتور منتشر می شوند ، شکل ۹- ۴۲ را ببینید. پاسخ این شبکه به تحریک توسط هر پالس جریان PD در هر نقطه از سیستم عایق بندی تنها از طریق بوشینگ ها قابل آشکارسازی است . بنابراین لازم است تمام اطلاعات سیگنال دریافت شده آنالیز گردد . [219, 214]

تمام سیگنال ها در حوزهٔ زمان (ضبط شده توسط اسیلوسکوپ) و در حوزهٔ فرکانس (ضبط شده با استفاده از اسپکتروم آنالایزر) از طریق تبدیل فوریه به هم ارتباط می یابند ، شکل ۹- ۴۱ را ببینید . [121]

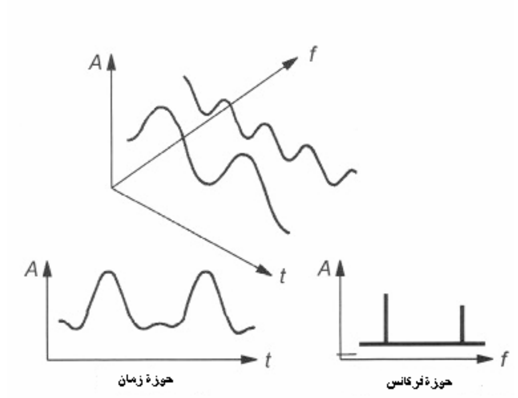
برای پالس جریان PD غیر متناوب معین $i(t)$ ، طیف فرکانسی مختلط $I(j\omega)$ از انتگرال فوریهٔ زیر بدست می آید :

$$I(j\omega) = \int_{\infty}^{+\infty} i(t)e^{-j\omega t}dt$$

گرچه سیگنال جریان PD یکی است ، دادهٔ ضبط شده در حوزهٔ زمان و در حوزهٔ فرکانس اطلاعات متفاوتی را شامل هستند که برای مکان یابی منبع PD مهم می باشد .

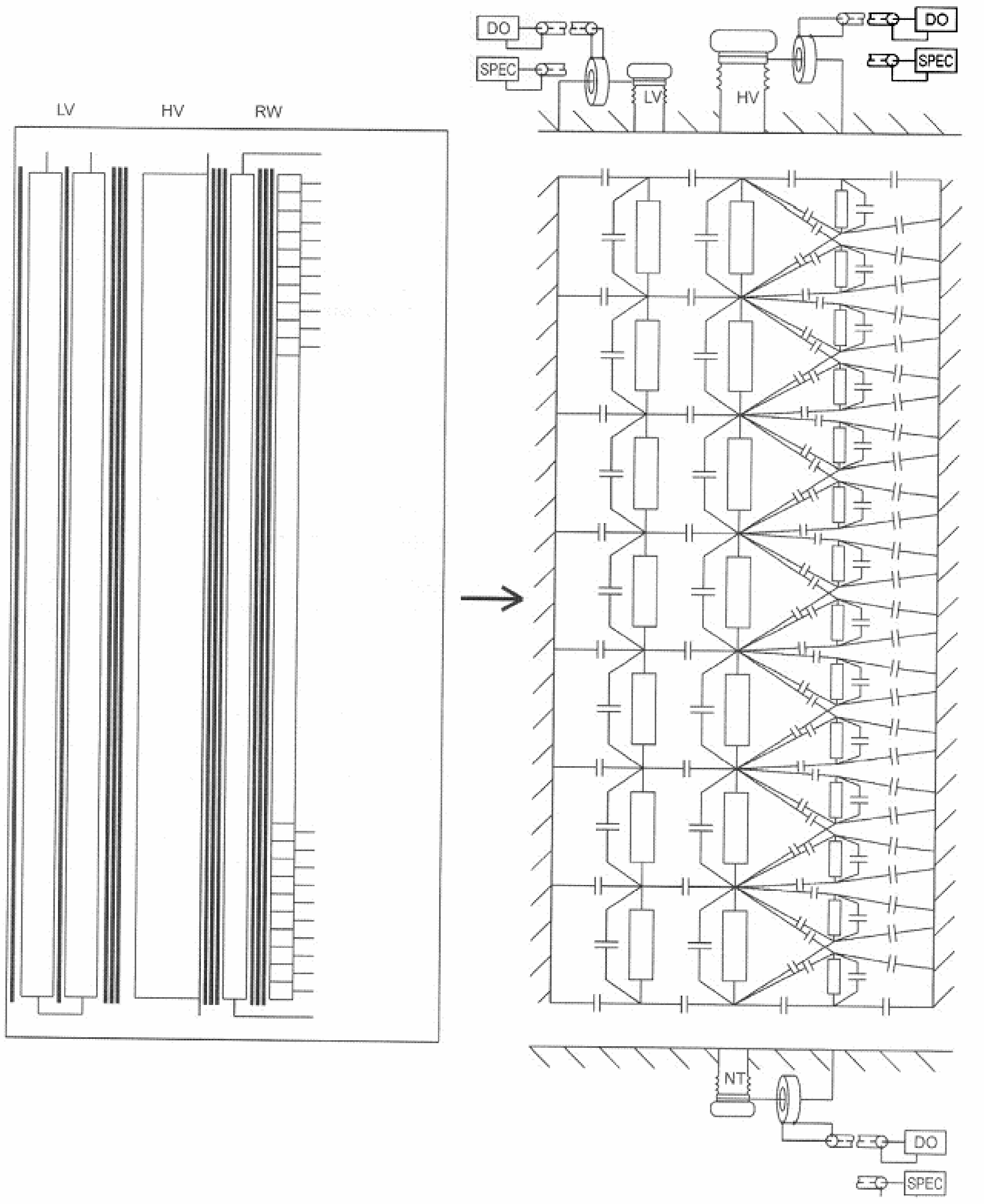
از لحاظ نظری ، برای هر نوع پالس PD از هر منبع PD در سیستم عایق بندی ، پاسخ معینی از شبکهٔ RLCM وجود دارد که ممکن است در بوشینگ ترانسفورماتور آشکار گردد.

تحلیل ویژگی شبکهٔ RLCM ترانسفورماتور معمولاً برای برقراری امکان آنالیز سیگنال های واقعی PD در حوزهٔ زمان و فرکانس ضروری است ، گرچه این کار بسیار زمان بر است . سیگنال کالیبراسیون (معمولاً ۱۰۰ pC) به یک بوشینگ تزریق شده و بدنبال آن سیگنال های دریافتی از تمام بوشینگ های دیگر ضبط می شود . این فرآیند برای هر یک از سایر بوشینگ ها تکرار می گردد ، بند ۹- ۹ را ببینید .



A = دامنه
f = فرکانس
t = زمان

شکل ۹- ۴۱ : نمایش سیگنال در حوزهٔ زمان و فرکانس



a) = سیستم عایق بندی و سیستم سیم پیچی
LV = سیم پیچ فشار ضعیف
HV = سیم پیچ فشار قوی
RW = سیم پیچ تنظیم ولتاژ

b) = مدار معادل
LV = سیم پیچ فشار ضعیف
HV = سیم پیچی فشار قوی
NT = ترمینال نوترال
DO = اسیلوسکوپ دیجیتال
SPEC = اسپکترو آنالیز

شکل ۹- ۴۲ : شبکة RLC ترانسفورماتور

ضمیمة ۹- ۷- ۱ آنالیز سیگنال های PD در حوزة زمان [214]

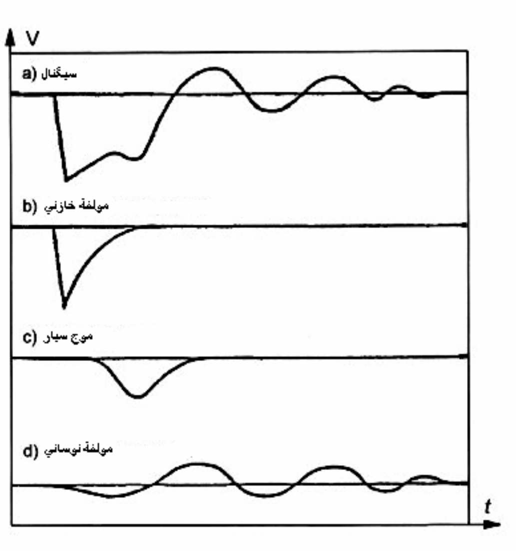
پالس جریان PD در حوزة زمان (آشکار شده از بوشینگ) دارای سه مولفه برای تحلیل ویژگی می باشد ، شکل ۹- ۴۳ را ببینید :

- مولفة خازنی ناشی از انتقال از طریق شبکة نردبان خازنی
- مولفة موج سیار ناشی از انتقال موج الکترومغناطیسی
- مولفة نوسانی تعیین شده با فرکانس رزونانس مدار LC

مشخصه های اصلی مبتنی بر زمان سیگنال PD که بایستی آنالیز گردد عبارتند از :

- حداکثر دامنة سیگنال جریان PD
- نوسانات سیگنال جریان PD
- قابلیت بازیابی سیگنال های جریان PD

تعیین مکان منبع PD با مقایسة سیگنال های PD ضبط شده در حوزة زمان با نتایج تحلیل ویژگی ترانسفورماتور انجام می شود .

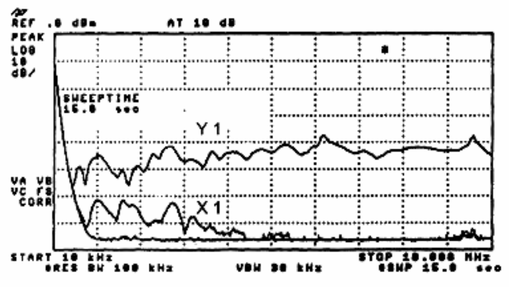


شکل ۹- ۴۳ : آنالیز سیگنال های PD در حوزة زمان

ضمیمة ۹- ۷- ۲ آنالیز سیگنال های PD در حوزة فرکانس [216]

پالس جریان PD آشکار شده از بوشینگ در حوزة فرکانس دارای دو طیف فرکانسی نوعی (typical) برا ی تحلیل ویژگی می باشد ، شکل ۹- ۴۴ را ببینید :

- طیف فرکانسی نوعی تولید شده توسط سیگنال های بسیار سریع (نزدیک به تپ اندازه گیری)
- طیف فرکانسی نوعی تولید شده توسط سیگنال های تضعیف شده (داخل سیستم عایقی)



Y_1 = نزدیک تپ اندازه گیری

X_1 = کوپل شده از طریق شبکة RLCM

شکل ۹- ۴۴ : آنالیز سیگنال های PD در حوزة فرکانس

POWEREN.IR

مشخصه های اصلی طیف فرکانس که بایستی آنالیز گردد عبارتند از :

- دامنهٔ طیف توان (dBm)
- محدودهٔ فرکانسی طیف توان
- رزونانس های نوعی
- قابلیت بازیابی طیف توان

تعیین مکان منبع PD با مقایسهٔ طیف فرکانسی سیگنال PD با نتایج مربوط به تحلیل ویژگی ترانسفورماتور انجام می شود .

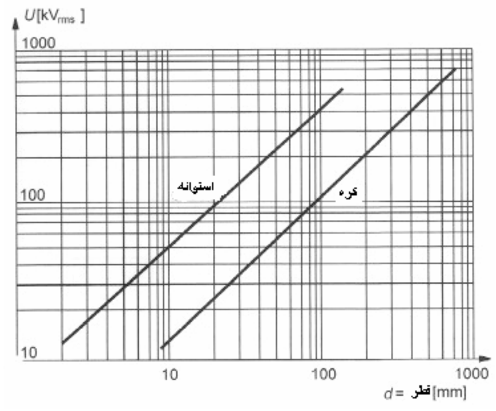
توجه :

تمام مولفه های نظری سیگنال ها در حوزهٔ فرکانس یا زمانی کاملاً به طرح ترانسفورماتور (اندازه و نوع سیم پیچ ها) ، به مکان واقعی عیب PD نسبت به ترمینالی که سیگنال PD از آن آشکار شده است و به شکل سیگنال PD (تخلیه در گاز ، روغن یا مادهٔ جامد) بستگی دارد .

برای مکان یابی منبع PD با آنالیز سیگنال های الکتریکی PD ، دانش سیستم عایق بندی ترانسفورماتور و تجربهٔ آنالیز نتایج ضروری می باشد .

ضمیمهٔ ۹- ۸ حذف کرونا

تخلیهٔ خارجی (کرونا) توسط کلاهک قابل حذف است. راهنمایی برای انتخاب کلاهک در شکل ۹- ۴۵ ارائه شده است. منحنی ها ، میزان ولتاژ قابل اعمال بدون احتمال ایجاد کرونا را مشخص می کنند .



شکل ۹- ۴۵ : ابعاد کلاهک ها برای حذف کرونا

تست ترانسفورماتورهای قدرت

۱۰- تست ضربة صاعقه و ضربة کلید زنی

۱۰- ۱ مراجع/ استانداردها

- IEC 60060-1(1989), High-voltage test techniques- part 1: “ General definitions and test requirements ” [21]
- IEC 60060-2 (1994), High-voltage test techniques- Part 2: “Measuring systems ” [22]
- IEC 60060-3 (w.i.p.*), High-voltage test techniques- Part 3: “Definitions and requirements on-site tests” [23]
- IEC 60076-3 (2000), Power Transformers- Part 3: “Insulation levels , dielectric tests and external clearances in air” [3]
- IEC 60076-4 (2002) , “Guide to lightning impulse and switching impulse testing of power transformers and reactors” [4]
- IEEE Std C57.12.90-1999, clause 10: “Dielectric tests” [51]
- IEEE Std C57.98-1993, “Guide to impulse testing techniques, interpretation of oscillograms and failure detection criteria” [58]

* در حال تدوین

گرچه در حال حاضر دو استاندارد اصلی [3] و [51] هماهنگ شده اند ، هنوز چندین اختلاف بویژه در روش تعیین معیارها و الزامات عایقی وجود دارد . IEC مقادیر نامی سطح ایستادگی ضربهٔ صاعقه (Lightning Impulse Withstand Level) LI و سطح ایستادگی ضربهٔ کلید زنی (Switching Impulse) SI را برای ایستادگی ضربه تعیین می کند .

IEEE مقدار نامی سطح عایقی پایهٔ ضربهٔ صاعقه (Basic lightning Impulse insulation Level) BIL و سطح عایقی پایهٔ ضربهٔ کلید زنی BSL را معین می کند .

IEC انتخاب آزاد مقادیر استاندارد شدهٔ LI و SI را مجاز می داند ، در حالیکه مطابق IEEE در صورت تعیین مقدار BIL ، سطح عایقی ضربهٔ صاعقه و ضربهٔ کلید زنی از پیش تعیین می شود .

توجه :

مطابق IEC [3] برای ترانسفورماتورهای با $U_m >$ ۷۲/۵ kV و مطابق IEEE [50] برای ترانسفورماتورهای با $U_m \geq$ ۱۱۵ kV تست ضربهٔ صاعقه **یک تست روتین** محسوب می شود ؛ مطابق [3] برا ی ترانسفورماتورهای با $U_m >$ ۳۰۰ kV و مطابق [50] برای ترانسفورماتورهای با $U_m \geq$ ۳۴۵ kV ، تست ضربهٔ کلید زنی **یک تست روتین** محسوب می شود . برا ی سایر مقادیر این تست ها یک تست طراحی یا ویژه (" دیگر") محسوب می شود ، جداول ۱ و ۲ بخش ۲ را ببینید .

۱۰- ۲ منظور از تست

منظور از تست اطمینان از استقامت عایق بندی در مقابل ولتاژ های گذرای ناشی از پدیده های جوی (صاعقه) ، اختلالات شبکه یا عملیات کلید زنی می باشد .

۱۰- ۳ کلیات

هنگامی که استاندارد یا مشخصات سفارش مشتری ، تست ضـربه را لازم بدانـد ممکـن است هر یک از عملیا ت زیر انجام شود :

- تست ضربهٔ صاعقه برای یک یا تمام ترمینال ها
- تست ضربهٔ کلید زنی برای ترمینالی که بالاترین ولتاژ نامی را دارد

در صورت عدم تعیین قبلی ، تست ضربه ، قبل از تست هـای عـایقی بـا ولتـاژ فرکـانس پایین (تست ولتاژ القایی (induced) و تست ولتاژ اعمالی (applied)) انجام می شود ، مطابق IEC تست ضربهٔ کلید زنی قبل از هر تست ضربهٔ صاعقه انجام می گیرد .

در کل ، ترانسفورماتور هنگامی تست ضربه را با موفقیت سـپری کـرده است کـه تشـابه کاملی بین اولین منحنی بدست آمده با اعمال ضربهٔ کالیبراسیون با ولتاژ پـایین و منحنـی های ضربه با سطوح ولتاژی تعیین شده وجود داشته باشد . بدلیل تقدم تست های ضـربه بر سایر تست های با فرکانس تـوان (power frequency) ، پـی بـردن بـه هـر عـدم انطباق یا ایجاد هر آسیب پنهان در طی تست ضربه در ادامهٔ تست ها میسر است .

هم ضربهٔ صاعقه و هم ضربهٔ کلید زنی شـکل اسـتاندارد شـده ای دارد کـه در اسـتاندارد مربوطه معین شده است ، بخش ۱۰- ۴ را ببینید. ضربهٔ کلید زنی تنها یک شکل شـناخته شده دارد و آن موج کامل نام دارد . در حالیکه ضربهٔ صاعقه ممکن است سه شکل داشـته باشد:

- موج کامل (full wave)
- موج پشت- بریده (chopped wave on the tail)
- موج پیشانی - بریده (Front chopped wave)

در موج کامل ، ولتاژ اعمالی پس از عبور از قلهٔ موج (voltage crest) نزولی دائمی به سمت خط صفر دارد . در موج بریده ، ولتاژ اعمالی در یک زمان از پیش تنظـیم شـده بـه ولتاژ صفر سقوط می کند .

برای جلوگیری از هر شکست الکتریکی خارجی در مدار تست یا از سر بوشینگ ها نسـبت به قسمت های زمین شده ، معمولاً پلاریتهٔ منفی برای ولتاژ ضربه انتخاب می گردد .

توالی تست

در صورت عدم در خواست قبلی توسط مشتری ، توالی تست های ضـربه بـه ترتیـب زیـر می باشد :

- تست ضربهٔ کلید زنی ، در صورت الزام انجام
- تست ضربهٔ صاعقه

۱۰- ۳- ۱ تست ضربة صاعقه

توالی تست به قانون تست (test code) ، IEC [3] یا IEEE [51] ، و الزامات مشتری بستگی دارد . معمولاً توالی تست با ضربه های با سطح ولتاژ پائین تـر (reduced) آغـاز شده و با ضربه های موج کامل با دامنة تعیین شده پایان می یابد .

مطابق IEC ضربه های زیر اعمال می گردد :

- یک ضربة موج کامل با سطح ولتاژ پائین تر (ضربة کالیبراسیون)
- یک ضربة موج کامل با سطح ولتاژ کامل (LI)
- یک یا چند ضربة بریده با سطح ولتاژ پائین تر (فقط در صورت توافق قبلی برای ایـن تست ویژه)
- دو ضربة بریده با سطح ولتاژ کامل (LIC) (فقط در صورت توافق قبلـی بـرای ایـن تست ویژه)
- دو ضربة موج کامل با سطح ولتاژ کامل (LI)

در صورت عدم تعیین قبلی ، مطابق IEC [3] لازم است مـوج بریـده دامنـه ای برابـر بـا ۱۱۰% مقدار LI داشته باشد .

مطابق IEEE ضربه های زیر اعمال می گردد :

- یک ضربة موج کامل با سطح ولتاژ پائین تر (ضربة کالیبراسیون)
- دو ضربة پیشانی- بریده با دامنة ولتاژ تعیین شده (فقط در صورت توافق قبلـی بـرای انجام این تست ویژه)
- دو ضربة موج بریده با دامنة تعیین شده
- یک ضربة موج کامل با دامنة نامی (BIL)

موج بریده بایستی دامنه ای برابر با ۱۱۰% مقدار BIL ، و مـوج پیشـانی- بریـده بایسـتی دامنه ای مطابق با جدول 5 مرجـع [50] داشـته باشـد (فقـط بـرای ترانسفورمـاتورهای کلاس I) .

ضربة کالیبراسیون موج بریده را می توان بلافاصله قبل از خود موج بریده اعمـال نمـود و لازم نیست این ضربه در ابتدای توالی تست قرار گیرد .

صحت عایق بندی ترانسفورماتور هنگامی تأئید می گردد که تشـابه کـاملی بـین منحنـی ضربة اعمالی کالیبراسیون و منحنی های ضربة با سطح ولتاژ کامل برقرار باشد .

۱۰- ۳- ۲ تست ضربة کلید زنی

تست ضربة کلید زنی در کل شامل موارد زیر است :

- ضربة کالیبراسیون با حدود ۶۰% سطح عایقی تعیین شده
- دو [51] یا سه [3] ضربه با سطح عایقی تعیین شده

صحت عایق بندی هنگامی تأئید می گردد که هیچ شکست ولتـاژی در طـی تسـت روی ندهد .

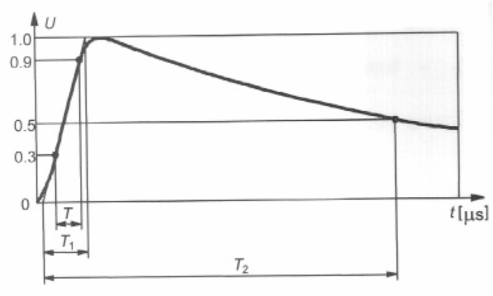
برای ترانسفورماتور ، ضربة کلید زنی یـک انتگـرال زمـانی (time integral) را از ولتـاژ اعمالی ایجاد می کند . این ضربه ممکن است هسـتة ترانسـفورماتور را بـه اشـباع شـدن وا دارد و در شرایط اشباع ، امپدانس چنان افت می کند که دیگر حفظ ولتاژ بر سر ترمینال توسط هیچ منبعی ممکن نیست . بنابراین اینکه پـس مانـد مغناطیسـی هسـته در خـلاف جهت شار تولیدی توسط ضربة اعمالی باشد حائز اهمیت است . این وضعیت را مـی تـوان با اعمال چند ضربة کلید زنی با پلاریتة مخالف (مثبت) و با ولتاژ پائین تر قبل از هر ضربة اصلی تست ایجاد نمود .

۱۰- ۴ شکل ضربه

۱۰- ۴- ۱ ضربة صاعقه

ضـربة مبنـا بـرای تأییـد ولتـاژ ایسـتادگی صـاعقه مطـابق IEC 60076-3 [3] و IEEE Std C57.12.90 [51] بکار می رود .

شکل موج این ضربه مطابق شکل ۱۰- ۱ غیر متناوب می باشد . این مـوج مـدت زمـان معینی برای صعود برابر ۱/۲ µs و مدت زمان معینی برای نزول تا نصف دامنـه برابـر ۵۰ µs دارد. شکل تعیین شده توسط IEC و IEEE یکی است .



T_1 = ۱/۶۷ . T = ۱/۲ µs ± %۳۰ - پیشانی

T_2 =۵۰ µs ± % ۲۰ - پشت

شکل ۱۰- ۱ : موج کامل ضربة صاعقه ؛ IEC و IEEE

این شکل موج با مشخصات زیر شناخته می شود :

پیشانی : T_1 = ۱/۲ µs ، تولرانس %۳۰ ± (۰/۸۴ تا ۱/۵۶ µs)

پشت : T_2 = ۵۰ µs ، تولرانس %۲۰ ± (۴۰ تا ۶۰ µs)

پلاریته : منفی (برای ترانسفورماتورهای روغنی)

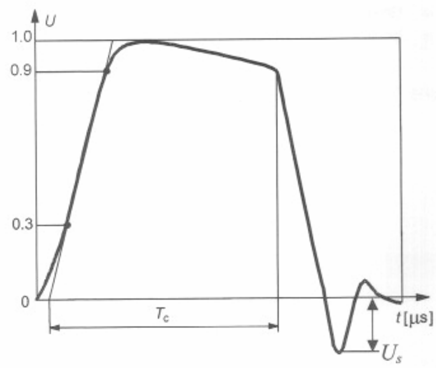
بدلیل ایده آل نبودن مدار تولید موج ضربه ، لازم است در مورد زمان صـعود و نیـز مقـدار قلّه بیشتر توضیح داده شود . شیب خط مستقیمی که از مقادیر ولتاژ ۰/۳ و ۰/۹ برابر مقدار قلّه عبور می کند زمان صعود را بدست می دهد . زمان صعود برابـر اسـت بـا ۱/۶۷ برابـر مدت زمان بین این دو مقدار ولتاژ.

بند ۱ ضمیمة ۱۰ را برای تعریف و ارزیابی این مقدار قلّه ببینید .

۱۰- ۴- ۲ شکل موج ولتاژ ضربه ،پشت بریده

IEC تأکید می کند که :

پیـک مـوج بریـده بایسـتی ۱۰% بـالاتر از پیـک مـوج کامـل باشـد. زمـان تـا بـرش (time to chopping) عبارت است از T_c = ۲ تا ۶ µs ، شـکل ۱۰- ۲ را ببینیـد . تجهیزات تریگردار (با قابلیت تعیین زمان برش) ارجح می باشد اما استفاده از جفت گوی بدون تریگر نیز مجاز است ، بند ۲ ضمیمة ۱۰ را ببینید . فـراجهش (overshoot) U_S دامنة موج پس از اولین نقطة قطع خط صفر نباید از %۳۰ دامنة ولتاژ تست بیشتر باشد .



T_C = ۶ -۲ µs زمان تا برش

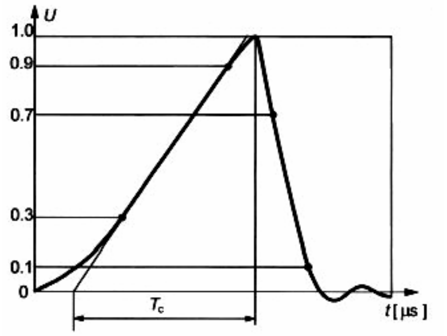
شـــکل ۱۰- ۲ : مـــوج پشـــت بریـــده؛ IEC و IEEE

IEEE تأکید می کند که :

ضربة صاعقة پیشانی- بریده بایستی همیشه همراه با ضربة صاعقة بـا مـوج کامـل اعمـال گردد . ولتاژ تست و زمان تـا بـرش در جـدول 5.6 (IEEE C57.12.00) [50] تعیـین شده است و ولتاژ تقریباً ۱۰% بالاتر از مقدار پیک موج کامل واقع می شود ، شـکل ۱- ۱۰ را ببینید . مقدار فراجهش U_S نباید از %۳۰ دامنة ولتاژ تست بیشتر باشد .

۱۰- ۴- ۳ شکل موج ولتاژ ضربه ، بریده در پیشانی (پیشانی- بریده)

انجام تست موج ضربه پیشانی- بریده فقط توسط IEEE و تنها در صورت وجود تـوافقی ویژه لازم دانسته شده است . ولتاژ تست و زمان تا برش برای BIL ≤ ۳۵۰ kV در جدول 5(IEEE C57.12.00) [50] تعیین شده است ، شکل ۱۰- ۳ را ببینید . فراجهش نباید از ۳۰% بیشتر شود ، بند ۲ ضمیمة ۱۰ را ببینید .



T_C = زمان تا برش (جدول 5 ، IEEE C57.12.00)

شکل ۱۰- ۳ : موج پیشانی بریده؛ IEEE

۱۰- ۴- ۴ شکل موج ضربة کلید زنی

مطابق IEC و IEEE شکل موج ضربة غیر متناوب زیر برای تأئید ولتاژ ایستادگی ضربة کلید زنی ترانسفورماتور بکار گرفته می شود ، شکل ۱۰- ۴ را ببینید.

مشخصات شکل موج به این شرح می باشد:

پیشانی : T_1 = ۱/۶۷ . T ⇐ T_1 ≥۱۰۰ µs

مقدار ۹۰% : T_d ≥ ۲۰۰ µs

U=0 : T_2 ≥ ۵۰۰ µs و بهتر است T_2 ≥۱۰۰۰ µs (IEC)

T_2 ≥۱۰۰۰ µs (IEEE)

T_2 = زمان تا اولین قطع صفر

زمان پیشانی T_1 بایستی طوری انتخاب گردد تا از توزیع خطی ولتاژ در طـول سـیم پـیچ اطمینان حاصل گردد .

پلاریته :

- منفی (دستگاههای روغنی) مطابق IEC [3]
- مثبت * یا منفی یا هر دو مطابق IEEE [51]

* پلاریتة منفی برای جلوگیری از تخلیة الکتریکی خارجی توصیه می شود .

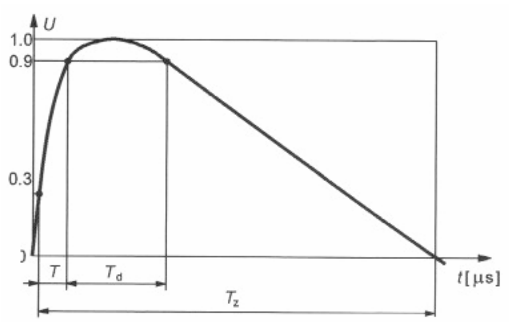
برای ملاحظات نظری در رابطه با زمان تا اولین قطـع صـفر T_2 بنـد ۱۰ ضـمیمة ۱۰ را ببینید .

برای تولید ولتاژ ضربة کلید زنی ، بند ۲ ضمیمة ۱۰ را ببینید . زمان صعود T برای ضربة کلید زنی با روشی مشابه ضربة صاعقه تعریف شده است ،

T_1 = ۱/۶۷ T

که در آن :

T = مدت زمان بین ۳۰% و ۹۰% ولتاژ تست در مرحلة صعود ولتاژ.



T_1 = پیشانی
T_d = زمان بالای ۹۰%
T_2 = زمان تا اولین قطع صفر

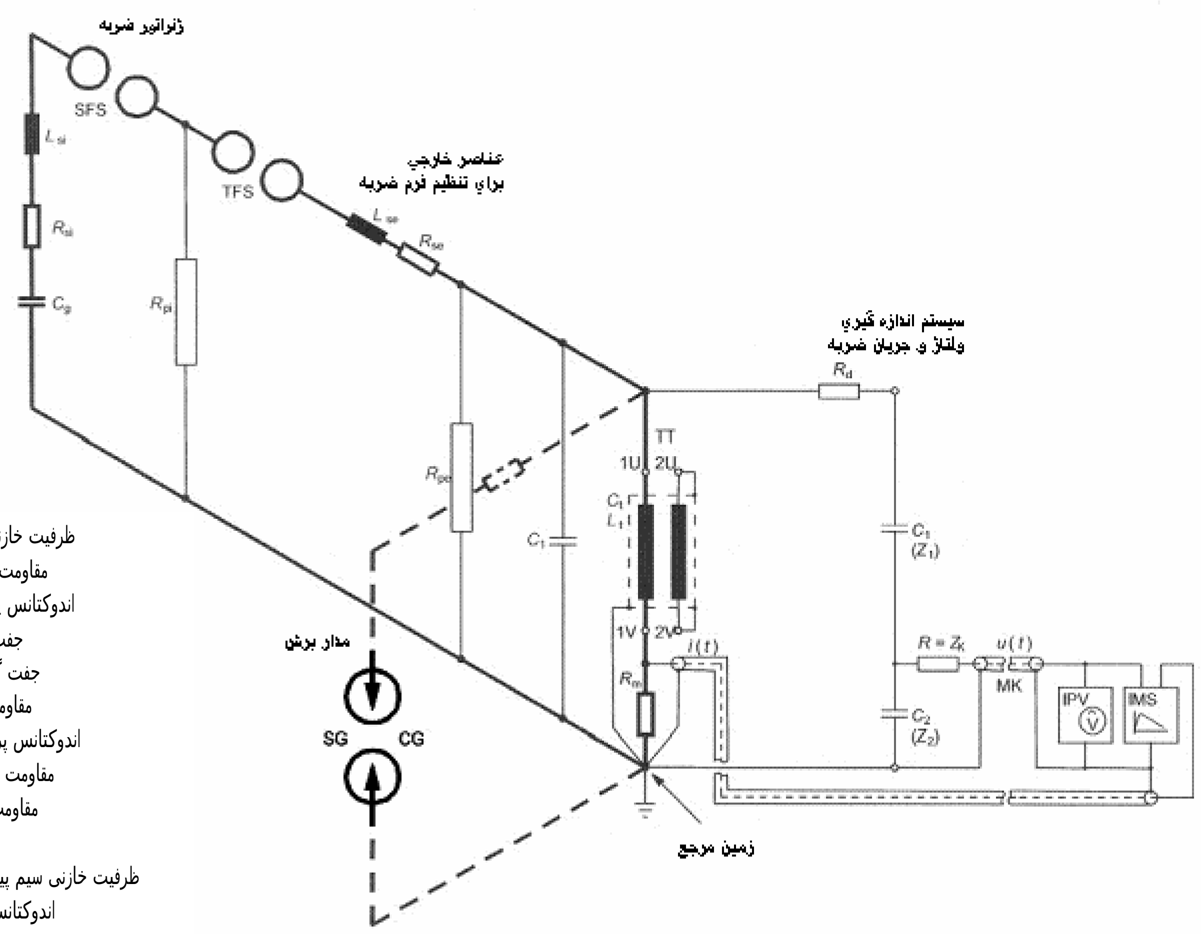
شکل ۱۰-۴ : موج ضربة کلید زنی؛ IEC و IEEE

۱۰- ۵ اتّصالات تست

۱۰- ۵- ۱ کلیات

شکل ۱۰- ۵ مدار تست ضربه و اجزاء آن را نشان می دهد . برای هر جزء توضیحات لازم در بندهای زیر از ضمائم ارائه شده است :

- ژنراتور ضربه — بند ۲ ضمیمه ۱۰
- پیش- محاسبهٔ پارامترهای تست ضربه — بند ۳ ضمیمه ۱۰
- اندازه گیری ولتاژ ضربه — بند ۴ ضمیمه ۱۰
- اندازه گیری جریان ضربه — بند ۵ ضمیمه ۱۰
- جفت- گوی — بند ۴ ضمیمه ۱۰
- گوی های برش (chopping gap) — بند ۲ ضمیمه ۱۰
- زمین کردن مدار تست ضربه — بند ۶ ضمیمه ۱۰



C_g = ظرفیت خازنی ژنراتور ضربه
R_{si} = مقاومت میرا ساز داخلی
L_{si} = اندوکتانس پراکندگی داخلی
SFS = جفت گوی کلیدزنی
TFS = جفت گوی قطع کننده
R_{pi} = مقاومت تخلیهٔ داخلی
L_{se} = اندوکتانس پراکندگی خارجی
R_{se} = مقاومت میرا ساز خارجی
R_{pe} = مقاومت تخلیهٔ خارجی
C_l = خازن بار
C_t = ظرفیت خازنی سیم پیچ ترانسفورماتور
L_t = اندوکتانس ترانسفورماتور
R_d = مقاومت میرا ساز
$Z_{1,2}$ = امپدانس های مقسم ولتاژ ضربه
R_m = شانت اندازه گیری
SG = جفت گوی
CG = گوی های برش

شکل ۱۰- ۵ : چیدمان پایهٔ مدار تست و اندازه گیری ضربه ؛ اتصالات مورد آزمایش برای تست ضربهٔ صاعقه

کل مدار تست را می توان به سه مدار مجزا تقسیم نمود :

- مدار اصلی (مدار تخلیهٔ اصلی) - در شکل ۱۰- ۵ به صورت پر رنگ نشان داده شـده است .
- مدار اندازه گیری ولتاژ - در شکل ۱۰- ۵ با خط های باریک نشان داده شده است .
- مدار برش برای امواج پشت بریده و پیشانی بریده (در شکل ۱۰- ۵ با خطوط منقطـع پر رنگ نشان داده شده است). این مدار همچنین در صورت لزوم شامل جفت گـوی برای کالیبراسیون تجهیزات اندازه گیری ولتاژ می باشد .

مدار تست ضربهٔ کلید زنی در اصل مشابه مدار فوق می باشد . تنها مقادیر مقاومـت هـا و خازن ها متفاوت است .

لازم است سیستم های اندازه گیری ولتاژ و جریان از حلقه های جریان- بالای نشان داده شده با خطوط پررنگ در شکل ۱۰- ۵ بدور باشند .

۱۰- ۵- ۲ ضربهٔ صاعقه

ترکیب اتّصالات تست تأثیر عمده ای بر تست ضربهٔ صاعقهٔ ترانسفورماتور دارد :

- بر تنش های وارده به خود ترانسفورماتور
- بر تسهیل آشکارسازی خطا و مکان یابی عیب
- بر دست یابی به شکل موج ولتاژ دلخواه و تعیین پارامترهای مدار تست ضربه

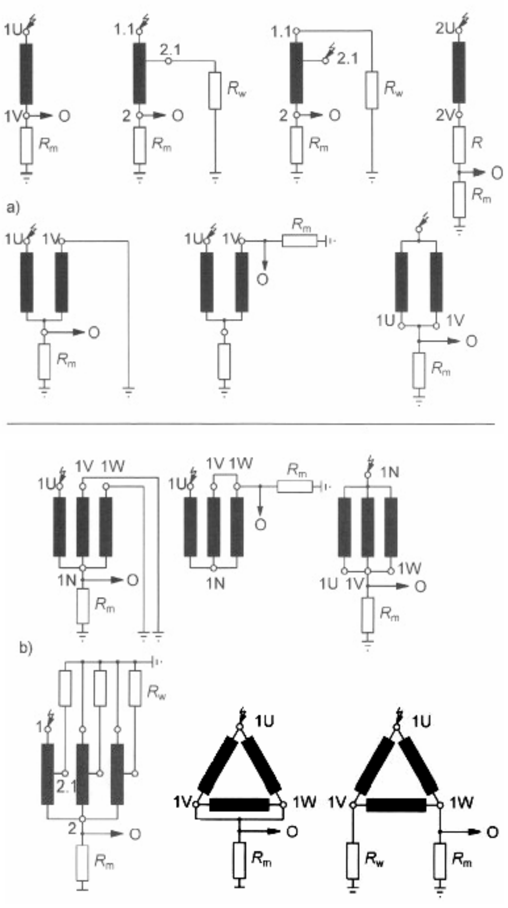
معمولاً ترکیب اتّصالات تست به گونه ای انتخاب می شود که بـر شـرایط بهـره بـرداری منطبق گردد . مطابق آنچه که اکثراً در عمل پیش می آید ، ضربهٔ صاعقه فقط به صـورت تک فاز اعمال می گردد . شکل ۱۰- ۶ قابل استفاده ترین مـدارها را بـرای تسـت ضـربهٔ صاعقه نشان می دهد (در این شکل تنها اندازه گیری جریان نشان داده شده است ؛ برای سایر روش های اندازه گیری ، بند ۵ ضمیمهٔ ۱۰ را ببینید) .

ترمینال هایی از سیم پیچ که تست نمی شوند ، بایـد کـاملاً (solidly) بـه زمـین وصـل گردند . اتو ترانسفورماتورها (≥Ω ۴۰۰) استثنا می باشند [3] . برای سایر استثنائات (مثلاً برای افزایش مدت زمان پشت موج) بند ۱ ضمیمهٔ ۱۰ و بند ۳ ضمیمهٔ ۱۰ را ببینید .

سیم پیچ هایی که تست نمی شوند اتّصال کوتاه شده و کاملاً زمین می شوند . اگر زمـان تعیین شدهٔ پشت موج قابل دست یابی نباشد ، ممکن است ایـن سـیم پـیچ هـا از طریـق مقاومت زمین شوند ، بند ۱ ضمیمهٔ ۱۰ را ببینید .

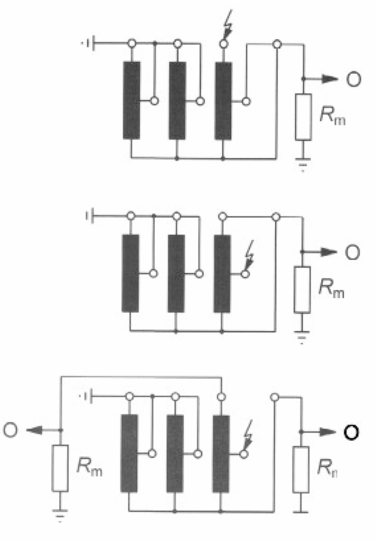
IEC تأکید می کند که نوترال بایستی کاملاً زمین شود یا از طریق یـک شـنت امپـدانس پائین زمین گردد .

در صـورتی کـه سیسـتم تنظـیم ولتـاژ بـه شـکل مثبـت/ منفـی و یـا کلـی/ جزئـی (coarse/fine) باشد ، موقعیت تپ جزئی به جهت گردش سـلکتور (مطـابق آنچـه کـه طراحی شده) بستگی دارد . بدین ترتیب ، ضربه ممکـن اسـت بسـته بـه نحـوهٔ گـردش سلکتور ، به ورودی تپ جزئی یا خروجی تپ وسط کلید تنظـیم ولتـاژ زیـر بـار (on-load-tap changer) وارد گردد ، شکل ۱۰- ۷ را ببینید .



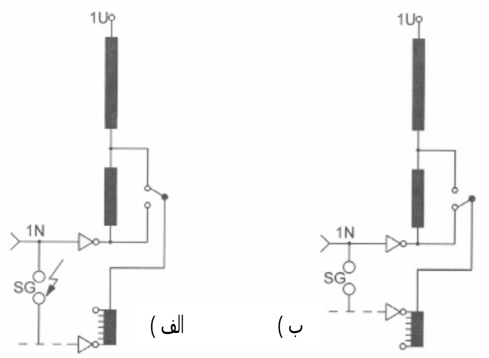
R_m = شنت اندازه گیری
R_W = مقاومتی با مقدار برابر با امپدانس موجی خط
R = مقاومت سری
O = ثابت

شکل ۱۰- ۶ الف : اتّصالات متداول سیم پیچ برای تست ضربهٔ صاعقه؛
ترانسفورماتور های تک فاز و سه فاز



R_m = شانت اندازه گیری
O = اسیلوسکوپ

شکل ۱۰- ۶ ب : اتّصالات معمول سیم پیچ برای تست ضربهٔ صاعقه؛ اتو ترانسفورماتور



الف) = جهت مینیمم به ماکزیمم
ب) = جهت ماکزیمم به مینیمم
SG = جفت گوی حفاظتی

شکل ۱۰- ۷ : اتّصال سیم پیچ تنظیم ولتاژکلی و جزئی

تغییر وضعیت کلید موجب عوض شدن نحوهٔ توزیع ولتاژ در طول سیم پیچ می شود و برای یکی از دو مدار شکل ۱۰- ۷ ، نحوهٔ اتّصال ممکن است به وقوع تخلیهٔ الکتریکی روی یکی از جفت گوی های حفاظتی سلکتور سویچ تپ چنجر بیانجامد . این تخلیه در نتایج ثبت شدهٔ توسط اسیلوسکوپ قابل مشاهده است که بایستی به دقّت تحلیل گردد .

اگر نقطهٔ نوترال مستقیماً تست گردد (شکل ۱۰- ۶ الف) هر سه ترمینال خط بایستی زمین گردد . در این صورت تولرانس بزرگتری بایستی پذیرفته شود ، بند ۱ ضمیمهٔ ۱۰ را ببینید .

وضعیت تپ (tap position)

استانداردهای IEC [3] و IEEE [51] مقررات متفاوتی برای انتخاب موقعیت تپ دارند .

مطابق IEC :

در صورت عدم توافق برای تست در یک تپ خاص ، تست در دو تپ انتهایی و یک تپ اصلی انجام مي گيرد ؛ هر یک از سه فاز یک ترانسفورماتور سه فاز یا سه ترانسفورماتور تک فاز (که باهم یک بانک سه فاز را تشکیل می دهند) فقط در یکی از سه تپ فوق الذکر تست می شوند ؛ در هر تپ فقط یک بار تست . اگر محدودهٔ تنظیم ولتاژ ۵% یا کمتر باشد تنها تپ اصلی انتخاب می شود . برای تست ضربهٔ نوترال IEC 60076-3 [3] بند 7-4-3 را ببینید .

مطابق IEEE :

تست ضربه بایستی در تپی از بوبین تحت آزمایش انجام شود که حداقل تعداد دور الکتریکی در مدار باشد . به عبارت دیگر در این حالت سایر سیم پیچ ها و تپ های ترانسفورماتور منفصل بوده و حامل جریان نمی باشند .

تست ضربه ترمینال نوترال

اگر مقدار نامی ولتاژ ایستادگی ضربه برای ترمینال نوترال سیم پیچ تعیین شده باشد ، لازم است از تحمل این ولتاژ با یکی از دو روش تست زیر اطمینان حاصل کرد :

الف) اِعمال غیر مستقیم :

ضربه های تست به هر یک از ترمینال های خط یا به تمام ترمینال های خط متصل به هم سیم پیچ سه فاز اعمال می شود . ترمینال نوترال یا از طریق یک امپدانس به زمین وصل شده و یا باز است . هنگام اعمال ضربهٔ استاندارد صاعقه به ترمینال خط ، دامنهٔ ولتاژ ایجاد شده در نوترال بایستی برابر سطح نامی ضربهٔ ترمینال نوترال باشد . برای این تست ، شکل موج معینی تعریف نگردیده است [3] .

ب) اعمال مستقیم :

ضربه های تست مستقیماً به نوترال اعمال می شود . تمام ترمینال های خط زمین می شود ، شکل ۱۰- ۶ ب را ببندید . با این روش تست افزایش زمان پیشانی تا 13 µs [3] یا 10 µs [51] مجاز است .

IEEE ، فقط روش اعمال مستقیم را مجاز می داند .

۱۰- ۵- ۳ ضربهٔ کلید زنی

مدار اتّصالات ترانسفورماتور مشابه تست ولتاژ القایی می باشد ، بخش ۸ را ببینید .

مدار اتّصالات ترانسفورماتور تک فاز در شکل ۱۰- ۸ الف ارائه شده است .

مشابه تست ولتاژ القایی ، توزیع ولتاژ در طول سیم پیچ خطی است . بر حسب نسبت تبدیل ، ولتاژ در سیم پیچ های دیگر نیز القاء می شود . بنابراین نیازی به تست مجدد سیم پیچ متناظر هر فاز نیست .

برای تست ضربهٔ کلید زنی معمولاً مدار اتصالات ترانسفورماتور مشابه شرایط بهره برداری است ؛ یعنی نوترال ، زمین شده و تمام ترمینال های دیگر باز بوده یا به نوبت به مقسم اندازه گیری ولتاژ وصل می شود .

معمولاً ضربه به ترمینال دارای بالاترین ولتاژ از هر فاز اعمال می شود . بهتر است در صورت امکان تست به روش مستقیم انجام گیرد ؛ یعنی ولتاژ به خود ترمینال HV اعمال گردد . تنها در موارد استثنایی ولتاژ به ترمینالی با ولتاژ پائین تر اعمال می شود .

در ترانسفورماتورهای سه فاز ، برای اطمینان از تساوی ولتاژ های القایی روی دو فازی که تحت تست نیستند توصیه می شود که این دو ترمینال فشارقوی به همدیگر اتّصال کوتاه گردند .

از لحاظ نظری ، ولتاژ القایی در ترمینال هایی غیر از ترمینالی که ولتاژ به آن اعمال شده است متناسب با نسبت دورها می باشد ، گرچه ممکن است نوسانات ایجاد شده باعث تغییر ولتاژ شود و این بایستی در ولتاژ پایین تر کنترل گردد .

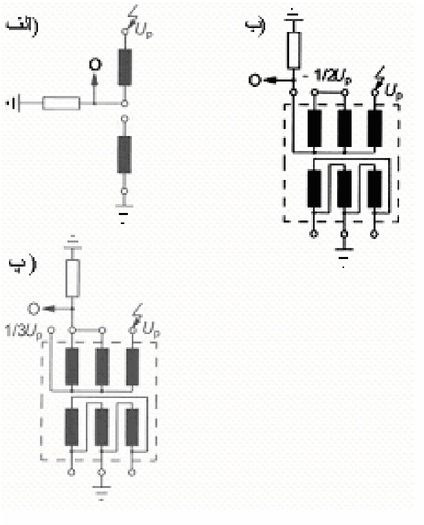
IEC لازم می داند که نوترال ترانسفورماتورهای سه فاز با اتصال ستاره(شکل ۱۰- ۸ ب) کاملاً زمین شود ؛ بدین ترتیب ولتاژ بین فازها ۱/۵ برابر ولتاژ تست خواهد بود .

شکل های ۳۶ و ۳۷ ، IEEE C57.98 سایر اتصالات را برای گروه های برداری دیگر نشان می دهد ، برای مثال شکل ۱۰- ۸ پ را ببینید .

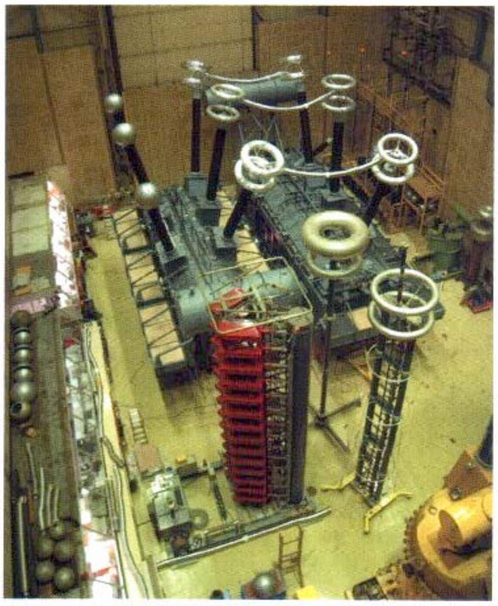
IEEE تست ضربهٔ کلید زنی را یک تست فاز به زمین می داند .

وضعیت تپ :

طی تست ضربهٔ کلید زنی درکل الزامی مربوط به وضعیت تپ وجود ندارد . حالتی که دو سیم پیچ یا بیشتر لازم است همزمان تحت تست ضربهٔ کلید زنی قرار گیرند استثنا می باشد . در این صورت وضعیت تپ بایستی طوری انتخاب شود که ولتاژ سیم پیچی که ولتاژ مستقیماً به آن اعمال نمی شود در حد امکان نزدیک به ولتاژ تست تعیین شدهٔ آن باشد .



شکل ۱۰- ۸ : اتّصالات معمول سیم پیچ برای تست ضربهٔ کلیدزنی



ترانسفورماتور شیفت فاز ۸۰۰ MVA در حال آماده سازی برای تست ضربه

۱۰- ۵- ۴ ضربهٔ مستقیم یا غیر مستقیم

معمولاً ضربه مستقیماً به ترمینالی که باید تست شود وارد می شود و این ضربه مستقیم نامیده می شود . این فرآیند در هر دو تست ضربهٔ صاعقه و کلیدزنی برقرار است .

در ترانسفورماتورهایی که بدلیل عایق بندی غیر یکنواخت لازم است انتهای سیم پیچ با ولتاژ پائین تری تست گردد از روش غیر مستقیم استفاده می شود . این بدین معناست که ترمینال تحت تست از طریق یک مقاومت به زمین وصل می شود و ضربه به ترمینالی که بالاترین سطح عایقی را دارد اعمال می شود ، بند ۱۰- ۵- ۲ را ببینید .

مقاومت ، دامنهٔ ضربه و شکل ضربه به نحوی تنظیم می شود که سطح عایقی ترمینال مورد آزمایش و ولتاژ مجاز دو سر مقاومت رعایت شود ، در حالیکه دامنهٔ ضربهٔ اعمالی از حداکثرمعین شده بیشتر نگردد (معمولاً کمتر از ۸۰ % سطح عایقی ترمینال دریافت کنندهٔ ضربه) .

۱۰- ۶ فرآیند تست / ضبط شکل موج ها

۱۰- ۶- ۱ بررسی های قبل از تست ضربه

درست قبل از تست ضربهٔ صاعقه لازم است کنترل های زیر را برای ترانسفورماتور مورد آزمایش به عمل آورید :

- حداقل مدت زمانی " ایستایی " (Standing) ترانسفورماتور را چک کنید
- نسبت ولتاژ ، پلاریته و مقاومت سیم پیچ ها را اندازه بگیرید (بخش های ۳ و ۴ را ببینید)
- کیفیت روغن ترانسفورماتور را چک کنید
- رلهٔ بوخهلتس و بوشینگ های روغنی را هواگیری نمائید
- تمام ترانسفورماتورهای جریان بوشینگی موجود را اتّصال کوتاه و زمین کنید
- بوشینگ تپ های خازنی را زمین کنید
- سطح روغن را در OLTC ترانسفورماتور (در صورت وجود) چک کنید
- وضعیت کلید تنظیم ولتاژ زیر بار یا بدون بار (off-load) را کنترل کنید

۱۰- ۶- ۲ تست ضربهٔ صاعقه

انتخاب پارامترهای مدار تست ضربه مطابق بند ۳ ضمیمهٔ ۱۰ صورت می گیرد .

تست ضربهٔ صاعقهٔ واقعی شامل مراحل زیر است :

- بدست آوردن شکل موج ولتاژ ضربه (شکل ۱۰- ۱ تا ۱۰- ۳)
- اعمال ولتاژ ضربه به ترانسفورماتور مورد آزمایش
- کنترل اینکه ترانسفورماتور مورد آزمایش تنش های وارده را بدون آسیب دیدگی تحمل کرده است (مقایسهٔ شکل موج های ضبط شده به روش دیجیتال یا اسیلوسکوپی)

برای اطلاع از توالی و ترتیب اعمال ولتاژ های تست ، بخش ۱۰- ۳- ۱ را ببینید .

ضبط شکل موج ها :

کلّیات :

ولتاژ ضربه و پاسخ جریانی ضربه را می توان به روش دیجیتال یا اسیلوسکوپی ضبط کرد. توصیه می شود از اسباب های ضبط دیجیتال استفاده شود .

پردازش دیجیتال شامل آنالیز تابع انتقال نیز اغلب به عنوان ابزاری کمکی برای آنالیز عیب بکار می رود (IEC 60076-4 [4] بند 10 و شکل B17 را ببینید) .

مطابق IEC :

موج ولتاژ ضربهٔ صاعقه و حداقل یک مشخصهٔ دیگر (معمولاً جریان ضربه) لازم است توسط سیستم اندازه گیری ضبط شود ، بند ۵ ضمیمهٔ ۱۰ را ببینید . تمام ضربه های بزرگتر از ۵۰% (IEC [3]) بایستی ضبط گردد .

معمولاً جریان ضربه پارامتر حساس تری برای آشکارسازی عیب است . بنابراین منحنی های ضبط شده توسط اسیلوسکوپ معیار اصلی برای ارزیابی نتایج تست است .

برای کمک به تعیین عیب ها می توان از ثبت همزمان شکل موج ها با دو مقیاس زمانی متفاوت توسط اسیلوسکوپ استفاده کرد .

مطابق IEEE :

علاوه بر ولتاژ ضربه لازم است جریان سیم پیچ یا جریان نقطهٔ نوترال ضبط گردد . تمام ضربه های > ۴۰% بایستی ضبط گردد [51] .

برای ارزیابی نتایج تست یا مکان یابی خطا می توان از سایر انواع روش های کنترل، همچون روش های دیگر اندازه گیری جریان ، میکروفن (ضبط صدا) و غیره استفاده کرد.

جدول زیر راهنماي تعیین مقیاس زمان (time scale) در طی تست ضربهٔ صاعقه می باشد (FW = موج کامل ، CW = موج بریدهٔ ضربهٔ صاعقه) :

دیجیتال [μs]	آنالوگ [μs]		
۱۵۰ (- ۱۰۰)	۱۰۰- ۵۰	ولتاژ	FW
۱۵۰ (- ۱۰۰)	۱۰۰- ۵۰	جریان	
۲۵- ۱۰	۱۰	ولتاژ	CW
۲۵ (- ۱۰)	۲۵- ۱۰	جریان	

۱۰- ۶- ۳ تست ضربة کلید زنی

برای جلوگیری از تخلیة الکتریکی خارجی توصیه می شود که تست با پلاریتة منفی انجام شود . تست ضربة کلید زنی با پلاریتة مثبـت (مجـاز طبـق IEEE) الزامـات بیشـتری را برای ملاحظات ابعادی آزمایشگاه ایجاد می کند . در مقایسه با تست ضـربة صـاعقه لازم است فواصل خارجی هوایی بین قسمت های برقدار و زمین بیشتر باشـد . شـکل ۱۰- ۴۱ بند ۱۱ ضمیمة ۱۰ مقادیر متوسط فاصله را برای ولتاژ تخلیه بـا احتمـال ۵۰ % شکسـت (50% flashover-voltage) در مورد ضربة صاعقه و کلیدزنی با پلاریتة مثبت و منفی ارائه می کند .

تست معمولاً به روش مستقیم انجام می شود ، یعنی اعمال مستقیم موج ولتاژ ضـربه بـه سیم پیچ فشار قوی ، بخـش ۱۰- ۵- ۴ را ببینیـد . ولتـاژ ایسـتادگی ضـربه بایسـتی بـه سیم پیچ با بالاترین ولتاژ نامی اعمال گردد .

هم مشخصة جریان ضربه سیم پیچ و هم مشخصة ولتاژ ضربه را می توان بـرای ارزیـابی نتایج بکار برد .

تست ضربة کلید زنی در عمل شامل مراحل زیر است :

- بدست آوردن شکل موج ولتاژ ضربه (شکل ۱۰- ۴)
- اعمال ولتاژ ضربه به ترانسفورماتور مورد آزمایش
- کنترل اینکه ترانسفورماتور مورد آزمایش ، تنش های وارده را بـدون آسـیب دیـدگی تحمل کرده است (مقایسة شکل موج های ضبط شده توسط اسیلوسکوپ)

برای اطلاع از توالی و ترتیب اعمال ولتاژهای تست ، بخش ۱۰- ۳- ۲ را ببینید .

برای دستیابی به مدت زمان تعیین شـده بـرای قطـع خـط صـفر T_Z ، لازم اسـت پیش مغناطیس شدگی هسته با اعمال ضربه هایی با پلاریتة مثبت و ولتـاژی حـدود ۲۵% تا ۵۰% ولتاژ نامی که قبل از موج کامل ۱۰۰% اعمال می شود تأمین گردد .

در اثر پدیدة لرزش (تغییر الاستیک طـول بخش هـای هسـتة آهـن (magnetostriction) ناشی از انجام تست ، صدایی نسبتاً بلند از داخل مخـزن شـنیده می شود که نباید آن را به وقوع عیب درون ترانسفورماتور تعبیر کرد .

ضبط شکل موج ها :

کلّیات :

ولتاژ ضربة کلیدزنی و پاسخ جریانی ضربه را می توان به صورت آنالوگ یا دیجیتال ضـبط کرد . استفاده از اسباب های ضبط دیجیتال توصیه می شود .

پردازش دیجیتالی که شامل آنالیز تابع انتقال باشد اغلب به عنوان ابزاری کمکی برای تحلیل خطا بکار می رود (IEC 60076-4 [4] بند 10 و شکل B17 را ببینید) .

IEC و IEEE تنها ضبط موج ولتاژ را لازم می دانند . ضبط مشخصه ای دیگر (همچون جریان سیم پیچ) برای ارزیابی نتیجهٔ تست قابل استفاده است .

در موارد عدم انطباق ، سایر انواع روش های کنترل همچون روش های دیگر اندازه گیری جریان ، ضبط صدا و غیره ممکن است اطلاعات اضافی برای کمک در تعیین عیب بدست دهد .

مقیاس زمانی : ۱۰۰۰ تا ۲۵۰۰ µs برای ولتاژ و جریان ضربه .

برای ضبط دیجیتال نرخ نمونه برداری حدود ۱۰ MHz کافیست .

۱۰- ۷ ارزیابی نتایج تست و آشکارسازی عیب

۱۰- ۷- ۱ تست ضربهٔ صاعقه

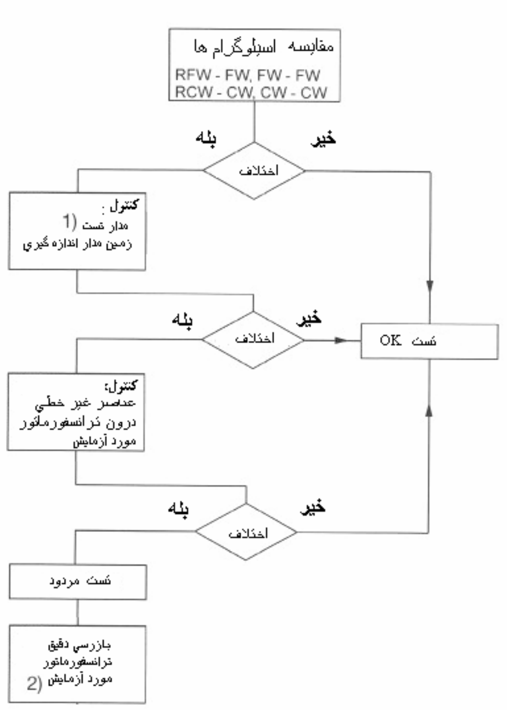
برای برآورد معیار پذیرش تست ، شکل موج های ضبط شدهٔ (دیجیتال و اسیلوگراف) RFW و FW یا RCW و CW و همچنین FW یا CW مقایسه می شوند . مشخصهٔ جریان معمولاً پارامتر حساس تری برای آشکارسازی عیب می باشد . اگر مقایسه ، نشان دهندهٔ تغییرات نباشد ، ترانسفورماتور تست ضربهٔ صاعقه را با موفقیت سپری کرده است .

در صورت ملاحظهٔ انحراف در شکل موج لازم است دلیل آن تعیین شود . این کار نیاز به تجربهٔ بالایی در زمینهٔ تست دارد . هنگامی که مدار تست بیش از اندازه پیچیده باشد ، پدیده های فرکانس بالای بوجود آمده باعث سردرگمی در مورد دلایل اصلی بروز عیب خواهد شد . دیاگرام منطقی شکل ۱۰- ۹ به عنوان راهنمایی اولیه برای تعیین عیب ارائه می شود .

نمونه هایی از شکل موج های واقعی ضبط شده در IEC 60076-4 [4] و IEEE C57.98 [58] ارائه شده است .

۱۰- ۷- ۲ تست ضربهٔ کلیدزنی

برای برآورد معیار پذیرش تست ، شکل موج های ضبط شدهٔ (دیجیتال و اسیلوگراف) RFW و FW مقایسه می شود و FW ها باهم مقایسه می شوند . اگر مقایسه نشان دهندهٔ تغییرات نباشد ، ترانسفورماتور تست ضربهٔ کلیدزنی را با موفقیت سپری کرده است . به هر حال باید در نظر داشت که در اثر اشباع هسته که زمان وقوع آن به مقدار ولتاژ اعمالی وابسته است ، نمی توان زمان طی شده تا قطع خط صفر را ثابت نگه داشت .



1) = برای مثال کنترل آتش ژنراتور ضربه

2) = برای مثال اتصالات سیم پیچ (شکل ۱۰- ۷)

شکل ۱۰- ۹ : آشکارسازی عیب در تست ضربه

برای سایر عدم انطباق ها ، که اکثراً از نوع اعوجاج های فرکانس بالا می باشد ، لازم است علّت ، جستجو گردد . بدلیل اینکه ترکیب مدار تست نسبتاً پیچیده است ، غیر از خود ترانسفورماتور ، ممکن است مدار تست ضربه نیز موجب اشکال شود . دیاگرام منطقی شکل ۲- ۴۶ در اینجا نیز برای تعیین عیب پیش آمده در طی ضربة صاعقه قابل استفاده است .

معمولاً تشخیص شکست ولتاژ در داخل ترانسفورماتور مورد آزمایش آسان است .

بدلیل توزیع خطی ولتاژ ضربه در طول سیم پیچ ، شکست الکتریکی اغلب به شکل اتصال کوتاه بین سیم پیچ ها یا بخش هایی از سیم پیچ و یا تخلیة الکتریکی از سیم پیچ نسبت به زمین روی می دهد . این انواع عدم انطباق به راحتی به شکل اختلاف در شکل موج های ضبط شده قابل مشاهده است . نمونه هایی از شکل موج های واقعی ضبط شده در IEC 60076-4 [4] و IEEE C57.98 [58] ارائه شده است .

۱۰- ۸ کالیبراسیون سیستم اندازه گیری ضربه / عدم قطعیت اندازه گیری

کالیبراسیون در استانداردهای زیر توضیح داده شده است :

- IEC 60060-1, High-voltage test techniques -
  Part 1: General definitions and test requirements [21]
- IEC 60060-2, High-voltage test techniques -
  Part 2: Measuring systems [22]
- IEC 1083-1, Digital recorders for measurements in
  high-voltage impulse tests -
  Part 1: Requirements for digital recorders [32]
- IEC 1083-2, Digital recorders for measurements in
  high-voltage impulse tests -
  Part 2: Evaluation of software used for the determination
  of the parameters of impulse waveforms [33]
- IEEE Std 4, Standard Techniques for High Voltage Testing [53]

وجود یک سیستم مرجع در آزمایشگاه معمولاً بهترین راه حل برای کالیبراسیون سیستم اندازه گیری ضربه می باشد ، همچنین بند ۶ و ۷ ضمیمة ۱۰ را ببینید .

ضمیمهٔ ۱۰ :

تست ضربهٔ صاعقه و کلیدزنی

ضمیمهٔ ۱۰- ۱ شکل موج و ارزیابی آن

مطابق IEC 60060-1 [21] و IEEE Std 4 [53] دامنهٔ نوسانات احتمالی در قلّهٔ موج ولتاژ در طرف پیشانی نباید از ۵% مقدار پیک بیشتر شود (مطابق توضیحات زیر تحت شرایط ویژه IEC مقدار کمتر از ۱۰% را مجاز می داند) . شکل های ۱۰- ۱۰ و ۱۰- ۱۱ مقدار پیک شکل موج ولتاژ استاندارد را نشان می دهد .

دستیابی به تولرانس های ذکر شده در مراجع فوق برای زمان پیشانی و پشت موج همیشه ممکن نیست .

افزایش تولرانس های زمان پیشانی (بزرگتر از ۳۰% ±)

زمان پیشانی را در اصل مقدار مقاومت سری R_S و ظرفیت خازنی مؤثر ترانسفورماتور مورد آزمایش C_t تعیین می کند ، بند ۳ ضمیمهٔ ۱۰ را ببینید . اگر خازن C_t بزرگ باشد ، مقاومت R_S باید کم شود تا بتوان به زمان پیشانی مورد نظر دست یافت . این عمل گاهی اوقات باعث نوساناتی در قلّهٔ ولتاژ می شود بطوری که دامنهٔ آن از محدودهٔ ۵% مجاز فراتر می رود .

پس لازم است توافقی صورت گیرد . در چنین مواردی (مطابق IEC) نوسان قلّهٔ ولتاژ تا ۱۰% قابل افزایش است ، به شرطی که زمان پیشانی در محدودهٔ تولرانس قرار گیرد . در صورت احتمال تجاوز این مقدار می توان زمان پیشانی را طولانی گرفت .

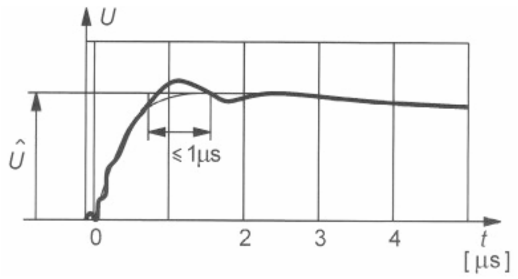
با روش ضربهٔ مستقیم در تست نقطهٔ نوترال ، زمان پیشانی طولانی تـــــر از استاندارد غیر قابل اجتناب است . طبق IEC تا ۱۳ μs و طبق IEEE تا ۱۰ μs مجاز می باشد . در بهره برداری ، هیچ اضافه ولتاژ گذرایی که از خط هوایی وارد می شود ، مستقیماً به نوترال نمی رسد و بنابراین موج انتقالی همیشه پیشانی طولانی خواهد داشت .

افزایش تولرانس مدت زمان نصف پشت موج (بزرگتر ۲۰% ±)

هنگام تست ضربهٔ سیم پیچ فشار ضعیف ترانسفورماتورهای بزرگ قدرت ، زمان پشت موج (۴۰ تا ۶۰ μs) بدلیل اندوکتانس کم سیم پیچ ، با استفاده از مدارات تست متداول قابل دستیابی نیست ، بند ۳ ضمیمهٔ ۱۰ را ببینید .

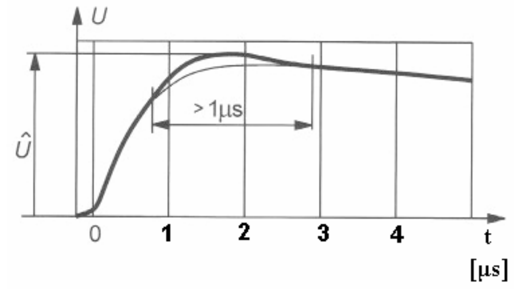
مدار ویژه ای مورد نیاز است و یا در موارد خاص لازم است توافق صورت گیرد :

- افزودن مقاومت بین سیم پیچ هایی که تست نمی شوند و زمین . در حالت عادی سیم پیچ هایی که تست نمی شوند ، اتصال کوتاه شده و کاملاً به زمین وصل می گردند .



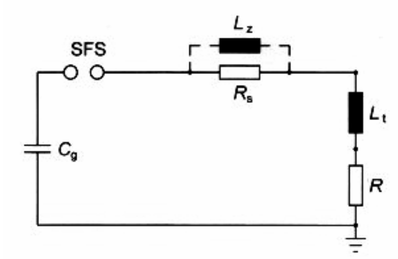
$\hat{U}$ = ولتاژ اصلی پیک در تست ضربهٔ صاعقه

شکل ۱۰- ۱۰ : اسیلوگرام ولتاژ ضربه دارای فراجهش (over-shoot)



$\hat{U}$ = ولتاژ اصلی پیک در تست ضربهٔ صاعقه

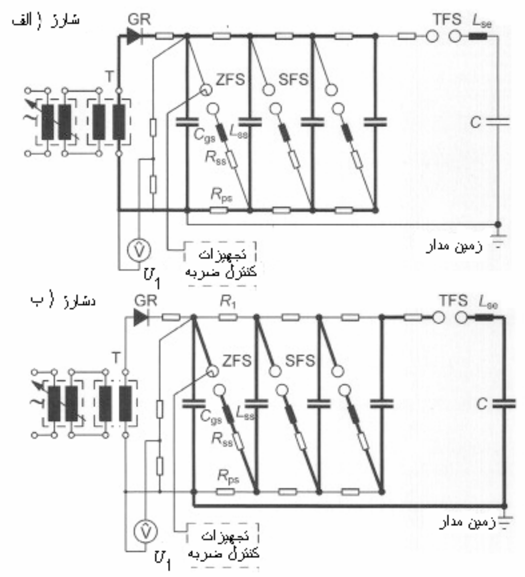
شکل ۱۰- ۱۱ : اسیلوگرام ولتاژ ضربه دارای فراجهش



L_z = سلف کمکی

R = مقاومت سری با سیم پیچ

شکل ۱۰-۱۲ : شکل سادهٔ مدار ضربه ، سیم پیچ با اندوکتیویتهٔ پایین
L_t <۲۰mH



T	=	ترانسفورماتور فشارقوی
GR	=	یکسوساز
R_1	=	مقاومت های شارژ
U_1	=	ولتاژ شارژ هر طبقه
C_{gs}	=	ظرفیت خازنی هر طبقه
R_{SS}	=	مقاومت میرا ساز هر طبقه
R_{ps}	=	مقاومت تخلیهٔ هر طبقه
L_{ss}	=	اندوکتانس پراکندگی هر طبقه
ZFS	=	جفت گوی آتش
SFS	=	جفت گوی وصل هر طبقه
TFS	=	جفت گوی قطع
L_{se}	=	اندوکتانس پراکندگی خارجی
C	=	ظرفیت خازنی بار مورد آزمایش

شکل ۱۰-۱۳ : ژنراتور ایمپالس (مدار مارکس) :
الف) شارژ
ب) دشارژ

مطابق IEC :

_ ماکزیمم ولتاژ ظاهر شده روی ترمینال هایی که تست نمی شوند برای اتصال ستاره از ۷۵% ولتاژ تست و برای اتصال مثلث از ۵۰% ولتاژ تست نباید بیشتر گردد .

_ مقاومت زمین کننده نباید از ۴۰۰ Ω بیشتر شود .

مطابق IEEE :

_ ماکزیمم ولتاژ ظاهر شده روی ترمینال هایی که تست نمی شوند نباید از BIL ۸۰ % تجاوز نماید .

_ مقاومت زمین کننده :

ولتاژ نامی سیستم ≤ ۳۴۵ ، ۵۰۰ ، ۷۶۵ kV -
مقاومت مربوطه ≤ ۴۵۰ ، ≤ ۳۵۰ ، ≤ ۳۰۰ Ω

- افزودن مقاومت بطور سری با سیم پیچ مورد آزمایش ، شکل ۱۰- ۱۲ را ببینید . عایق بندی اصلی (نسبت به زمین) با این مدار تست می شود ، اما تنش وارده به عایق بندی طول سیم پیچ کمتر است .

IEC اصولاً قرار دادن مقاومت سری را با سیم پیچ مورد آزمایش مجاز می داند .

در چنین مواردی IEEE حداقل ظرفیت خازنی ژنراتور ضربه را ۰/۰۱۱ µF تعیین می کند . در صورت دستیابی به این ظرفیت خازنی موج کوتاهتر مورد قبول است .

- افزایش اندوکتانس کل با استفاده از یک سلف کمکی موازی با مقاومت سری R_s ، شکل ۱۰- ۱۲ را ببینید .

معمولاً پشت موج ضربهٔ ولتاژ ، به یک فراجهش با پلاریتهٔ مخالف می انجامد . موج ضربه ، ولتاژی ، با میرایی شدید است . تنها در چند مورد استثنایی مشخصهٔ ولتاژ کاملاً غیر نوسانی است . دامنهٔ فراجهش نباید از ۵۰% مقدار قلّهٔ ضربهٔ ولتاژ بیشتر گردد [4] .

ضمیمهٔ ۱۰- ۲ تولید ولتاژ ضربه با دامنهٔ زیاد

برای تست ترانسفورماتورهاي قدرت با اضافه ولتاژهای صاعقه و کلیدزنی با دامنهٔ زیاد ، از ژنراتور ضربه استفاده می شود .

اصولاً هر ژنراتور ضربه از تعدادی خازن C_{gs} تشکیل شده است که بطور موازی شارژ شده و بطور سری تخلیه می شوند . بنابراین پیک ولتاژ تخلیه (مقدار ایده آل) برابر جمع ولتاژهای نهایی شارژ خازن ها خواهد بود .

این ژنراتور ، ژنراتور مارکس نام دارد . این ژنراتور برای اولین بار در سال ۱۹۲۳ توسط پروفسور اروین مارکس (Braunschweig Germany) طراحی شد .

تک تک خازن ها تا ولتاژ تعیین شده که معمولاً در محدودهٔ ۰ تا ۲۰۰ kV می باشد شارژ می شوند . با آتش جفت گوی ZFS بقیهٔ جفت گوی های SFS آتش می شوند . ولتاژ خروجی کل برابر جمع ولتاژهای شارژ خازن هاست .

مدار تست از طریق یک جفت گوی قطع کننده ، TFS به بار وصل می شود . این جفت گوی مدار تخلیه را که در شکل ۱۰- ۱۳ ب به صورت پررنگ نشان داده شده است می بندد . فعال سازی سیستم آتش جفت گوی ZFS و تریگر کردن ژنراتور ضربه به روش های مختلفی قابل انجام است ؛ از آن جمله می توان به افزایش ولتاژ شارژ U_1 تا ولتاژ تخلیهٔ ZFS ، کاهش فاصلهٔ ZFS در ولتاژ شارژ ثابت و یا تریگر کردن ZFS توسط پالس الکتریکی اشاره کرد .

شکل ۱۰- ۱۴ مدار معادل ژنراتور ضربه با بار C (ترانسفورماتور مورد آزمایش) را در لحظهٔ تخلیه نشان می دهد .

شکل موج ضربهٔ ولتاژ تولید شده ، در اصل توسط مقاومت میرا ساز R_s (تغییر دهندهٔ زمان پیشانی) ، مقاومت تخلیهٔ R_p (تغییر دهندهٔ زمان نصف پشت موج) و اندوکتانس نشتی مدار تست ضربه L_s (غیر قابل اجتناب ، نوسانات فرکانس بالای تجمعی) تعیین می شود ، با این شرط که $R_s << R_p$ و $C << C_g$ که برای اکثر مدارات تست برقرار می باشد .

رابطهٔ زیر در مورد ولتاژ ضربه برقرار است :

$$U(t) \approx U_1 \cdot \frac{e^{-\frac{t}{\tau_2}} - e^{-\frac{t}{\tau_1}}}{1-\frac{1}{\tau_2}}$$

که در آن :

τ_1 = ثابت زمانی پیشانی موج

τ_2 = ثابت زمانی پشت موج

$$\tau_1 = R_s \cdot \frac{C \cdot C_g}{C + C_g} \approx R_s \cdot C$$

$$\tau_2 = R_p \cdot (C_g + C) \approx R_p \cdot C_g$$

برای اجتناب از نوسانات تجمعی فرکانس بالا ، لازم است مدار تست دارای میرایی غیر متناوب باشد . لازمهٔ برآورده شدن این شرط رابطهٔ زیر می باشد :

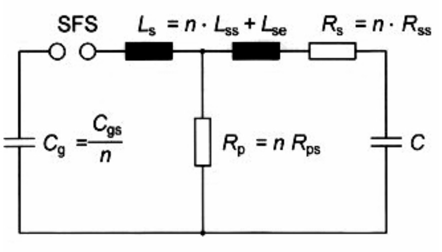
$$R_s \geq \sqrt{\frac{C + C_g}{C \cdot C_g} \cdot L_s}$$

اندوکتانس L_s شامل اندوکتانس مقاومت های میرا ، ارتباطات بین خازن ها ، ارتباطات بین اجزای هر پله (در حدود ۵ μH برای هر پله) و اندوکتانس اتصال تغذیهٔ خارجی L_{se} (حدود ۱ μH برای هر متر) می باشد . اندوکتانس مقاومت ها با انجام اتصال موازی و سیم پیچی دو جهته (bifilar) به اندازهٔ زیادی کاهش می یابد .

پارامترهای مدار تست ضربه با تخمین های زیر برای موج ضربهٔ صاعقهٔ ۱/۲ / ۵۰ μs تعیین می شوند :

زمان پیشانی موج $$T_1 \approx 3 \cdot R_s \cdot \frac{C \cdot C_g}{C + C_g}$$

زمان نصف پشت موج $$T_2 \approx 0.72 \cdot R_p \cdot (C + C_g)$$



C_g = ظرفیت خازنی کل ژنراتور ضربه

n = تعداد طبقات

R_p = مقاومت کل تخلیه

R_s = مقاومت کل سری (مقاومت میرا ساز)

L_s = اندوکتانس کل مدار ضربه

شکل ۱۰- ۱۴ : مدار معادل ژنراتور ضربه؛ تخلیه

برشگر ضربه و مقسم ولتاژ

پیش بینی پارامترهای مدار تست ضربه برای تست ترانسفورماتورهای قدرت بسیار پیچیده است . چنانکه در مدار معادل دیده می شود اندوکتانس ترانسفورماتور مورد آزمایش که با ظرفیت خازنی مؤثر C موازی است ممکن است مقادیری کاملاً متغیر داشته باشد ، بند ۳ ضمیمه ۱۰ را ببینید .

ژنراتورهای ضربه ، ساختاری چندین طبقه دارند . مونتاژ اجزایی همچون خازن ها ، جفت گوی های آتش و مقاومت ها با توجه به مقدار عایق بندی مورد نیاز یکی بر روی دیگری انجام می شود .

سیستم تولید ولتاژ DC (تا حدود ۲۰۰ kV) شامل یک ترانسفورماتور قابل تنظیم فشارقوی است که می تواند خازن ها را از طریق یک یکسو ساز شارژ کند . تغییر جهت یکسوساز ، تولید ضربه های مثبت و منفی را ممکن می سازد . اندازهٔ ژنراتور ضربه معمولاً با انرژی ضربه با واحد Ws بیان می شود :

$$E = \frac{1}{2} \cdot n \cdot C_{gs} \cdot U_1^2 \qquad \text{[Ws]}$$

ژنراتورهای ضربهٔ موجود که برای تست ترانسفورماتورهای قدرت بکار می روند حدود ۱۰۰ - ۵۰۰ kWs انرژی و حداکثر تا ۱۰ MV قابلیت تولید ولتاژ ضربه ای دارند .

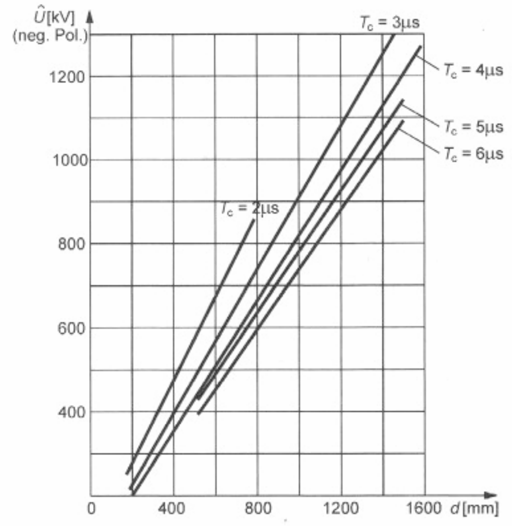
ضمیمهٔ ۱۰- ۲- ۱ تولید ضربهٔ صاعقه بریده

ساده ترین و ارزان ترین وسیلهٔ ایجاد ولتاژ ضربهٔ صاعقهٔ بریده (شکل های ۱۰- ۲ و ۱۰- ۳) یک فاصلهٔ هوایی کنترل نشدهٔ سوزن- سوزن است . این فاصلهٔ هوایی مستقیماً به بوشینگ های ترانسفورماتور وصل شده است و موازی با محور بوشینگ و در ارتفاع نیمهٔ بالای آن قرار دارد . حداقل فواصل عایقی مجاز بوشینگ ها بایستی متناسب با ولتاژ حفظ گردد (۰/۳ تا ۲/۵ m) . طول فاصلهٔ هوایی به تناسب ولتاژ و (حداقل) زمان تا تخلیه (۲ تا ۶ µs مطابق IEC) با استفاده از منحنی های موجود تعیین می گردد .

شکل ۱۰- ۱۵ منحنی های مربوط به موج ضربهٔ صاعقهٔ پشت بریده با پلاریتهٔ منفی را نشان می دهد (شکل موج ۱/۲ / ۵۰ µs ؛ حداقل زمان تا تخلیه ، ۲ تا ۶ µs = T_c) .

بایستی توجه کرد که برای فاصلهٔ هوایی کنترل نشدهٔ سوزن- سوزن بدلیل مکانیزم تخلیه ای که دارد لحظهٔ تخلیه بسیار متغیر است ، این پدیده بویژه برای ولتاژ ضربهٔ پایین تر از ۲۰۰ kV برقرار است . تغییر در زمان برش ، موجب تغییر در منحنی ولتاژ و جریان پس از برش می شود ؛ بدین ترتیب آشکارسازی عدم انطباق ها مشکل تر می شود ، چون تولرانس زمان برش برای موج ضربهٔ پشت بریده نسبتاً بزرگ است (۲ تا ۶ µs مطابق IEC) ، لزومی به انطباق منحنی های ضبط شده توسط اسیلوسکوپ در ناحیهٔ پس از برش وجود ندارد .

این موضوع استفاده از روش سوزن - سوزن را ممکن می سازد .



شکل فاصلهٔ هوایی : 12 / 12 mm مربع
نمودار برای 11 m3/ g , 760 Torr , 20 °C
موج ضربه : 1.2 / 50 µs پلاریتهٔ منفی
T_C = زمان تا برش ، شکل ۱۰- ۲
d = فاصلهٔ هوایی گوی ها
$\hat{U}$ = مقدار پیک موج ولتاژ ضربه

شکل ۱۰- ۱۵ : ولتاژ شکست فاصلهٔ هوایی سوزن- سوزن برای پلاریتهٔ منفی نسبت به میزان فاصلهٔ هوایی

برای موج پیشانی- بریده (شکل ۱۰- ۳) شرایط حساس تر است ، زیرا با تغییـر در زمـان برش ، دامنهٔ ولتاژ نیز تغییر می کند . این وضـعیت در صـورت بـرش پشـت مـوج وجـود نداشت . مطابق IEC و IEEE الزامی برای انجام تست نیست مگر اینکـه تـوافقی ویـژه برای آن انجام شده باشد . انجام تست دقیقاً مطابق با مشخصات مورد نظر استاندارد عملاً غیر ممکن است .

استفاده از جفت گوي های با تریگر کنترل شده معایب فوق الذکر را بـه مقـدار زیـادی از بین می برد .

برای این منظـور از تریگـاترون و جفـت گـوی هـا چنـد طبقـه ای اسـتفاده مـی شـود . بدین وسیله موجی با شیب برش بالا و تولرانس زمانی حدود ۰/۱ µs ± قابل دست یـابی است . برش پیشانی در زمان کوچکتر یا مساوی ۰/۵ µs به آسانی میسر نیست و نیاز بـه تجربهٔ زیادی در امر تست دارد .

ضمیمهٔ ۱۰- ۲- ۲ تولید ولتاژ ضربهٔ کلیدزنی

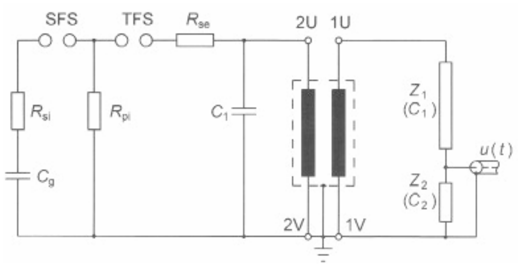
اصولاً از دو روش برای تولید ولتاژ ضربهٔ کلیدزنی استفاده می شود :

- روش متداول تولید ولتاژ ضربه با استفاده از ژنراتور ضربه و اعمال آن بـه سـیم پـیچ فشار قوی است ، شکل ۱۰- ۱۳ را ببینید . مدار تست ضـربه در اصـل مشـابه مـدار تست ضربهٔ صاعقه است ، بخش ۱۰- ۵- ۱ را ببینید .
- روش دوم ، تخلیهٔ یک خازن از طریق سیم پیچ فشار ضعیف است . این روش اغلـب با استفاده از یک ژنراتور ضربهٔ عادی ممکن اسـت ، ظرفیـت خـازنی ژنراتـور ضـربه (impulse capacity) بایستی بین ۱ تا ۲ µF باشد تا از پدید آمدن پیک ولتاژ بالا در شروع موج ولتاژ ضربه اجتناب شود . مدار تست ضـربه در شـکل ۱۰- ۱۶ نشـان داده شده است .

ضمیمهٔ ۱۰- ۳ محاسبهٔ شکل موج ضربه از پیش

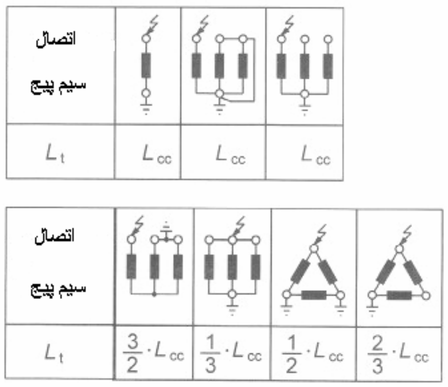
محاسبهٔ پارامترهای یک مدار ضربه برای دستیابی به شکل موج از پیش تعیین شدهٔ ضربه در عمل از مقایسهٔ مدار موجود با مدارهای تسـت هـای قبلـی ترانسـفورماتورهای مشـابه انجام می گردد . در بیشتر موارد می توان اصـلاحات لازم را بـا اعمـال ولتاژهـای پـائین (< ۵۰% ولتاژ تست) در مدار تست ضربه اعمال کرد . این کار زمان زیادی می بـرد . بـا استفاده از سیگنال ژنراتور ضربه ، تحلیلی سریعتر و دقیق تر حاصل می شود زیـرا تعیـین پارامترها با ولتاژهای ضربهٔ پائین (با مقدار پیک ۲۰۰ تا ۸۰۰ V) نیز ممکن است . برنامـه های کامپیوتری به همراه مقادیر تجربی موجب تسریع در دستیابی به پاسـخ بـا حـدا قـل تلاش می شود .

روابط زیر به عنوان راهنما برای تخمین پارامترها بکار می رود . تعیین دقیق اجـزای مـدار ضربه با استفاده از این فرمول ها ممکن نیست .



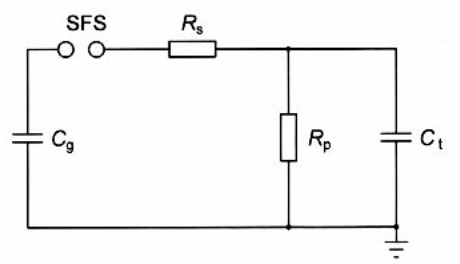
C_g = ظرفیت خازنی ژنراتور ضربه
R_{si} = مقاومت میرا ساز داخلی
SFS = جفت گوی وصل
TFS = جفت گوی قطع
R_{pi} = مقاومت تخلیهٔ داخلی
R_{se} = مقاومت میرا ساز خارجی
C_1 = بار
C_t = ظرفیت خازنی ترانسفورماتور
L_t = اندوکتانس ترانسفورماتور
$Z_{1,2}$ = امپدانس های مقسم ولتاژ ضربه

شکل ۱۰- ۱۶ : مدار معادل تست ضربهٔ کلیـدزنی بـا روش تخلیهٔ خازن به سیم پیچ فشارضعیف



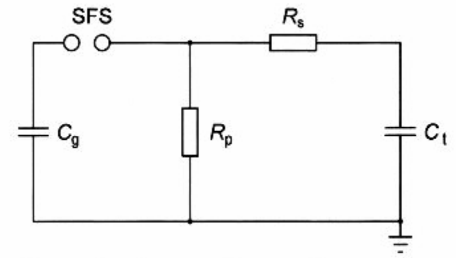
L_{cc} = اندوکتانس اتصال کوتاه
= $(U_{ph}^2 / \omega \cdot S_N) \cdot (\varepsilon_{cc} / 100)$
ε_{cc} = ولتاژ اتصال کوتاه نسبی
U_{ph} = ولتاژ خط به زمین
S_N = توان نامی ترانسفورماتور برای هر فاز

شـکل ۱۰- ۱۷ : انـدوکتانس L_t سـیم پـیچ ترانسـفورماتور؛ سیم پیچ هایی که تست نمی شـوند اتصال کوتاه شده اند .



C_g = ظرفیت خازنی ژنراتور ضربه
SFS = جفت گوی وصل
R_s = مقاومت میرا ساز
R_p = مقاومت موازی (مقاومت تخلیه)
C_t = ظرفیت خازنی بار ترانسفورماتور

شکل ۱۰- ۱۸ : شکل سادة مدار ضربه برای سیم پیچ با اندوکتانس بالا L_t > ۱۰۰ mH .



C_g = ظرفیت خازنی ژنراتور ضربه
SFS = جفت گوی وصل
R_s = مقاومت میرا ساز
R_p = مقاومت موازی (مقاومت تخلیه)
C_t = ظرفیت خازنی بار ترانسفورماتور

شکل ۱۰- ۱۹ : شکل سادة مدار ضربه با سیم پیچ با اندوکتانس L_t > ۱۰۰ mH .

ضمیمة ۱۰- ۳- ۱   پارامترهای مدار تست ضربة صاعقه (۱/۲ / ۵۰ μs)

بین ضربه برای سیم پیچ اندوکتانس بالا (L_t > ۱۰۰ mH) و سیم پیچ اندوکتانس پائین (L_t < ۲۰ mH) اختلاف اساسی وجود دارد . اندوکتانس سیم پیچ ترانسفورماتور L_t را برای اتصالات معین مدار تست می توان تخمین زد ، شکل ۱۰- ۱۷ را ببینید .

ضربه برای سیم پیچ های اندوکتانس بالا

شکل های ۱۰- ۱۸ و ۱۰- ۱۹ مدارهای معادل ساده شده برای تست ضربه را نشان می دهند . اختلاف دو مدار در محل مقاومت موازی R_p می باشد .

برای زمان پیشانی T_1 (شکل ۱۰- ۱) رابطة زیر برقرار است (مربوط به شکل ۱۰- ۱۸):

$$T_1 \approx 3 \cdot \frac{R_s \cdot R_p}{R_s + R_p} \cdot \frac{C_g \cdot C}{C_g + C}$$

که در آن :

$C = C_1 + C_l + C_t$ ظرفیت خازنی کل ، شکل ۱۰- ۵ را ببینید

$C_t = C_B + \sqrt{C_w \cdot C_e}$

C_B = ظرفیت خازنی بوشینگ

C_w = ظرفیت خازنی سری سیم پیچ

C_e = ظرفیت خازنی سیم پیچ نسبت به زمین

و همچنین برای شکل ۱۰- ۱۹ :

$$T_1 \approx 3 \cdot R_s \cdot \frac{C_g \cdot C}{C_g + C}$$

برای زمان پشت موج T_2 (شکل ۱۰- ۱) رابطة زیر برقرار است :

مدار شکل ۱۰- ۱۹

$$T_2 \approx 0{,}7 \cdot (R_s + R_p) \cdot (C_g + C)$$
$$C_t = C_B + C_e$$

که در آن :

C_e = ظرفیت خازنی بخشی از سیم پیچ نسبت به زمین است که به بستگی به مدار توزیع ولتاژ دارد مطابق شکل ۱۰- ۴۰

$$T_2 \approx 0{,}7 \cdot R_p \cdot (C_g + C)$$

برای $R_p >> R_s$ و $C_g >> C$ روابط زیر برقرار است :

$$T_1 \approx 3 \cdot R_{ss} \cdot C$$
$$T_1 \approx 0{,}7 \cdot R_p \cdot C_g$$

برای سیم پیچ های با اندوکتانس حدود ۲۰ تا ۱۰۰ mH ، T_2 از فرمول بالا با دقّت کافی بدست نمی آید و R_p بایستی ۲ تا ۱۰ برابر بیشتر گردد .

ضربه برای سیم پیچ های اندوکتانس پائین (**L_t< ۲۰ mH**)

شکل ۱۰- ۲۰ مدار معادل ساده شده برای تست ضربه را نشان می دهد . برای زمان پیشانی T_1 را بطهٔ بکار برده شده برای سیم پیچ با اندوکتانس بالا در اینجا نیز برقرار است .

برای زمان پیشانی T_2 ، ملاحظات زیر در نظر گرفته شود : شکل موج ولتاژ ضربه فرمی نمایی یا نوسانی دارد که این تابعی از ضریب میرایی k است .

$$k = \frac{R_s}{2 \cdot \sqrt{\frac{L_t}{C_g}}}$$

اگر $k \geq 1$ باشد شکل موج نمایی می شود . این نوع میرایی معمولاً ممکن نیست زیرا در این صورت زمان پیشانی T_1 بیش از اندازه طولانی می شود . در حالت نیمه بحرانی که $k < 1$ می باشد ، شکل موج شروع به نوسان می کند . فراجهش بایستی مطابق IEC به ۵۰% ولتاژ تست محدود شود . در این وضعیت ، اگر ضریب میرایی ۰/۲۵ = k باشد ، T_2 به مقدار زیر خواهد بود :

$$T_2 \approx \sqrt{0{,}5 \cdot L_t \cdot C_g}$$

زمین کردن سیم پیچ هایی که تست نمی شوند از طریق مقاومت ، اندوکتانس معادل سیم پیچ را افزایش می دهد . به هر حال لازم است ولتاژ در دو سر مقاومت از ۷۵% ولتاژ تست همان ترمینال کمتر باشد .

حداقل ظرفیت خازنی ژنراتور ضربه عبارت است از :

$$C_g \approx 2 \cdot \frac{T_2^2}{L_t}$$

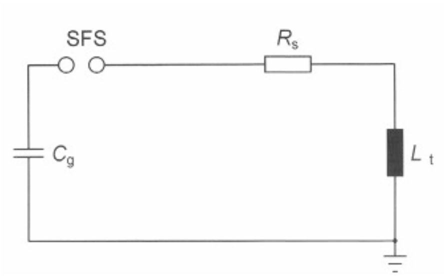
اگر ظرفیت خازنی ژنراتور خیلی کوچک باشد ، مقاومت سری R_s را می توان کاهش داد .

زمان تخلیهٔ مدار ضربه عبارت است از :

$$\tau = \frac{L_t}{R_s}$$

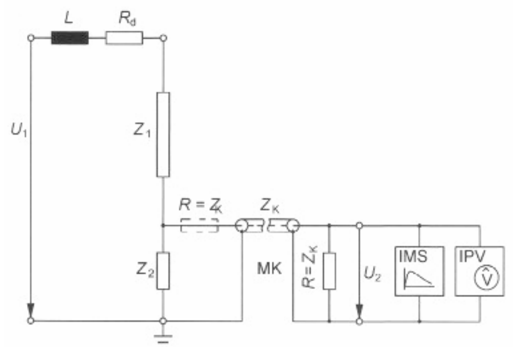
فراجهش پیشانی ، ناشی از کاهش R_s را می توان با افزودن C_l جبران کرد . در صورت عدم دستیابی به هدف (رسیدن به زمان پشت ۲۰ % ± ۵۰ µs = T_2) ، می توان یک مقاومت سری با سیم پیچ مورد آزمایش وصل کرد ، شکل ۱۰- ۱۲ را ببینید . باید توجه کرد که با این اتصال ، عایق بندی اصلی تست می شود ، اما تنش وارده به عایق بندی طول سیم پیچی حداقل است .

روش دیگر برای افزایش اندوکتانس کل ، اتصال یک اندوکتانس موازی با مقاومت R_s است ، شکل ۱۰- ۱۲ را ببینید .



C_g = طرفیت خازنی ژنراتور ضربه
SFS = جفت گوی وصل
R_s = مقاومت میرا ساز
L_t = اندوکتانس ترانسفورماتور

شکل ۱۰-۲۰ : مدار معادل ضربه ، سیم پیچ با اندوکتانس پائین L_t < ۲۰ mH



Z_1 = امپدانس اولیهٔ مقسم ولتاژ
Z_2 = امپدانس ثانویهٔ مقسم ولتاژ
L = اندوکتانس پراکندگی هادی
R_d = مقاومت میراساز
R = ترمینال مقاومتی
MK = کابل اندازه گیری کواکسیال
Z_K = امپدانس موجی کابل اندازه گیری
IMS = سیستم اندازه گیری ضربه
IPV = پیک ولتمتر ضربه

شکل ۱۰-۲۱ : تجهیزات اندازه گیری ولتاژ ضربه

ضمیمة ۱۰- ۴ پارامترهای مدار تست ضربة کلیدزنی

شکل موج تست ضربة کلیدزنی در شکل ۱۰- ۴ نشان داده شده است .

برای زمان پیشانی رابطة زیر برقرار است :

$$T_1 \approx k \cdot R_s \cdot C \quad 5 \le k \le 10$$

ملاحظاتی برای زمان پشت موج :

برخلاف تست ضربة صاعقه ، معمولاً سیم پیچ هایی که تست نمی شوند باز مـی ماننـد . بنابراین هسته مغناطیس می گردد . بدلیل اینکه هسته بـا ولتـاژ ضـربة کـاهش یافتـه در جهت مخالف مغناطیس شده است (با پلاریتة مخالف) ، پشت موج را می تـوان در مقـدار معین تنظیم کرد . معمولاً از مقاومـت هـای پراکنـدة R_p اسـتفاده نمـی شـود ، زیـــرا مقاومت های بزرگ شارژ ژنراتور ضربه R_1 (۱۰ تا ۲۵ kΩ برای هـر طبقـه) بـه عنـوان مقاومت تخلیه عمل می کند ، شکل ۱۰- ۱۳ را ببینید .

ضمیمة ۱۰- ۵ اندازه گیری ولتاژ ضربه با دامنه زیاد

ضمیمة ۱۰- ۵- ۱ کلیات

تجهیزات اندازه گیری ولتاژ ضربه بایستی بتواند دامنه و شکل موج اصلی ولتاژ ضربه را در ولتاژی بسیار پائین تر و با دقّت بالا بازسازی کند .

اجزاء اصلی سیستم اندازه گیری در شکل ۱۰- ۲۱ نشان داده شده است :

- اتصالات تغذیه
- مقسم ولتاژ
- کابل های اندازه گیری با ترمینال مقاومتی کواکسیال در انتهای خط
- سیستم اندازه گیری ضربه (اسیلوسکوپ) و پیک ولتمتر ضربه

در مرحلة اول ، موج ضربه تا سطحی تضعیف می شود که توسـط سیسـتم انـدازه گیـری ضربه و پیک ولتمتر ضربه قابل اندازه گیری باشد (در حد چند صـد ولـت) . بـرای ایـن منظور از یک مقسم ولتاژ استفاده می شود . این مقسم ، شامل یک بازوی امپدانس اولیـه Z_1 و یک بازوی امپدانس ثانویه Z_2 است که متشکل از مقاومت ، خازن و یـا هـر دو می باشد . نسبت مقسم را دو امپدانس Z_1 و Z_2 تعیین می کند .

ولتاژ $U_2(t)$ در دو سر امپدانس ثانویة Z_2 مقسم ولتاژ ، سیستم اندازه گیری ضـربه یـا ولتمتر ضربه را از طریق کابل کواکسیالی با تلفات پائین تغذیه مـی کنـد . یـک مقاومـت موازی در انتهای این کابل قرار می گیرد . پوستة محافظ کابل در طرف مقسم ولتاژ زمین شده است ، شکل ۱۰- ۲۱ را ببینید .

شکل موج ضربه مورد نیاز برای ارزیابی تست توسط سیستم اندازه گیــری ضـربه ضـبط می شود . این سیستم از یک اسیلوسکوپ و یا از یک سیستم ضـبط دیجیتـال تشـکیل می شود . دامنة ولتاژ تست اعمالی با استفاده از یک ولتمتر ضربه اندازه گیری می شود .

اتّصال فشارقوی بین ترانسفورماتور مورد آزمایش و مقسم ولتاژ بایستی در حد امکان کوتاه باشد چون اندوکتانس آن (در حدود ۱ μH برای هر متر) می تواند مشخصهٔ انتقالی تجهیزات تست را بویژه در فرکانس های بالا بشدت تحت تأثیر قرار دهد .

گاهی لازم است مقاومتی با اندوکتانس پائین R_d با اندازهٔ چند صد اهم بین ترانسفورماتور مورد آزمایش و مقسم ولتاژ قرار گیرد تا مدار نوسان ساز سری شامل اندوکتانس اتصال تغذیه و ظرفیت خازنی مقسم (امپدانس اولیهٔ مقسم ولتاژ) را میرا نماید .

ضمیمهٔ ۱۰- ۵- ۲ مقسم ولتاژ ضربه

ولتاژ خروجی مقسم باید در حد امکان بدون اعوجاج باشد . شکل موج خروجی بایستی مستقل از فرکانس ، دامنهٔ ولتاژ ، پلاریته ، تغییرات دما و سایر عوامل خارجی باشد . بسته به شکل موج ولتاژ ضربه - موج کامل ضربهٔ صاعقه ، موج ضربهٔ پشت بریده ، موج ضربهٔ پیشانی بریده یا موج ضربهٔ کلید زنی - مقسم های ولتاژ با طرح های مختلف بکار می رود .

کاربرد مقسم های زیر به همراه سایر طرح های ویژه در آزمایشگاه های فشارقوی متداول است :

- مقسم های مقاومتی
- مقسم های مقاومتی کنترل شده
- مقسم های خازنی (میرا شده یا میرا نشده)
- مقسم های ترکیبی خازنی- مقاومتی

مقسم ولتاژ مقاومتی

این مقسم از اتصال سری مقاومت فشار قوی R_1 با مقاومت فشار ضعیف R_2 تشکیل شده است ، شکل ۱۰- ۲۲ را ببینید .

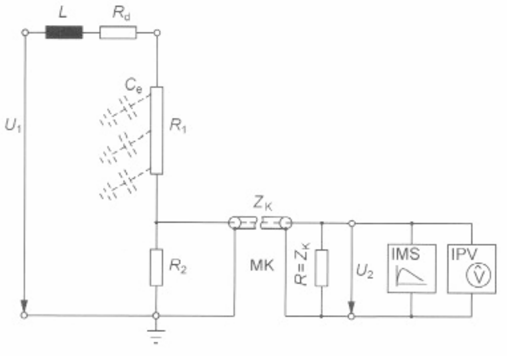
نسبت تقسیم عبارت است از :

$$r = \frac{R_d + R_1 + \left(\frac{R_2 \cdot R}{R_2 + R}\right)}{\left(\frac{R_2 \cdot R}{R_2 + R}\right)}$$

که در آن :

R_d = مقاومت میرا ساز

R = کابل اندازه گیری با مقاومت موازی برای مثال ، ۷۵ Ω در انتهای آن

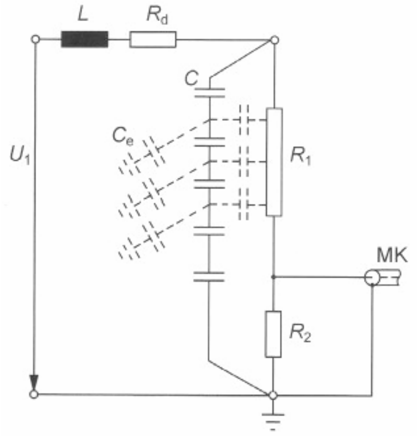


شکل ۱۰- ۲۲ : مقسم مقاومتی ولتاژ ضربه

C_e = ظرفیت خازنی پراکندگی

تعریف سایر نمادها :

به شکل ۱۰- ۲۱ مراجعه شود



L = اندوکتانس پراکندگی هادی

R_d = مقاومت میراساز

MK = کابل اندازه گیری کواکسیال

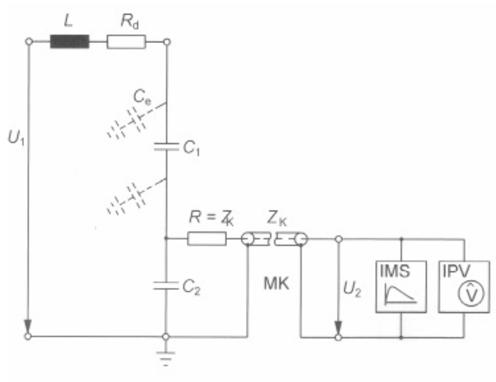
R_1 = مقاومت اولیهٔ مقسم ولتاژ

R_2 = مقاومت ثانویهٔ مقسم ولتاژ

C_e = خازن پراکندگی

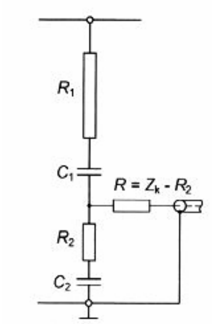
شکل ۱۰- ۲۳ : مقسم ولتاژ ضربه مقاومتی کنترل شده

C = خازن کنترل



C_1 = ظرفیت خازنی اولیهٔ مقسم ولتاژ
C_2 = ظرفیت خازنی ثانویهٔ مقسم ولتاژ
L = اندوکتانس پراکندگی هادی
R_d = مقاومت میرا ساز
R = ترمینال مقاومتی
MK = کابل اندازه گیری کواکسیال
Z_k = امپدانس موجی کابل اندازه گیری
IMS = سیستم اندازه گیری ضربه
IPV = پیک ولتمتر ضربه

شکل ۱۰- ۲۴ : مقسم ولتاژ ضربهٔ خازنی



R_1 = مقاومت اولیهٔ مقسم ولتاژ
R_2 = مقاومت ثانویهٔ مقسم ولتاژ
C_1 = ظرفیت خازنی اولیهٔ مقسم ولتاژ
C_2 = ظرفیت خازنی ثانویهٔ مقسم ولتاژ
L = امپدانس پراکندگی هادی
R_d = مقاومت میرا ساز
R = ترمینال مقاومتی

شکل ۱۰- ۲۵ : مقسم ولتاژ ضربهٔ خازنی – میرا شده

مقاومت فشار قوی R_1 توسط خازن های پراکندگی C_e تحت تأثیر قرار گرفته و برای ولتاژهای تیز ضربه ، توزیع ولتاژ غیر یکنواخت و غیر خطی وابسته به فرکانسی بر روی مقسم برقرار می شود . با کوچکتر شدن نسبت ظرفیت خازنی سری به ظرفیت خازنی پراکندگی C_e ، میزان اعوجاج بیشتر می گردد . مؤلفه های فرکانس بالای امواج ولتاژ میرا می شود . این باعث حذف تیزی های سیگنال اندازه گیری شده می گردد .

زمان اوج گیری (rise-time) و پاسخ نسبتاً بزرگ است . از این مقسم نمی توان برای پردازش فرکانس های بسیار بالا (همچون شکل موج پیشانی بریده) استفاده کرد .

وابستگی به فرکانس و بنابراین زمان پاسخ را می توان با کاهش مقدار مقاومت فشار قوی R_1 تا چند کیلو اهم به اندازهٔ زیادی بهبود داد . بدلیل مصرف بالای انرژی و تأثیر آن بر مقدار نصف پشت موج ، این روش تنها برای اندازه گیری موج ضربهٔ پیشانی- بریده کاربرد دارد .

مقسم مقاومتی کنترل شده

توزیع نیمه- خطی ولتاژ ضربه در طول مقسم مقاومتی توسط کنترل خازنی انجام می شود و این مقسم بدلیل زمان کوتاه پاسخ برای تمام انواع تست های ولتاژ ضربه قابل استفاده است ، شکل ۱۰- ۲۳ را ببینید .

مقسم خازنی ولتاژ ضربه

این مقسم ولتاژ با اتصال خازن فشارقوی C_1 بطور سری با خازن فشار ضعیف C_2 شکل می گیرد ، شکل ۱۰- ۲۴ را ببینید .

این تجهیزات اندازه گیری در اصل یک مقسم ولتاژ ضربهٔ خازنی خالص (شکل ۱۰-۲۴) یا مقسم ولتاژ ضربهٔ خازنی میرا شده (شکل ۱۰- ۲۵) می باشد . مقسمی که دارای مقاومت است روی شکل موج اثر گذاشته و یا ممکن است از نظر حرارتی دچار اضافه بار گردد .

نسبت تبدیل مقسم تابع فرکانس بوده و عبارت است از :

$$r = \frac{C_2 + C_1}{C_1}$$

در برخی موارد بسته به محل مقسم در سالن آزمایشگاه ، خازن های پراکندگی موجب تغییر در نسبت تبدیل مقسم می شود .

مقسم خازنی ولتاژ ضربه نباید برای پردازش فرکانس های بسیار بالا بکار گرفته شود (شکل موج پیشانی بریده) ، اندوکتانس کابل تغذیه و ظرفیت خازنی مقسم ، یک مدار نوسان تشکیل می دهند که لازم است توسط مقاومت R_d میرا شود و این موجب افزایش زمان پاسخ می شود . بعلاوه ، خازن های فشار قوی توسط اندوکتانس داخلی تحت تأثیر قرار می گیرد که بدلیل میرایی پایین موجب پدیدهٔ موج سیار می شود . این معایب را می توان با توزیع یکسان مقاومت های میرا ساز در طول مقسم ولتاژ به مقدار زیادی از بین برد ، شکل ۱۰- ۲۵ را ببینید . در فرکانس های بالا مقاومت اهمی مؤثر است و در فرکانس های پایین مؤلفهٔ خازنی به عنوان مقاومت بالا عمل می کند . زمان پاسخ نسبتاً کوتاه است . بنابراین این مقسم برای پردازش سریع و کند ، هر دو مناسب است .

مقسم ولتاژ ترکیبی خازنی- مقاومتی

معایب فوق الذکر برای مقسم های مقاومتی خالص موجب پی ریزی مقسم ولتاژ خازنی- مقاومتی گردید ، شکل ۱۰- ۲۶ را ببینید . در صورت جبران سازی مناسب ، نسبت این مقسم با نسبت مقسم مقاومتی یکسان خواهد بود . با اتّصال موازی خازن ها و مقاومت ها مقسمی نیمه خطی و وابسته به فرکانس ساخته می شود ؛ چنین مقسمی زمان پاسخ کوتاهی دارد . در حالت پردازش سریع ، مقسم به عنوان خازن عمل می کند . این مقسم برای تمام انواع تست ضربه مناسب است .

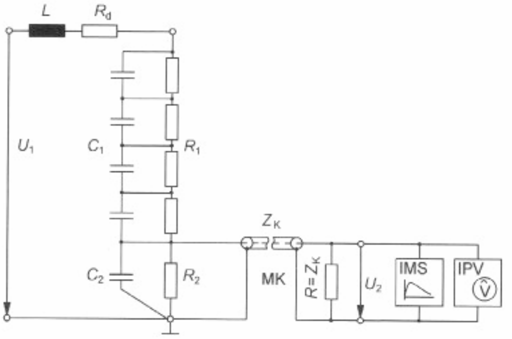
کابل های اندازه گیری کواکسیال

کابل اندازه گیری کواکسیال MK (کابل فرکانس بالا) که سیگنال اندازه گیری نشده را منتقل می کند ، مستقیماً به سیستم اندازه گیری ضربه و یا پیک ولتمتر ضربه (هر دو با مقاومت ورودی بالا) وصل می شود . در صورت عدم پیش بینی تمهیداتی در انتهای کابل اندازه گیری ، دامنهٔ موج ضربهٔ ورودی (سیگنال اندازه گیری) دو برابر می شود . یک ترمینال مقاومتی در صورتی که مقاومت آن R برابر امپدانس موجی کابل Z_k گردد (برای مثال Ω ۷۵) از دو برابر شدن دامنه جلوگیری می کند . امپدانس موجی هر کابل ایده آل عبارت است از :

$$Z_k = \sqrt{\frac{L_k}{C_k}}$$

برای مقسم های ترکیبی و مقاومتی ولتاژ ضربه مقاومتی در انتهای کابل سیستم اندازه گیری نصب شده است ، شکل های ۱۰- ۲۱ ، ۱۰- ۲۲ و ۱۰- ۲۶ را ببینید . برای مقسم خازنی ولتاژ ضربه نصب این مقاومت ممکن نیست ، زیرا در این صورت خازن ثانویهٔ C_2 با ثابت زمانی زیر تخلیه می شود :

$$\tau = C_2 \cdot R$$



C_1 = ظرفیت خازنی اولیهٔ مقسم ولتاژ
C_2 = ظرفیت خازنی ثانویهٔ مقسم ولتاژ
R_1 = مقاومت اولیهٔ مقسم ولتاژ
R_2 = مقاومت ثانویهٔ مقسم ولتاژ
L = اندوکتانس پراکندگی هادی
R_d = مقاومت میرا ساز
R = ترمینال مقاومتی
MK = کابل اندازه گیری کواکسیال
Z_k = امپدانس موجی کابل اندازه گیری
IMS = سیستم اندازه گیری ضربه
IPV = پیک ولتمتر ضربه

شکل ۱۰- ۲۶ : مقسم ولتاژ ضربهٔ ترکیبی خازنی- اهمی

مقاومت به ابتدای کابل اندازه گیری (طرف مقسم) در مسیر کابل اندازه گـــیری وصـل می شود ، شکل ۱۰- ۲۴ را ببینید . موج ضربهٔ دریافتی (سیگنال انـدازه گیـری) در ابتـدا توسط R و Z_k به نصف تقسیم می شود

$$r = \frac{R + Z_k}{Z_k} = \frac{75 + 75}{75} = 2$$

با وجود انعکاس ، مقدار آن در انتهای کابل به دامنهٔ اصلی بـر مـی گـردد . بـرای مقسم خازنی میرا شده ، نحوهٔ اتّصال مقاومت همان است ولی مقدار مقاومت عبارت است از :

$$R = Z_k - R_2$$

پاسخ زمانی مجموعهٔ سیستم اندازه گیری ولتاژ تعیین کنندهٔ هر خطـای اضـافی ناشـی از کابل می باشد .

ضمیمهٔ ۱۰- ۵- ۳ سیستم اندازه گیری ضربه و پیک ولتمتر ضربه

برای ارزیابی تست ولتاژ ضربهٔ ترانسفورماتور های قدرت استفاده از یک سیستم آنالوگ یـا دیجیتال اندازه گیری ضربه با حداقل دو کانال با قابلیت ضبط بسیار دقیـق امـواج ولتـاژ و جریان ضروری است .

مشخّصات سیستم آنالوگ اندازه گیری ضربه

دامنهٔ ولتاژ تست اعمالی با استفاده از پیک ولتمتر ضربه اندازه گیری می شود .

- اسیلوسکوپ اشعهٔ کاتدیک : دو کاناله با سرعت چاپ تقریباً ۷۰۰۰ km/s
- انحراف عمودی : ضریب انحراف ۱۴۰ تا ۹۰۰ V/cm
- انحراف افقی : خطی یا لگاریتمی
  انحراف با پله های ۱ تا ۵۰۰۰ μs
  فاصلهٔ نشانگر زمانی ۰/۱ تا ۵۰۰ μs
- تریگر : داخلی یا خارجی با استفاده از تریگاترون یا آنتن
- انحراف عمودی : پله های مقسم تضعیف ۱ تا ۶/۴
- ورودی ها : ماکزیمم ولتاژ پیک تقریباً ۱۵۰۰ V_p
- حفاظ : اسیلوسکوپ ضربه معمولاً در معرض میدان مغناطیسی قوی قـرار دارد ، ایـن دستگاه بویژه بایستی در مقابل شارهای پراکندگی داخلـی یـا خـارجی فرکـانس بـالا حفاظت شود .

مشخّصات سیستم دیجیتال اندازه گیری ضربه ، شامل پیک ولتمتر ضربه

بخش آنالوگ :

- تعداد کانال ورودی : تا ۴
- امپدانس ورودی : ۲ MΩ ، ۵۰ pF
- مقسم ورودی : ۱:۲۰۰
- ولتاژ ورودی : ۱۰۰ تا ۱۹۵۰ V پیک تا پیک
- پهنای باند : ۵۰ MHz

بخش دیجیتال :

- مبدل AD : ۱۲ بیت ، تا ۱۲۰ MS/s ، تا ۱۲۸ k (۱۲ بیت) حافظهٔ محل داده
- پردازش داده : PC

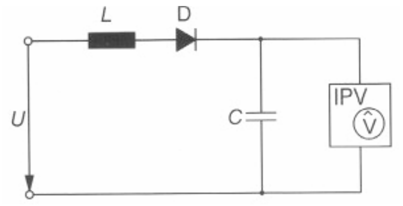
ضمیمهٔ ۱۰- ۵- ۴ پیک ولتمتر آنالوگ ضربه

پیک ولتمتر آنالوگ ضربه مقدار پیک ولتاژ ضربه را اندازه گیری می کند . اساس کار آن بر شارژ خازن اندازه گیری از طریق یک دیود با مقاومت بلوکه کنندهٔ بالا و اندازه گیری ولتاژ دو سر خازن با استفاده از ولتمتری با مقاومت ورودی بالا استوار است ، شکل ۱۰- ۲۷ را ببینید . عدم قطعیت ولتاژ ضربهٔ اندازه گیری شده (ضربهٔ صاعقه و ضربهٔ بریده) ۱% است .

ضمیمهٔ ۱۰- ۵- ۵ مشخّصهٔ انتقال تجهیزات اندازه گیری ولتاژ ضربه

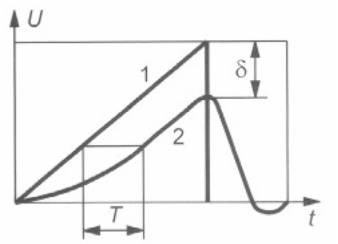
مشخّصهٔ انتقال کلّ تجهیزات اندازه گیری ولتاژ ضربه بایستی در فواصل زمانی منظّم به منظور تضمین کیفیت و اطمینان از اندازه گیری قابل اعتماد ولتاژ های ضربه ، کنترل و کالیبره گردد ، شکل ۱۰- ۲۱ را ببینید . روش تجربی تعیین خطای انتقال کاملاً در IEC 60060 [21] و [22] تشریح شده است . توضیح زیر اشاره ای به این روش دارد .

شکل های ۱۰- ۲۸ و ۱۰- ۲۹ مثال هایی از خطا های انتقال هستند . خطای انتقال توسط پاسخ زمانی تجهیزات اندازه گیری ولتاژ ضربه تعریف می شود . این خطا موجب تحلیل زمانی نادرستِ نتایج انواع ضربهٔ ضبط شده توسط اسیلوسکوپ می شود (شکل ۱۰- ۲۹) . همچنین ممکن است تعیین غلط دامنه یا اشتباه در اندازه گیری های مربوط به موج پیشانی بریده از آن ناشی شود (شکل ۱۰- ۲۸) . حداکثر پاسخ زمانی T برای امواج ضربهٔ صاعقه و امواج ضربهٔ پیشانی بریده یا پشت موج در IEC [21] معین شده است .



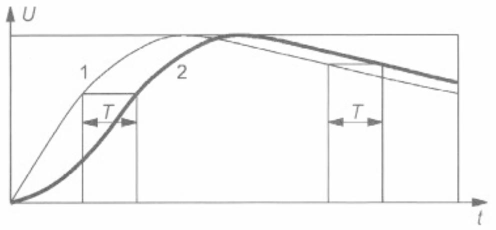
D = دیود
IPV = پیک ولتمتر ضربه
L = اندوکتانس

شکل ۱۰- ۲۷ : مدار معادل ولتمتر ضربه



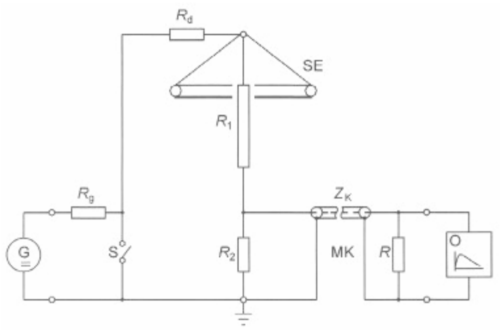
T = زمان پاسخ
1 = ولتاژ ضربه
2 = سیگنال اندازه گیری
δ = خطای دامنه

شکل ۱۰- ۲۸ : نمونهٔ خطای انتقال سیستم اندازه گیری ضربه ؛ موج بریده



T = زمان پاسخ
1 = ولتاژ ضربه
2 = سیگنال اندازه گیری

شکل ۱۰- ۲۹ : نمونهٔ خطای انتقال یک سیستم اندازه گیری ضربه



G = منبع DC
S = کلید جیوه ای
SE = الکترود کنترل
O = اسیلوسکوپ

شکل ۱۰- ۳۰ : اندازه گیری زمان پاسخ

اندازه گیری پاسخ زمانی ، معمولاً باروش ولتاژ پله انجام می شود و ضروری است که کالیبراسیون تجهیزات اندازه گیری با همان ترکیبی انجام شود که بعداً برای تست ترانسفورماتور بکار برده می شود (یعنی اتّصالات تغذیه ، مقسم ولتاژ و کابل های اندازه گیری نبایستی تغییر کند) . شکل ۱۰- ۳۰ مدار اندازه گیری را نشان می دهد . ولتاژ پله ای (با تیزی افزایش ولتاژ پلهٔ در حدود ۱ ns) با ولتاژی در حدود چند صد ولت به بخش فشار قوی مقسم اعمال می شود و پاسخ در طرف فشار ضعیف با استفاده از یک اسیلوسکوپ ، اندازه گیری می شود ، شکل ۱۰- ۳۱ را ببینید .

ثابت زمانی τ بر حسب زمان پاسخ T تعریف می شود . شکل های ۱۰- ۲۸ و ۱۰- ۲۹ تأثیر زمان پاسخ را بر محور زمانی موج نشان می دهند . ولتاژ پله ای به کمک یک ژنراتور ضربه با وصل سریع ولتاژ DC به کمک رله ای بسیار سریع تولید می شود . ولتاژ ثانویه در خروجی مقسم ، بسیار کوچک است و این به معنی نیاز به وجود تقویت کننده ای ، با کیفیت بالاست . اسیلوسکوپ ضربه برای این منظور مناسب نیست .

برای حذف تأثیر اتّصال عمودی تغذیه در ترکیب تست شکل ۱۰- ۳۰ ، لازم است اصلاح زیر انجام شود :

$$T = T_m + \tau_V \cdot \left(1 - \frac{Z}{R}\right)$$

$$\tau_V = \frac{h}{c}$$

که در آن :

τ_V = زمان سیر موج در طول اتّصال عمودی تغذیه

h = طول اتّصال تغذیه با واحد m

c = سرعت نور ۳۰۰ m / µs

R = مقاومت بین سر و ته مقسم (بی نهایت برای مقسم های خازنی)

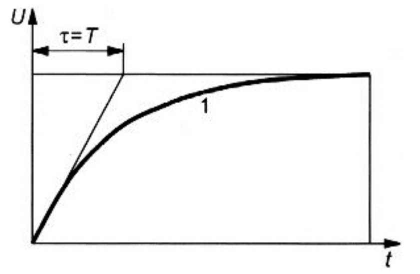
Z = امپدانس اتّصال عمودی تغذیه

داریم :

$$Z \approx 60.\ln\left(\frac{4 \cdot h}{d}\right)$$

که در آن :

d = قطر هادی تغذیه بر حسب m



τ = زمان پاسخ
1 = پاسخ مقسم

شکل ۱۰- ۳۱ : اسیلوگرام نمونهٔ زمان پاسخ

ضمیمهٔ ۱۰- ۶ کالیبراسیون نسبت مقسم ولتاژ ضربه

کالیبراسیون دوره ای شرط لازم برای تست ضربهٔ بدون اشکال می باشد .

از روش های مختلفی استفاده می شود :

- محاسبهٔ نسبت مقسم بر اساس اندازه گیری مؤلفه های امپدانسی مقسم
- اندازه گیری همزمان ولتاژ در دو طرف فشار قوی و ضعیف مقسم
- کنترل مقسم با استفاده از یک مقسم کالیبره شده

برای مقسم های مقاومتی ، اندازه گیری ممکن است به صورت AC یا DC باشد . برای اندازه گیری مقسم های خازنی از ولتاژ AC استفاده می شود و نسبت مقسم در چندین فرکانس کنترل می شود (برای مثال HZ ۵۰ و kHz ۱) . برای مقسم های خازنی یا ترکیبی لازم است نسبت مقسم با همان شکل مداری تست شود که هنگام تست ترانسفورماتور خواهد بود زیرا خازن های پراکندگی ممکن است تأثیر زیادی بر نسبت تبدیل داشته باشند .

ضمیمهٔ ۱۰- ۷ استفاده از جفت گوی برای کنترل ضریب مقیاس پیک ولتمتر ضربه

استفاده از جفت گوی برای کنترل ضریب مقیاس (scale factor) بویژه بدلیل عدم قطعیت آن معایب فراوانی دارد ، ولی هنوز هم گاهگاه مورد استفاده قرار می گیرد ، شکل ۱۰- ۳۲ را ببینید .

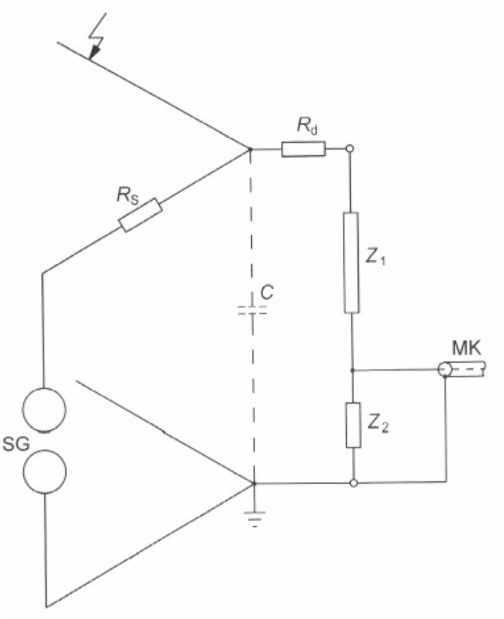
عدم قطعیت آن در حدود ۳ % ± است (توجه : بهر حال ۳% برای کلّ تجهیزات اندازه گیری ولتاژ ضربه مجاز است) . کالیبراسیون با اندازه گیری مستقیم ولتاژ بالا با استفاده از جفت گوی (SG) و ضبط همزمان (آنالوگ یا دیجیتال) توسط پیک ولتمتر ضربه انجام می شود .

میزان تلاش لازم برای تدارک گوی های فشار قوی و زمان مورد مصرف برای کالیبراسیون ، قابل توجه است و بدین دلیل است که روش مقایسه با سیستم های اندازه گیری ضربهٔ کالیبره شده بر این روش اولویت دارد . به هر حال در برخی موارد خاص از جفت گوی استفاده می شود .

پس نسبت تبدیل مقسم عبارت است از :

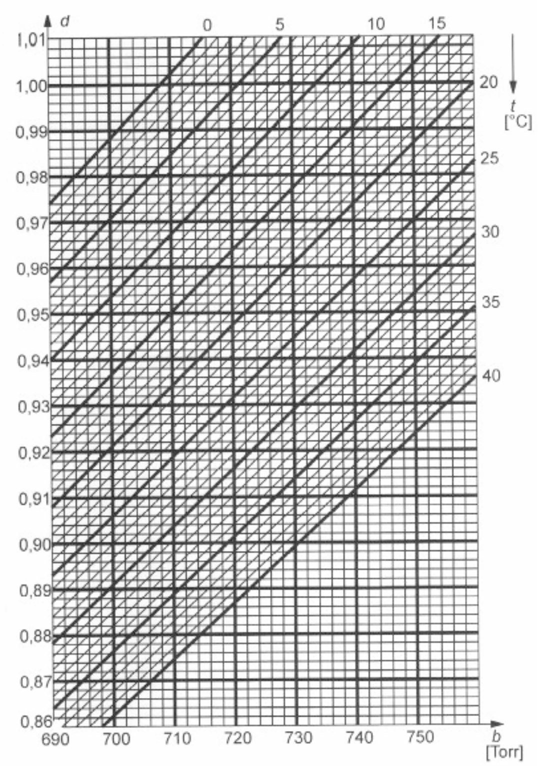
$$r = \frac{U_1}{U_2}$$

اندازه گیری ولتاژ های بالا با استفاده از جفت گوی بطور کامل در IEC 60052 [35] تشریح شده است . اندازه گیری ها بر اساس جداول کالیبراسیون استوار است که (مقادیر پیک) ولتاژ های با ۵۰ % احتمال شکست برای فواصل و قطر معین گوی ها را ارائه می کند . جداول کالیبراسیون بر اساس چگالی نسبی هوا b = ۷۶۰ torr و t = ۲۰ °C (k =۱) تهیه شده اند . برای سایر شرایط جوی لازم است تصحیح انجام گیرد :



SG = جفت گوی
Rs = مقاومت میرا ساز برای جفت گوی (500W <)
C = ظرفیت خازنی بار

شکل ۱۰- ۳۲ : کالیبراسیون سیستم اندازه گیری ضربه با استفاده از جفت گوی



d = ضریب تصحیح
b = فشار هوا بر حسب (mmHg)
۷۶۰ Torr = ۱۰۱۳ mbar
t = دمای محیط

شکل ۱۰- ۳۴ : نمودار تعیین ضریب تصحیح d

$$U = k \cdot U_T$$

که در آن :

$$d = \frac{b}{760} \cdot \frac{273+20}{273+t}$$

U = ولتاژ واقعی شکست ۵۰%

فاصلهٔ-SG [mm]	قطر [mm] – جفت گوی (SG) ۲۵۰		۵۰۰		۷۵۰		۱۰۰۰		۱۵۰۰		۲۰۰۰	
	Δ	∇	Δ	∇	Δ	∇	Δ	∇	Δ	∇	Δ	∇
۱۵	۴۵/۵	۴۵/۵										
۲۰	۵۹/۰	۵۹/۰										
۳۵	۹۹/۰	۹۹/۰	۹۹/۰	۹۹/۰	۹۹/۰	۹۹/۰						
۵۵	۱۴۹	۱۵۱	۱۵۱	۱۵۱	۱۵۱	۱۵۱	۱۵۱	۱۵۱				
۸۰	۲۰۶	۲۱۱	۲۱۴	۲۱۴	۲۱۵	۲۱۵	۲۱۵	۲۱۵	۲۱۵	۲۱۵		
۱۲۰			۳۰۹	۳۱۱	۳۱۵	۳۱۵	۳۱۸	۳۱۸	۳۱۸	۳۱۸	۳۱۸	۳۱۸
۱۶۰			۳۹۲	۴۰۲	۴۱۰	۴۱۱	۴۱۴	۴۱۴	۴۱۴	۴۱۴	۴۱۴	۴۱۴
۲۰۰			۴۶۰	۴۸۰	۴۹۲	۵۰۵	۵۱۰	۵۱۰	۵۱۰	۵۱۰	۵۱۰	۵۱۰
۲۸۰					۶۳۵	۶۶۰	۶۷۵	۶۸۵	۷۰۰	۷۰۰	۷۰۵	۷۰۵
۳۲۰					۶۹۵	۷۲۵	۷۴۵	۷۶۰	۷۹۰	۷۹۰	۷۹۵	۷۹۵
۴۰۰							۸۷۵	۹۰۰	۹۵۵	۹۶۵	۹۷۵	۹۸۰
۶۰۰									۱۲۸۰	۱۳۱۰	۱۳۴۰	۱۳۸۰
۸۰۰											۱۶۰۰	۱۶۹۰

شکل ۱۰- ۳۳ : مقدار پیک ولتاژ شکست با احتمال ۵۰ % نسبت به قطر و فاصلهٔ گوی ها (IEC 60052)

Δ = مقدار پیک ولتاژ AC ، پلاریتهٔ منفی ضربهٔ صاعقه و ضربهٔ سوئیچینگ ، پلاریتهٔ مثبت و منفی ولتاژ DC

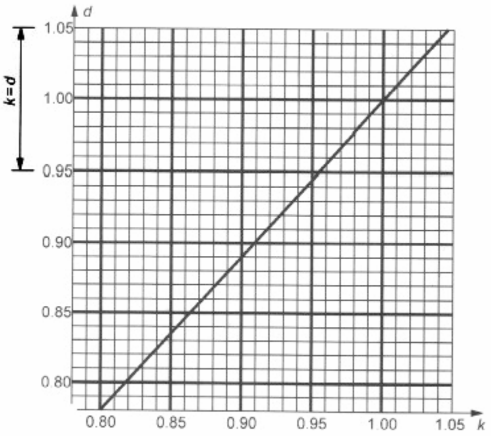
∇ = پلاریتهٔ مثبت ضربهٔ صاعقه و ضربهٔ سوئیچینگ

شکل ۱۰- ۳۳ گزیده ای از جدول کالیبراسیون IEC 60052 [35] را نشـان می دهد . ضریب تصحیح کلّ k با استفاده از شکل های ۱۰- ۳۴ و ۱۰- ۳۵ تعیین می شود .

برای اندازه گیری توسط جفت گـوی (میـدان شـبه همگـن)اثـر رطوبـت نادیـده گرفتـه می شود . جفت گوی وسیله ای برای اندازه گیری مقدار پیک است . بایستی کنتـرل کـرد که شکست الکتریکی در مقدار پیک روی می دهد (با اسـتفاده از اسیلوسـکوپ) . بـدین دلیل است که بایستی نوسانات فرکانس بالا نزدیک مقدار پیک حذف گردد .

اصولاً کالیبراسیون با یا بدون ترانسفورماتور مورد آزمایش C انجـام مـی گیـرد ، شـکل ۱۰- ۳۲ را ببینید :

کالیبراسیون با ترانسفورماتور مورد آزمایش این مزیت را دارد که اتّصالات مدار ضربه برای تست اصلی بدون تغییر می ماند ، بجز جفت گوی که بایستی حذف شود . عیب ایـن کـار در ایجاد نوسانات فرکانس بالا در اثر وجود ترانسفورماتور در مدار تسـت و افـزایش عـدم قطعیت اندازه گیری است . همچنین چون امکان کالیبراسیون تنها با ولتـاژ کـاهش یافتـه (۵۰ % تا ۷۰ % ولتاژ تست) وجود دارد ، هر رفتار غیر خطی که ممکن است در تجهیزات اندازه گیری موجود باشد آشکار نمی شود .



d = ضریب تصحیح ، شکل ۱۰- ۳۴

k = ضریب تصحیح کل

شکل ۱۰- ۳۵ : نمودار تعیین ضریب تصحیح کل k

کالیبراسیون بدون ترانسفورماتور مورد آزمایش تا ولتاژ تست نیز امکان پذیر است . با انتخاب مناسب پارامترهای مدار تست ضربه امکان تنظیم بهتر شکل موج طبق مشخّصات مورد نیاز وجود دارد . البته برای این کار زمان بیشتری لازم است . می توان از عدم وجود فواصل عایقی ناکافی در ترکیب کامل مدار تست (بدون ترانسفورماتور مورد آزمایش) در طی کالیبراسیون اطمینان حاصل کرد .

فرآیند واقعی با مثال زیر تشریح می شود :

ولتاژ تست : ۱۰۵۰ kV_p

کالیبراسیون بدون مورد آزمایش و با پلاریتهٔ منفی؛

قطر گوی : ۲۰۰۰ mm

نزدیکترین مقدار از جدول : ۹۷۵ kV برای جفت گوی

۴۰۰ mm (از شکل ۱۰- ۳۳)

شرایط جوی :

b = ۷۴۰ Torr

T = ۲۵ °C

d = ۰/۹۵۷ از شکل ۱۰- ۳۴

k = ۰/۹۶۱ از شکل ۱۰- ۳۵

U = ۰/۹۶۱ * ۹۷۵ = ۹۳۷ kV_p

ابتدا ولتاژ پله به پله افزوده می شود تا شکست الکتریکی روی دهد . پس از وقوع ۳ تا ۵ شکست (و سوزاندن گرد و خاک روی گوی ها) ، ولتاژ پله به پله کاهش داده می شود تا دیگر شکستی روی ندهد . ولتاژ با احتمال شکست ۵۰ % با اعمال ضربه های بعدی با ولتاژهای متناوباً بالاتر و پائین تر تعیین می شود . اگر در این ولتاژ معین قرائت پیک ولتاژ ضربه برای مثال ۹۲۵ kVp باشد ، نسبت تبدیل مقسم

$$r = \frac{937}{925} = 1.013$$

بدست می آید . بدین ترتیب نمایش ولتمتر برای ولتاژ تست ۱۰۵۰ kV عبارت خواهد بود از :

$$\alpha = \frac{1050}{1.013} = 1037\ kV_p$$

قبل از آغاز کالیبراسیون ، بایستی تجهیزات اندازه گیری به پایداری حرارتی خود رسیده باشند و کالیبراسیون داخلی دستگاههای اندازه گیری انجام شده باشد . اگر تجهیزات اندازه گیری وابسته به پلاریته نیستند ، کالیبراسیون با یک پلاریته کافیست . اگر تجهیزات اندازه گیری وابسته به فرکانس نباشند ، کالیبراسیون برای ضربهٔ صاعقه برای موج ضربهٔ کلید زنی و نیز برای موج پیشانی یا پشت بریده نیز معتبر است .

ضمیمهٔ ۱۰- ۸ اندازه گیری جریان ضربه

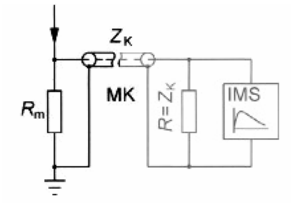
در طی تست ولتاژ ضربهٔ ترانسفورماتورهای قدرت علاوه بر پاسخ ولتاژ ، پاسخ جریان نیز توسط یک اسیلوسکوپ ضبط می شود . این عمل برای آشکارسازی و یا مکان یابی عدم انطباق ها انجام می شود . پرکاربردترین روش اندازه گیری افت ولتاژ دو سر مقاومت R_m (شانت) است که در مدار تست در جای مربوطه قرار گرفته است .

سیگنال اندازه گیری شده با استفاده از کابل اندازه گیری کواکسیال به سیستم اندازه گیری ضربه وصل می شود (مشابه روش اندازه گیری ولتاژ) ، شکل ۱۰- ۳۶ را ببینید .

اندازه گیری درست پاسخ جریان نیاز به تجهیزات اندازه گیری تقریباً غیر وابسته به فرکانس با ثابت زمانی کوتاه دارد . شانت اندازه گیری نبایستی به دامنهٔ ولتاژ و جریان وابسته باشد و بایستی دارای ظرفیت حرارتی بالا ، اندوکتانس پایین و ظرفیت خازنی کوچک باشد . به هنگام انتخاب شانت اندازه گیری بایستی محاسبات لازم به عمل آید تا از شکست الکتریکی در کابل اندازه گیری یا سایر نقاط مدار اندازه گیری جلوگیری شود . از یک جفت گوی برای حفاظت در مقابل اضافه ولتاژها استفاده می شود . مغز مقاومت شانت بایستی دارای حفاظ باشد تا میدان های الکترومغناطیسی بر آن بی تأثیر گردد (پوشش فلزی) . برای تست ترانسفورماتورهای قدرت از شانت هایی در محدودهٔ ۰/۱ تا ۲۰ Ω استفاده می شود . شکل های ۱۰- ۳۷ تا ۱۰- ۳۹ انواع روش های اندازه گیری جریان ضربه را نشان می دهند :

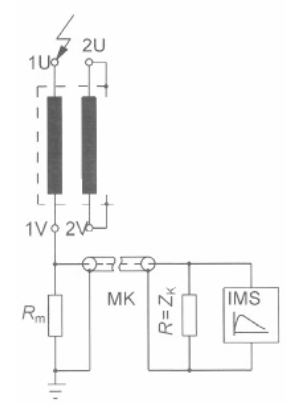
- اندازه گیری جریان عبوری از سیم پیچ مورد آزمایش - جریان سیم پیچ یا جریان نوترال (شکل ۱۰- ۳۷) .
- اندازه گیری جریان خازنی القایی در سیم پیچ اتّصال کوتاه شده که مورد آزمایش نیست (شکل ۱۰- ۳۸) .
- اندازه گیری جریانی که از مخزن به زمین جاری می شود - جریان مخزن (شکل ۱۰- ۳۹) . برای این اندازه گیری بایستی اتّصال مخزن از زمین جدا گردد .

برای عیب یابی و پیدا کردن مکان عیب می توان همزمان از چند روش فوق استفاده کرد .



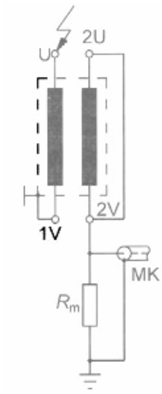
R_m = مقاومت اندازه گیری (شنت)
IMS = سیستم اندازه گیری ضربه
Z_k = امپدانس موجی کابل اندازه گیری
R = ترمینال مقاومتی
MK = کابل اندازه گیری کواکسیال

شکل ۱۰- ۳۶ : تجهیزات اندازه گیری جریان ضربه



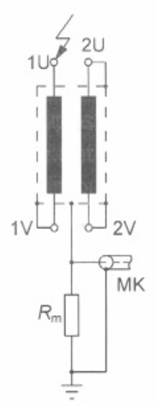
R_m = مقاومت اندازه گیری (شنت)
IMS = سیستم اندازه گیری ضربه
Z_k = امپدانس موجی کابل اندازه گیری
R = ترمینال مقاومتی
MK = کابل اندازه گیری کواکسیال

شکل ۱۰- ۳۷ : اندازه گیری جریان ضربهٔ سیم پیچ



R_m = مقاومت اندازه گیری (شنت)
IMS = سیستم اندازه گیری ضربه
Z_k = امپدانس موجی کابل اندازه گیری
R = ترمینال مقاومتی
MK = کابل اندازه گیری کواکسیال

شکل ۱۰- ۳۸ : اندازه گیری جریان ضربهٔ منتقل شده خازنی



R_m = مقاومت اندازه گیری (شنت)
IMS = سیستم اندازه گیری ضربه
Z_k = امپدانس موجی کابل اندازه گیری
R = ترمینال مقاومتی
MK = کابل اندازه گیری کواکسیال

شکل ۱۰- ۳۹ : اندازه گیری جریان ضربه از مخزن

ضمیمهٔ ۱۰- ۹ زمین کردن مدار ضربه

جریان های ضربه در مدار اصلی دامنه ای زیاد و لبه هایی تیز دارنـد . هـادی هـایی کـه عناصر مدار ضربه را به هم متّصل می کنند ، اندوکتانسی در حدود ۱ µH بـرای هـر متـر دارند . این هادی ها امپدانس بالایی را در طی ضربه های فرکانس بالا در مـدار ایـــجاد می کنند که موجب اختلاف پتانسیل و یا افت ولتاژهای بالایی در مدار ضربه مـی شـود . مثال زیر برای تشریح این پدیده بکار می رود .

یک سیم زمین با طول ۳ m دارای اندوکتانس تقریبی ۳ µH می باشد . اگـر جریـانی بـا مقدار پیک ۴۰۰۰ A و شیب افزایش ۴۰۰۰ A /µS از این انـدوکتانس عبـور کنـد افـت ولتاژ تقریبی عبارت خواهد بود از :

$$\Delta U = -L \cdot \frac{di}{dt} = 3 \cdot 10^{-6} \cdot 4000 \cdot 10^{6} = 12\text{kV}$$ (مقدار پیک)

این وضعیت بویژه برای ضربه های پیشانی و یا پشـت بریـده نـامطلوب اسـت . اخـتلاف پتانسیل بالا برای زمین موجب خرابی اسیلوسکوپ ، عدم قطعیت اندازه گیری ، خرابـی در شبکهٔ توزیع فشار ضعیف و نیز تهدید ایمنی پرسنل اپراتور دستگاهها مـی شـود . در کـل هنگام طراحی سیستم زمین آزمایشگاههای تست ضربه بایستی اصول زیر رعایـت گـردد (شکل ۱۰- ۴۰) :

- استفاده از اتّصالات با اندوکتانس پایین
- بالا بردن خازن C_e در حد امکان برای پایین آوردن ولتاژ U_e

$$U_e = \frac{C_s}{C_s + C_e} \cdot U$$

که در آن :

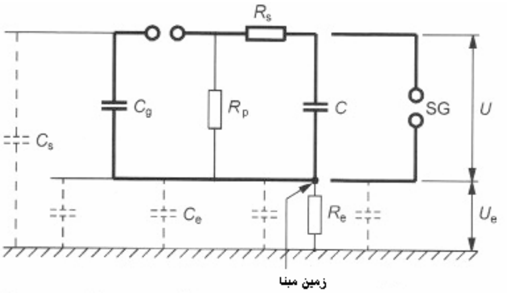
C_s = ظرفیت های خازنی پراکندگی

C_e = ظرفیت خازنی سیستم زمین ضربه نسبت به زمین واقعی

- پایین آوردن مقاومت زمین R_e

این الزامات کم و بیش با استفاده از خواباندن شـبکهٔ فلـزی در کـف آزمایشـــــگاه و یـا شبیه سازی آن با چندین ترمینال زمین بدست می آید . شبکهٔ فلزی دارای چـندین نقطـهٔ اتّصال است که در کف آزمایشگاه توزیع شده است و هر یک از تجهیزات ضربه با استفاده از نوارهای مسی پهن در حد امکان کوتاه به این نقاط وصل می شوند .

مناسب ترین نحوهٔ اتّصال به شرایط مربوطه وابسته است (نوع تست ، ابعاد محل تسـت ، طرح ترانسفورماتور مورد آزمایش ، تجهیزات تست و غیره) . روش زمین کردن مـورد بـه مورد متفاوت است . لازمهٔ عملکرد صحیح ، درک کامل فرآیـندهای سیـســتم زمـین می باشد .



C_s = ظرفیت خازنی پراکندگی

C_e = ظرفیت خازنی نسبت به زمین

R_e = مقاومت نسبت به زمین

U = ولتاژ ضربه

U_e = اختلاف ولتاژ بین زمین واقعی و مبنا

شکل ۱۰- ۴۰ : زمین کردن مدار ضربه

ضمیمهٔ ۱۰- ۱۰ شکل موج ضربهٔ کلید زنی

ضربهٔ کلید زنی به یک سیم پیچ اعمال می شود و تمام سیم پیچ های دیگر مدار باز هستند .

انتگرال زمانی ولتاژ اعمالی موجب افزایش تغییرات شار هسته می شود . چون ولتاژ اعمالی یکسو ، با دامنهٔ بالا و دارای مدت زمان طولانی می باشد ، هسته ممکن است اشباع شود . با اشباع هسته افت ولتاژ قابل توجهی در امپدانسی که در مقابل ولتاژ اعمالی وجود دارد ایجاد می شود و جریان بالایی برای حفظ مقدار ولتاژ مورد نیاز است .

جریان بالای عبوری از ترانسفورماتور موجب تخلیهٔ خازن های ژنراتور ضربه شده و ولتاژ تغذیه سریعاً به سمت صفر نزول می کند .

برای محاسبهٔ زمان تا لحظهٔ صفر شدن ولتاژ T_s موارد زیر را می توان در نظر داشت :

ولتاژ ژنراتور ضربه در ابتدا تا زمانی که جریانی از ژنراتور کشیده شده و در شرایط عدم اشباع ، ثابت می باشد و پس از اشباع سریعاً به صفر نزول می کند . بدین ترتیب :

$$T_s = k\frac{\Phi_s - \Phi_0}{u}$$

که در آن :

T_s = زمان تا اشباع
Φ_s = شار اشباع
Φ_0 = شار پس ماند (شار هسته بلافاصله قبل از ضربه)
k = عدد ثابت

شار پس ماند Φ_0 ممکن است بسته به مقدار شار در آخرین لحظهٔ قطع ولتاژ قبلی اعمال شده در محدودهٔ $\pm$ ۰/۹ Φ_s واقع شود .

برای رسیدن به مدت زمان طولانی تا اشباع ، شار پس ماند بایستی دارای پلاریتهٔ مخالف در مقایسه با شار تولیدی توسط انتگرال زمانی ولتاژ اعمالی باشد .

یک روش ایجاد شار پس ماند با پلاریتهٔ مخالف اعمال تعدادی ضربهٔ کلیدزنی با پلاریتهٔ مثبت بین ضربه های تعیین شده برای تست است ، البته با این فرض که ضربه های تست دارای پلاریتهٔ منفی هستند . ضربه هایی که برای ایجاد پس ماند اعمال می شوند باید دامنه ای در حد ضربهٔ کالیبراسیون داشته باشند تا موجب ایجاد تنش عایقی در ترانسفورماتور نشوند .

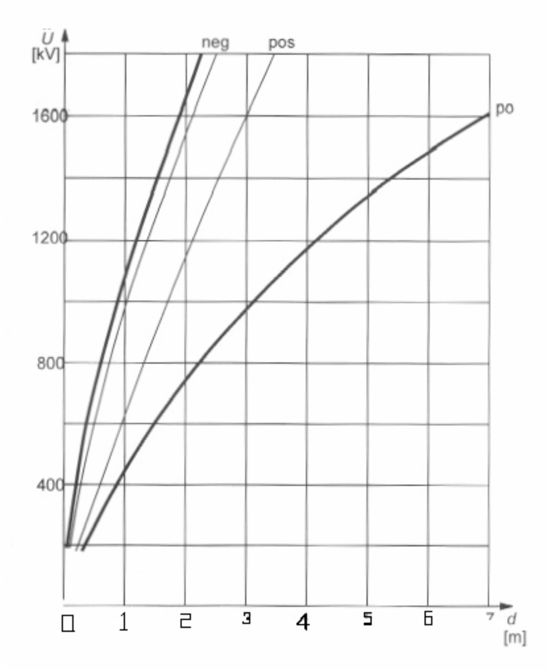
ضمیمهٔ ۱۰- ۱۱ استقامت الکتریکی هوا

شکل ۱۰- ۴۱ اختلاف بین ولتاژ های شکست ۵۰% منفی و مثبت را بـرای ضـربه هـای کلید زنی و صاعقه سوزن- صفحه در هوا نشان می دهد .

ضمیمهٔ ۱۰- ۱۲ تنش ولتاژ ضربه بر ترانسفورماتورهای قدرت

اختلاف اصلی بین تنش ضربهٔ صاعقه بر سیم پیچ های ترانسـفورماتور بـا تـنش ناشـی از تست ولتاژ اعمالی و تست ولتاژ القایی (بخش های ۷ و ۸) در نحوهٔ توزیع ولتاژ در طول سیم پیچ می باشد . در تست AC و تست ضربهٔ کلید زنی ، توزیـع ولـتــاژ تقریبـاً خطـی است .

شکل ۱۰- ۴۲ ورود موج کامل ضربهٔ صاعقه (۱/۲ / ۵۰ μs) به سیم پیچ ترانسفورماتور را نشان می دهد .



ضربهٔ کلید زنی ۱۲۰ / ۴۰۰۰ μs =

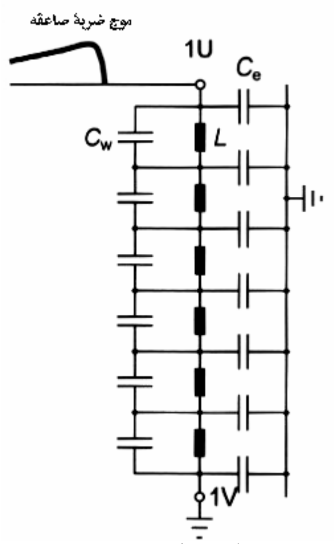
ضربهٔ صاعقه ۱/۲ / ۵۰ μs =

نمودارها برای ۷۶۰ Torr ، ۲۰ °C ، ۱۱ g/m^3

d = فاصله

$\hat{U}$ =ولتاژ پیک ضربه

شکل ۱۰- ۴۱ : ولتاژ شکست ۵۰ % برای الکترودهای سوزن- صفحه در هوا به صورت تابعی از فاصله



C_e = ظرفیت خازنی نسبت به زمین

C_w = ظرفیت خازنی سیم پیچ

L = اندوکتانس سیم پیچ

شکل ۱۰- ۴۲ : مدار معادل سیم پیچ

توجه کنید که مدار معادل سیم پیچ کاملاً با تقریب بدست آمده است . طیف فرکانسی متفاوت در پیشانی و در پشت موج را بایستی جداگانه در نظر گرفت . هنگام ورود پیشانی تیز موج به شبکة خازنی- اندوکتانسی ترانسفورماتور ، به دلیل عملکرد اندوکتانس مقدار جریان کم است . مؤلفة اصلی جریان از خازن های C_w و C_e عبور می کند . هر چه پیشانی تیزتر باشد ، این مؤلفه بزرگتر می شود . سیم پیچ تقریباً به صورت مجموعه ای سری و موازی از خازن ها عمل می کند . نحوة توزیع ولتاژ را خازن های C_e و C_w تعیین می کنند و طبق تعریف آن را توزیع اولیة (ضربه) می نامند ، شکل ۱۰- ۴۳ را ببینید .

مؤلفة ظرفیت خازنی نسبت به زمین C_e تأثیری نامطلوب به توزیع اولیة (ضربه) دارد .

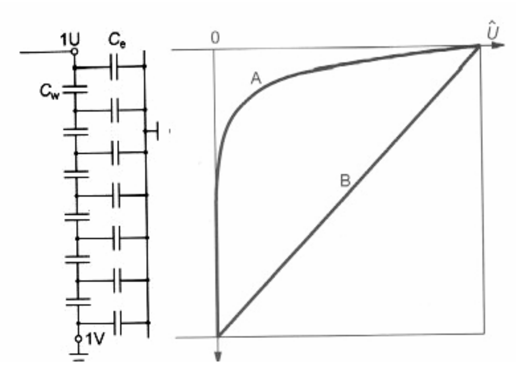
ضریب انتقال $\alpha \approx \sqrt{\frac{C_e}{C_w}}$

هر چه ظرفیت خازنی نسبت به زمین C_e بزرگتر باشد ، اختلاف ولتاژ و پیرو آن نقش ولتاژ در دورهای انتهایی سیم پیچ بیشتر خواهد شد ، منحنی A شکل ۱۰- ۴۳ را ببینید .

پس از عبور پیشانی ، پشت موج (۵۰ µs) توزیع ولتاژ را تعیین می کند . این حالت طبق تعریف توزیع نهایی (ضربه) نام دارد . جریان عبوری از خازن ها کم می شود ، مولفة اصلی جریان ضربه از سیم پیچ جریان می یابد و اندوکتانس سیم پیچ عامل توزیع ولتاژ است ، شکل ۱۰- ۴۴ را ببینید .

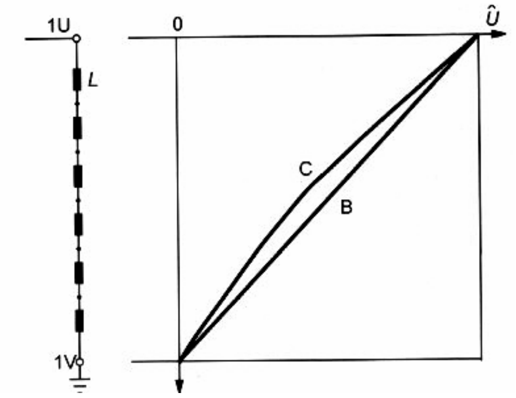
انتقال از توزیع (ضربة) اولیه به نهایی موجب پدیده ای گذرا در سیم پیچ می شود ، شکل ۱۰- ۴۵ را ببینید .

هر چه اختلاف توزیع اولیه و نهایی کوچکتر باشد میزان این پدیده نیز کمتر است . برای تمام انواع تست ضربه نحوة توزیع ولتاژ بوسیلة کامپیوتر و یا با استفاده از ژنراتور پالس و اسیلوسکوپ در مرحلة اکتیو پارت قابل محاسبه است ، شکل ۱۰- ۴۶ را ببینید .



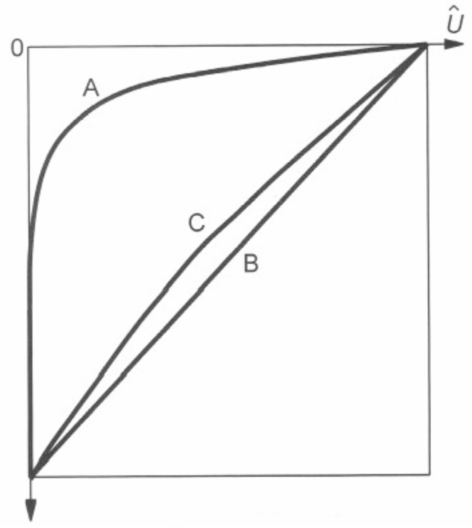
A = توزیع اولیه
B = توزیع خطی

شکل ۱۰- ۴۳ : مدار معادل سیم پیچ برای توزیع اولیه



B = توزیع خطی
C = توزیع نهایی

شکل ۱۰- ۴۴ : مدار معادل سیم پیچ برای توزیع نهایی



A = توزیع اولیه
B = توزیع خطی
C = توزیع نهایی

شکل ۱۰- ۴۵ : توزیع ولتاژ ضربه در طول سیم پیچ

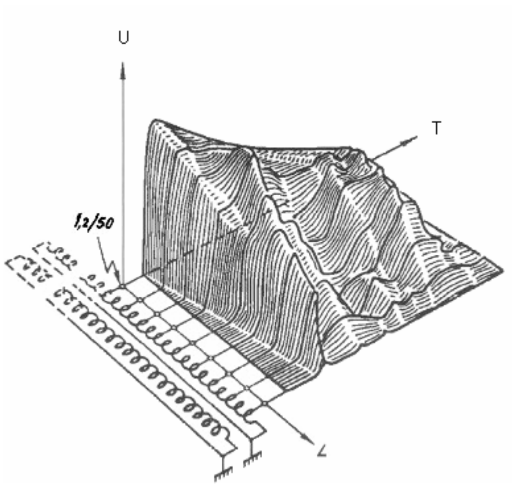
در ادامه ، جمع بندی توضیحات فوق در مورد تنش وارده بر سیم پیچ در طی تست ضربهٔ صاعقه ارائه می شود :

موج کامل ، عایق بندی سیم پیچ را هنگام ورود پیشانی مورد تنش قرار می دهد . میزان تنش عایق بندی اصلی(major insulation) با تیزتر شدن پیشانی افزایش و با زاویه دار شدن آن کاهش می یابد . عایق بندی اصلی را دنبالهٔ موج مورد تنش قرار می دهد . منظور از عایق بندی اصلی ، عایق بندی سیم پیچ مورد آزمایش نسبت به قسمت های زمین شده (چهار چوب آهنی ، مخزن ، سایر سیم پیچ های زمین شده) و نیز عایق بندی در طول سیم پیچ است .

موج ضربهٔ صاعقه پشت بریده بدلیل فروریزی سریع ولتاژ (در زمان کمتر از ۰/۲ μs) بیشتر عایق بندی سیم پیچ و در درجهٔ اول دورهای ابتدایی سیم پیچ را تحت تنش قرار می دهد . با تیزتر شدن زاویهٔ فروریزی ولتاژ ، تنش وارده بیشتر می شود . شکست الکتریکی نزدیک به ترمینال های ترانسفورماتور خطرناک ترین نوع ضربه را ایجاد می کند ؛ علّت آن نزدیک بودن فاصله ، میرایی کمتر در مسیر و تیزتر شدن زاویهٔ شکست ولتاژ است .

موج پیشانی بریده همان بخش از سیم پیچ را مورد تنش قرار می دهد که در اعمال موج پشت بریده تحت تنش است . با این وجود مقدار پیک ولتاژ تست بسیار بالاتر و مدت زمان وجود تنش بسیار کوتاهتر است .

در تست ضربهٔ کلید زنی تنش اجزای عایق بندی مشابه تست ولتاژ القایی است (بخش ۸) .



شکل ۱۰- ۴۶ : توزیع در طول سیم پیچ به صورت تابعی از زمان

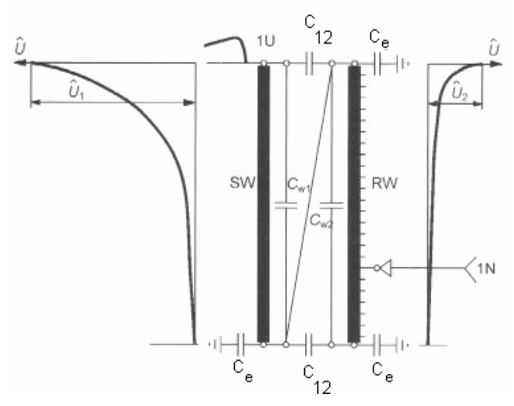
ضمیمهٔ ۱۰- ۱۲- ۱ ولتاژ ضربهٔ انتقالی به سیم پیچ ها و تکه سیم پیچ های مجاور

بدلیل کوپلاژ خازنی سیم پیچ مورد آزمایش با سیم پیچ هایی که تحت تست نیستند ، و شارژ توسط سیم پیچ مورد آزمایش ، توزیع (ضربه) اولیه در این سیم پیچ ها نیز مشابه سیم پیچ تحت تست است . پدیدهٔ گذرایی که بدنبال می آید بطور مغناطیسی به سایر سیم پیچ ها منتقل می شود .

به هر حال بدلیل توزیع خازنی ولتاژ بین سیم پیچ ها و ظرفیت خازنی نسبت به زمین ، ولتاژهای خازنی انتقالی نسبتاً کوچک است .

ولتاژهای انتقالی از راه مغناطیسی (پدیدهٔ گذرا) متناسب با نسبت دورها و بسیار بزرگتر است . شکل ۱۰- ۴۷ مثالی از توزیع اولیهٔ (ضربه) را بر روی سیم پیچ تنظیم ولتاژی که بطور سری با سیم پیچ اصلی (اتّصال افزایشی) وصل شده نشان می دهد . ولتاژهای ضربه انتقالی به سایر قسمت های سیم پیچ و یا به سیم پیچ هایی که تحت تست نیستند تابعی از کوپلاژ نسبی خازنی/ القایی و یا اتصالات سیم پیچ (برای مثال اتّصال افزایشی یا کاهشی سیم پیچ تنظیم ولتاژ) است .

اگر مقاومتی (برای شبیه سازی کابل ، خط انتقال یا ماشین الکتریکی که معمولاً به ثانویه وصل است) به سیم پیچی که تحت تست نیست وصل شود ، ولتاژ انتقالی از راه مغناطیسی کاملاً کاهش می یابد .



SW = سیم پیچ اصلی
RW = سیم پیچ تنظیم ولتاژ
C_{12} = ظرفیت خازنی بین سیم پیچ ها
$C_{w1,2}$ = ظرفیت خازنی سیم پیچ
C_e = ظرفیت خازنی نسبت به زمین

شکل ۱۰- ۴۷ : ضربهٔ صاعقه- توزیع اولیه در طول سیم پیچ اصلی و تنظیم ولتاژ

تست ترانسفورماتورهای قدرت

۱۱- تست حرارتی

۱۱- ۱ مراجع / استانداردها

- IEC 60076-2 (1993), Clause 5 " Test of temperature rise " [2]
- IEC 60354 (1991) " Loading guide for oil immersed power Transformers " [11]
- IEEE Std C57.12.00-2000, clause 5.11 " Temperature rise and loading conditions " [50] .
- IEEE Std C57.12.90-1999, clause 11 " Temperature rise " [51]

توجه :

تست حرارتی(temperature rise test) از نظر IEC ، **تست تایپ** و از بیان IEEE **تست طراحی** می باشد . این تست ، تست گرمایش (heat- run) نیز نامیده می شود .

۱۱- ۲ منظور از تست

منظور از تست مقایسهٔ مقادیر جهش های حرارتی روغن و سیم پیچ با مقادیر گارانتی شده است . همچنین می توان به وجود نقاط داغ (hot spot) احتمالی (در داخل و خارج از سیم پیچ) به ویژه در ترانسفورماتورهایی که دارای شار پراکندگی بالایی هستند (برای مثال ، ترانسفورماتورهای قدرت با توان بزرگتر از MVA ۵۰۰ - ۳۰۰ یا اتو ترانسفورماتورها) پی برد .

امروزه که بحث لزوم اضافه بار و نیز ارتقاء ترانسفورماتورها در آینده مطرح است ، اطلاعات مربوط به جهش حرارتی (temperature rise) متوسط و بالای روغن (top oil) و نیز اختلاف دمای (gradient) سیم پیچ - روغن ، اهمیت یافته است .

۱۱- ۳ دما / جهش حرارتی

حفظ دمای کار ترانسفورماتور در محدودهٔ مجاز ، عامل اساسی در بهره برداری مطمئن و طولانی از آن است . استانداردهای IEC و IEEE محدوده های مجاز مقادیر دما را معرفی کرده اند .

به منظور مقایسهٔ یکسان ترانسفورماتورهای مختلف که توسط سازنده های متفاوت تولید گردیده است ، استانداردها جهش های حرارتی مجاز را نسبت به دمای سیستم خنک کننده مشخص نموده اند . دمای محیط نیز در استاندارد مطرح گردیده و تنظیم آن بر عهدهٔ مشتری است .

بین استانداردهای IEC و IEEE تفاوتی جزیی در مقادیر جهش حرارتی و رابطهٔ آن با توان نامی وجود دارد . IEC تصریح می نماید که بر روی یک توان نامی معین ، مقادیر جهش حرارتی نباید از مقادیر مجاز فراتر رود . مطابق بیان IEEE توان نامی عبارت است از میزان بار یک ترانسفورماتور، متناسب با جهش حرارتی مجاز آن .

برای تعاریف مربوط به دما / جهش حرارتی ، بند ۱ ضمیمهٔ ۱۱ را ببینید .

۱۱- ۴ اندازه گیری های دما

دمای روغن را می توان به طور مستقیم و توسط دما سنجی که در تماس مستقیم یا غیر مستقیم با روغن قرار دارد ، اندازه گیری کرد .

دمای سیم پیچ را باید به طور غیر مستقیم با اندازه گیری مقاومت اهمی سیم پیچ بدست آورد . مقاومت اهمی سیم پیچ قبل از تست و در شرایطی که ترانسفورماتور به تعادل دمایی رسیده است ، معمولاً توسط همان مدار تست مقاومت اهمی متداول اندازه گیری می شود . بلافاصله پس از اتمام مرحلة دوم تست حرارتی و اعمال جریان نامی مقاومت اهمی سیم پیچ مجدداً اندازه گیری می گردد . اختلاف در مقادیر مقاومت اهمی نشان دهندة میزان تغییر دمای سیم پیچ در طول تست است .

اندازه گیری دمای سیم پیچ توسط دما سنج هایی که به طور مستقیم به سیم پیچ ها وصل می گردند ، مورد نظر استاندارد نیست . چنین دستگاههایی بر مبنای فیبر نوری کار می کند و ممکن است در مراحل اولیة طراحی ترانسفورماتور به کار رود .

۱۱- ۵ اصول و روش های تست

۱۱- ۵- ۱ اصول

مدل ساده توزیع دما در شکل ۱۱- ۱ نشان داده شده است . برای ساده سازی مدل فرض های زیر انجام شده است :

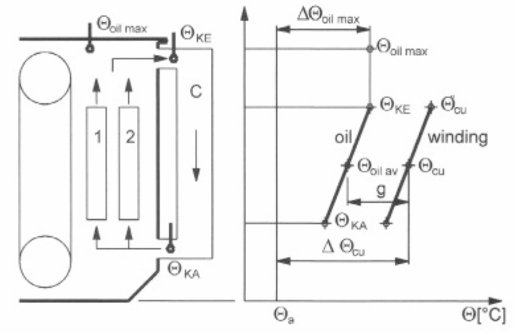
الف : دمای روغن در داخل و در امتداد سیم پیچ ها به طور خطی از پایین به بالا افزایش می یابد .

ب : دمای سیم پیچ از پایین به بالا دارای افزایش خطی بوده و همواره دارای یک اختلاف ثابت g نسبت به روغن مجاور است .

فقط دماهای $\Theta_{oil\ max}$ ، Θ_{KE} ، Θ_{KA} در یک تست حرارتی به طور مستقیم اندازه گیری می شوند . دمای سیم پیچ Θ_{Cu} به طور غیر مستقیم و با محاسبه (اندازه گیری مقاومت) به دست می آید .

۱۱- ۵- ۲ روش های تست [2] ، [51]

از نظر تئوری ، روش های متعدد برای انجام تست حرارتی وجود دارد . به دلیل راحتی از روش اتصال کوتاه استفاده می شود . سایر روش های تست از قبیل روش پشت به پشت و اندازه گیری دما در حین بهره برداری عادی در بند ۲ ضمیمه ۱۱ بیشتر توضیح داده شده است .



$\Theta_{oil\,\max}$ = دمای بالای روغن (زیر درپوش)

$\Delta\Theta_{oil\,\max}$ = جهش حرارتی بالای روغن (مقدار گارانتی)

$\Delta\Theta_{oil\,max} = \Theta_{oil\,max} - \Theta_a$

Θ_a = دمای محیط ، یا دمای آب ورودی برای ترانسفورماتورهایی که با آب خنک می شوند .

Θ_{Cu} = دمای متوسط سیم پیچ

$\Delta\Theta_{Cu}$ = جهش حرارتی متوسط سیم پیچ (مقدار گارانتی)

Θ_{KE} = دمای روغن (ورود به خنک کننده)

Θ_{KA} = دمای روغن (خروج از خنک کننده)

Θ_{oil-av} = دمای روغن متوسط که محاسبه شده است

Θ''_{Cu} = حداکثر دمای سیم پیچ ؛ توجه : این مقدار معمولاً برابر با مقدار دمای نقطة داغ نیست

C = خنک کننده

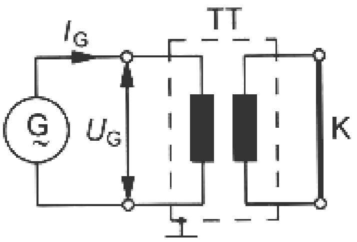
1,2 = سیم پیچ های ترانسفورماتور

g = اختلاف دمای سیم پیچ - روغن

شکل ۱۱- ۱ : مدل ساده توزیع دما در یک ترانسفورماتور
[1] ، [2]

۱۱- ۵- ۳ روش اتّصال کوتاه

برای هر جفت از سیم پیچ ها تست یک بار انجام می گردد . در ترانسفورماتورهای دو سیم پیچه ، فقط یک تست لازم است . به منظور انجام این تست یکی از سیم پیچ ها اتّصال کوتاه می گردد (شکل ۱۱- ۲) . ترانسفورماتور تحت باری معادل تلفات کل قرار می گیرد . تلفات کل از مجموع تلفات بار در دمای مبنا و تلفات بی باری تشکیل می شود که قبلاً در آزمایش های مجزا بدست آمده اند (بخش ۵ و ۶ را ببینید) .



G = منبع ولتاژ
K = هادی اتّصال کوتاه
I_G = جریان تغذیه
U_G = ولتاژ تغذیه
TT = ترانسفورماتور تحت تست

شکل ۱۱- ۲ : مدار اتّصال برای روش اتّصال کوتاه

تست در دو مرحله انجام می گیرد :

- مرحلهٔ اعمال تلفات کل به منظور بدست آوردن جهش حرارتی بالای روغن
- مرحلهٔ اعمال جریان نامی به منظور بدست آوردن جهش حرارتی متوسط سیم پیچ

ولتاژ تغذیه در این تست تقریباً معادل ولتاژ اتّصال کوتاه می باشد . بدین ترتیب عملاً تلفات بی باری در هستهٔ ترانسفورماتور ناچیز است (بخش ۵ را ببینید) . به هر حال جهت بدست آوردن جهش حرارتی بالای روغن لازم است تلفات کل اعمال گردد . بنابراین تلفات بی باری بایستی توسط اعمال جریانی کمی بیشتر از جریان نامی در سیم پیچ ها شبیه سازی گردد .

$$I_G = k \;.\; I_r$$

$$U_G = k \;.\; U_{SC}$$

که در آن :

$$k = \sqrt{\frac{P_L + P_0}{P_0}}$$

P_L = تلفات بار در جریان نامی و در دمای مبنا
P_0 = تلفات بی باری در ولتاژ نامی
I_G = جریان تغذیه
I_r = جریان نامی ترانسفورماتور
U_{cc} = ولتاژ اتّصال کوتاه
U_G = ولتاژ تغذیه

توان ظاهری لازم برای انجام این تست عبارت است از :

$$S_G = k^2 \;.\; S_r \;.\; \left(\frac{\varepsilon_{cc}}{100}\right)$$

که در آن :

S_r = توان نامی
ε_{cc} = امپدانس اتّصال کوتاه بر حسب %

ژنراتور بایستی حداقل بتواند توان اکتیو $P_L + P_0$ را تأمین نماید . توان رئاکتیو در صورت امکان می تواند توسط بانک خازنی تأمین گردد . این روش در اکثر آزمایشگاهها رایج است .

۱۱- ۶   فرآیند و مدار اندازه گیری

۱۱- ۶- ۱ آماده سازی های قبل از تست

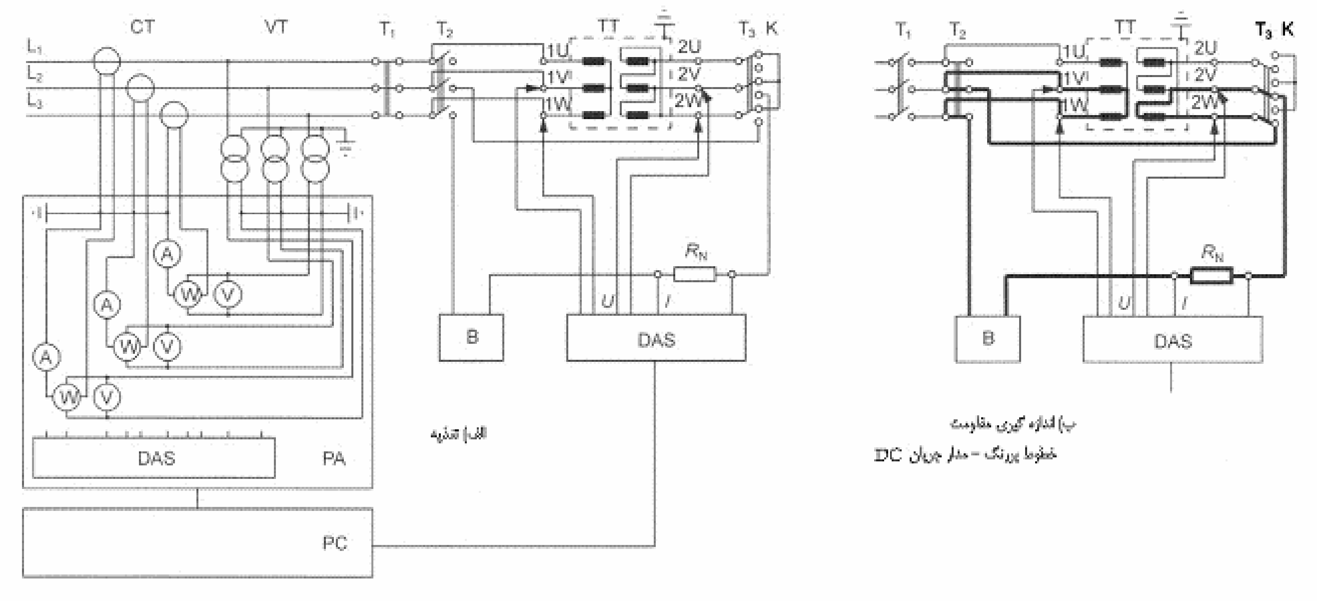
ترانسفورماتور بایستی به نحوی در آزمایشگاه قرار داده شود که اشیاء و دیوارهای جانبی آزمایشگاه که نزدیک به هوای ورودی و خروجی سیستم خنک کننده ترانسفورماتور می باشند ، بر عملکرد آن تأثیر نگذارند . سالن تست بایستی در حد امکان جریان هوا نداشته باشد [51] .

ترانسفورماتور بایستی مجهز به رله های حفاظتی خود باشد (مثلاً رلة بوخهلتس) [2] .

جهت حفاظت افراد از خطر برق گرفتگی ، ولتاژ تغذیة ترانسفورماتور بایستی به نحوی به ترانسفورماتور وصل گردد تا قرائت دماهای سیستم خنک کننده براحتی ممکن باشد . کابل های مورد استفاده بایستی دارای سطح مقطع کافی بوده و از استفاده از کابل هایی که سر کابل آنها لحیم کاری شده ، پرهیز گردد .

برای استفادة بهینه از امکانات آزمایشگاه ، دانستن مدت زمان انجام تست جهش حرارتی اهمیت دارد . روشی برای بدست آوردن ثابت زمانی حرارتی در بند ۳ ضمیمة ۱۱ معرفی شده است .

مدار سادة شدة انجام تست حرارتی در شکل ۱۱- ۳ نمایش داده شده است .



$T_{1,2,3}$ = کلیدهای قطع ، در موقعیت
الف) برای عملکرد عادی
ب) برای اندازه گیری مقاومت اهمی
PA = آنالایزر توان برای اندازه گیری U و I و تلفات
DAS = سیستم جمع آوری داده
PC = کامپیوتر شخصی
R_N = مقاومت اهمی استاندارد
TT = ترانسفورماتور مورد آزمایش
B = منبع DC
VT = ترانسفورماتور ولتاژ
CT = ترانسفورماتور جریان
K = شین اتصال کوتاه

شکل ۱۱- ۳ : مدار سادة شدة انجام تست حرارتی

مدار تغذیه اندازه گیری تلفات ، ولتاژها و جریان ها ، اساساً با مدار اندازه گیری تلفات بار مشابه است (بخش ۵ را ببینید) . تنها تفاوت این است که از دو کلید قطع کنندهٔ کمکی (T_1 و T_2 در شکل ۱۱- ۳) استفاده شده است که تجهیزات اندازه گیری مقاومت DC را بلافاصله بعد از قطع کردن برق مدار در کوتاهترین زمان به ترانسفورماتور مورد آزمایش وصل کند .

بایستی توجه نمود که می توان از دو منبع DC جداگانه برای اندازه گیری مقاومت سیم پیچ های HV و LV استفاده نمود .

در تست حرارتی ترانسفورماتورهای بزرگ قدرت که دارای جریان نامی بالا در سمت LV می باشند ، یافتن کلیدهای قطع مناسب معمولاً میسر نیست . در چنین مواردی ، اتّصال کوتاه سمت فشار ضعیف معمولاً توسط شین های جریان بالا ایجاد می شود که پس از قطع مدار می توان سریعاً آنها را باز کرد ، یک راهکار استفاده از گیره های پیچی است .

هر یک از روش های اندازه گیری مقاومت که در بخش ۳ (اندازه گیری مقاومت) توضیح داده شده است و یا ترکیبی از دو روش ، می تواند مورد استفاده قرار گیرد . در مورد منبع DC نیز چنین است . به منظور دستیابی سریع به جریان اندازه گیری مقاومت DC در تست حرارتی ، به اشباع بردن سریع هسته ضروری است .

اندازه گیری مقاومت اهمی سرد قبل از تست بایستی دقیقاً با همان مدار اندازه گیری مقاومت گرم انجام گیرد .

یک توصیهٔ بسیار مهم برای تست ترانسفورماتورهای بزرگ این است که آنالیز گازهای حل شده در روغن (DGA) قبل و بعد از تست انجام گردد تا موارد نقطهٔ داغ در صورت وجود مشخص گردد ؛ این نقاط بدین علّت که تأثیری در نتیجهٔ نهایی آزمایش ندارند در صورت عدم انجام آنالیز گازهای محلول ، مخفی می مانند [2] ، [201] بند ۹ ضمیمهٔ ۱۱ مثال ۲ را ببینید .

۱۱- ۶- ۲ اندازه گیری دمای هوای خنک کننده

کلّیات

بر اساس استانداردها [2] ، [51] لازم است دمای هوای خنک کننده با حداقل سه سنسور (ترموکوپل یا ترمومتر) سنجیده شود . این دما سنج ها بایستی در مقابل جریان هوا و گرمای تشعشع یافته از مخزن حفاظت شده باشند . بایستی سنسورها در ظروف پر از روغن با ثابت زمانی گرمایش تقریباً برابر با ترانسفورماتور قرار گیرند .

IEEE [51] برای جلوگیری از خطای ناشی از نوسانات سریع دمای هوای خنک کننده مقررات معینی در مورد ثابت زمانی این ظرف ها وضع کرده است . ظروف استوانه با حجم روغن در حدود ۱ تا ۲ dm^3 بر الزامات فوق الذکر منطبق است . قرائت دما بایستی در فواصل زمانی منظم انجام گرفته و یا توسط ثبات بطور اتوماتیک ضبط گردد .

خنک کاری طبیعی با هوا (AN)

دمای هوا بایستی حداقل با سه سنسور در اطراف مخزن اندازه گیری شود . محل استقرار سنسورها در ارتفاع نصف بلندی مخزن یا رادیاتورها و در فاصلهٔ ۱ تا ۲ m از ترانسفورماتور است .

خنک کاری مصنوعی با هوا (AF)

مطابق فرآیند فوق عمل می شود ، اما محل سنسورها باید جایی باشد که دمای حقیقی هوای ورودی به دمنده ها (fan) یا رادیاتور (cooler) را اندازه گیری کند .

اندازه گیری دمای آب خنک کننده

دمای مبنا از پاکت نصب شده در ورودی آب خنک کننده خوانده می شود . بایستی دمای آب خروجی و میزان جریان آب نیز ثبت گردد .

۱۱- ۶- ۳ اندازه گیری جهش حرارتی روغن

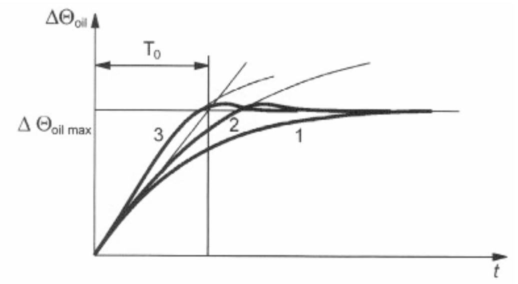
اندازه گیری جهش حرارتی روغن اولین قدم در تست حرارتی با روش اتّصال کوتاه است . برای رسیدن به جهش حرارتی بالای روغن $\Delta\Theta_{oil\text{-}max}$ و جهش حرارتی متوسط روغن $\Delta\Theta_{oil-av}$ مجموع تلفات بار و بی باری اندازه گیری شده از قبل به ترانسفورماتور اعمال می شود (بخش ۵ ، ۶ را ببینید) .

در ترانسفورماتورهای با سیم پیچ انشعاب دار هر انشعاب تلفات خود را دارد . در چنین مواردی مطابق استاندارد IEC 60076-2 بند 4 . 2 [2] و IEEE Std C.57.12.90 بند 11 [51] لازم است تست حرارتی در انشعابی که بالاترین جریان را دارد انجام شود ؛ در این انشعاب معمولاً بیشترین تلفات وجود دارد .

تست با اعمال تلفات کل تا آنجا ادامه می یابد که جهش حرارتی روغن به مقداری ثابت برسد . تست هنگامی خاتمه می یابد که میزان تغییر جهش حرارتی بالای روغن کمتر از ۱ K در هر ساعت گردد و این وضعیت برای ۳ ساعت ادامه یابد [2] . مطابق IEEE [51] جهش حرارتی بالای روغن در طی دورهٔ سه ساعته نباید بیشتر از ۲/۵ % و یا ۱ K (هر کدام که بیشتر باشد) تغییر یابد .

ضمیمهٔ C استاندارد IEC 60076-2 [2] روشی را برای برون یابی مقادیر اندازه گیری شده تا زمان ثابت شدن مقادیر ارائه می دهد ، بند ۴ ضمیمهٔ ۱۱ را ببینید .

برای کاهش مدت زمان لازم برای گرم کردن ترانسفورماتور می توان تست را با تلفات بالاتر و یا با کاهش ظرفیت سیستم خنک کننده انجام داد ، شکل ۱۱- ۴ را ببینید . در چنین مواردی بدلیل عدم امکان برون یابی مطابق شکل ۱۰- ۱۱ بند ۴ ضمیمهٔ ۱۱ و تخمین زمان پایان تست تجربهٔ بیشتری برای تعیین مدت زمان گرمایش مورد نیاز است .



1 = تست عادی با تلفات کل ، خنک کننده در حال کار، پایداری پس از T_0 ۴- ۳

2 = تست با تلفات کل ، اما شروع با خنک کنندگی کمتر

3 = تست شروع شده با تلفات بیشتر

T_0 = ثابت زمانی ترانسفورماتور در حال کار کل خنک کننده

شکل ۱۱- ۴ : تست حرارتی شروع شده با تلفات بیشتر و یا خنک کنندگی کمتر

۱۱- ۶- ۴ تعریف دمای متوسط روغن

دمای متوسط روغن Θ_{oil-av} عبارت است از دمای بالای روغن $\Theta_{oil-max}$ منهای نصف اختلاف دمای روغن در بالا Θ_{KE} و پایین Θ_{KA} سیستم خنک کننده [51] . همچنین می توان آن را برابر متوسط دمای بالای روغن $\Theta_{oil-max}$ و دمای پایین روغن Θ_{KA} (دمای روغن برگشتی از سیستم خنک کننده به مخزن) گرفت [2] .

مطابق IEC [2] :

$$\Theta_{oil-av} = {}^1/_2(\Theta_{oil-max} + \Theta_{KA})$$

مطابق IEEE [51] :

$$\Theta_{oil-av} = \Theta_{oil-max} - {}^1/_2(\Theta_{KE} - \Theta_{KA})$$

بنابراین جهش حرارتی متوسط روغن عبارت است از :

$$\Delta\Theta_{oil-av} = \Theta_{oil-av} - \Theta_a$$

دمای بالای روغن بایستی همیشه با ترمومتر یا ترموکوپل های قرار گرفته در یک یا چند پاکت پر از روغن روی درپوش بدست آید .

اندازه گیری دمای روغن در بالا و پایین سیستم خنک کننده (Θ_{KE} و Θ_{KA} در شکل ۱- ۱۱) پیچیده تر است ، بویژه در ترانسفورماتورهای با خنک کنندگی ON و دارای رادیاتور . این رادیاتورها معمولاً پاکت ندارند . در چنین مواردی دمای سطح پره ها با استفاده از ترموکوپل سنجیده می شود ، بند ۵ ضمیمه ۱۱ را ببینید . حتّی در صورت نصب دقیق ترموکوپل ها خطای اندازه گیری نسبتاً زیادی ممکن است (در اثر هدایت گرمایی) پیش آید .

بنابراین دمای بالای روغن اندازه گیری شده از پاکت پر از روغن روی درپوش $\Theta_{oil-max}$ ، ممکن است چندین درجه بالاتر از دمای Θ_{KE} سنجیده شده از روی سطح رادیاتورها باشد . مطابق [51] این موضوع باعث کاهش دقّت اندازه گیری Θ_{oil-av} نمی شود ؛ زیرا Θ_{KA} نیز با همان خطای اندازه گیری سنجیده می شود . بدین معنی که اختلاف Θ_{KA} - Θ_{KE} و بدنبال آن Θ_{oil-av} درست باقی می مانند .

برای ترانسفورماتورهای دارای خنک کنندهٔ مجزا (برای مثال با خنک کنندگی OFAF یا OFWF) اندازه گیری Θ_{KE} و Θ_{KA} راحت تر است . معمولاً این سیستم ها دارای پاکت برای اندازه گیری دمای روغن ورودی و خروجی هستند . اگر تأمین توان لازم برای تست حرارتی (بخش ۱۱- ۵- ۳) ممکن نباشد ، تست را می توان با توان کمتر انجام داد . نتیجه $\Delta\Theta_{oil-max\,M}$ سپس توسط فرمول زیر اصلاح می گردد :

$$\Delta\Theta_{oil-maxN} = \Delta\Theta_{oil-max\,M}\left(\frac{P_{tot}}{P_M}\right)^x$$

که در آن :

$\Delta\Theta_{oil-max\,N}$ = جهش حرارتی بالای روغن در تلفات کل P_{tot}

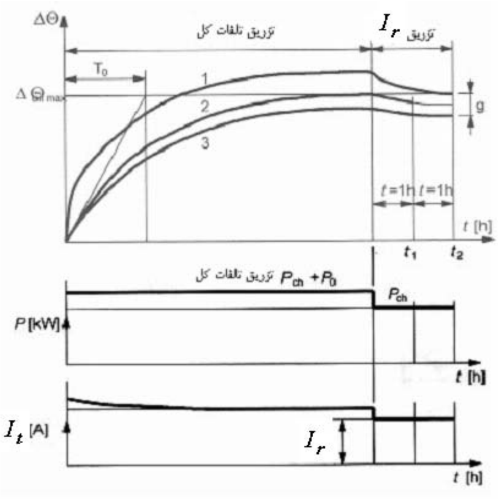
$\Delta\Theta_{oil-max\,M}$ = جهش حرارتی بالای روغن در تلفات کمتر P_M

x = عدد نما مطابق جدول

این فرمول در محدودهٔ ٪ ۲۰ ± میزان اصلی توانی که باید تغذیه می شد معتبر است [2] و [51] .

عدد نمای x

خنک کنندگی	IEC[2]	IEEE[51]
ONAN	۰/۹	۰/۸
ONAF	۰/۹	۰/۹
OFAF	۱	۱
ODAF	۱	۱



T_0 = ثابت زمانی ترانسفورماتور
t_1 = لحظهٔ شروع به اندازه گیری مقاومت HV و LV
t_2 = لحظهٔ شروع به اندازه گیری مقاومت سیم پیچ دوم در صورت اندازه گیری غیر همزمان مقاومت دو سیم پیچ
g = اختلاف دمای سیم پیچ- روغن
1 = جهش سیم پیچ
2 = جهش بالای روغن
3 = جهش متوسط روغن

شکل ۱۱- ۵ : منحنی تغییرات دما در طی تست

۱۱- ۶- ۵ اندازه گیری جهش حرارتی متوسط سیم پیچ

اندازه گیری جهش حرارتی متوسط سیم پیچ ، دومین قدم در تست حرارتی به روش اتّصال کوتاه است . پس از ثابت شدن جهش حرارتی بالای روغن $\Delta\Theta_{oil-max}$ ، تست بلافاصله با کاهش جریان به مقدار پایین تر و برابر با جریان نامی I_r ادامه می یابد (شکل ۱۱- ۵ را ببینید) . در صورتی که اندازه گیری مقاومت بلافاصله پس از مرحلهٔ اول انجام می گرفت دمای غیر واقعی و بالاتری برای سیم پیچ بدست می آمد .

مرحلهٔ دوم یک ساعت طول می کشد . این زمان برای اندازه گیری درست جهش حرارتی سیم پیچ کافی است ؛ زیرا معمولاً ثابت زمانی سیم پیچ در محدودهٔ ۳ تا ۲۰ دقیقه است . اگر طرح ترانسفورماتور معین باشد ، ثابت زمانی سیم پیچ مسی τ_W از فرمول زیر قابل محاسبه است :

$$\tau_W \approx 160\frac{g}{J^2}\ [\text{s}]$$

که در آن :

τ_W = ثابت زمانی سیم پیچ بر حسب ثانیه
J = چگالی جریان بر حسب A/mm^2
g = اختلاف دمای روغن- سیم پیچ بر حسب K

در مرحلهٔ اول تست (اندازه گیری جهش حرارتی روغن) فرقی نمی کند که تلفات کل با چه فرکانسی به ترانسفورماتور اعمال شود . در مورد مرحلهٔ دوم چنین نیست . در این مرحله جریان تزریقی بایستی دارای فرکانس نامی باشد چون فقط در این صورت تلفات گردابی تولیدی در سیم پیچ ها برابر مقدار واقعی خواهد بود . اگر تزریق جریان با فرکانس نامی ممکن نباشد بند ۶ ضمیمهٔ ۱۱ را ببینید .

اندازه گیری مقاومت به شرح زیر انجام می شود :

- بلافاصله پس از قطع تغذیهٔ AC (در جریان نامی) و برداشتن اتّصال کوتاه ، مدار اندازه گیری مقاومت DC به سیم پیچ های مورد نظر وصل می شود (در حد امکان مقاومت سیم پیچ های HV و LV همزمان مورد اندازه گیری قرار می گیرد و یا دو سیم پیچ یکی پس از دیگری با فاصلهٔ زمانی یک ساعت تست می شوند) .

  چون دمای سیم پیچ و مقاومت آن پس از قطع تغذیهٔ AC متغیر با زمان در حال کاهش است ، مقادیر مقاومت اندازه گیری شده ، بایستی رو به عقب اصلاح گردد تا مقاومت در لحظهٔ قطع بدست آید .

- در ترانسفورماتورهای با خنک کنندگی OFAF اندازه گیری مقاومت پس از قطع تغذیهٔ AC مطابق پیشنهاد استاندارد IEC [2] بدون قطع عملکرد پمپ ها و دمنده ها انجام می شود ؛ در حالیکه مطابق استاندارد IEEE [50] قطع کردن دمنده ها و یا جریان آب و روشن ماندن پمپ های روغن پیشنهاد شده است .

- روش استاندارد برای تصحیح ، اندازه گیری مقاومت نسبت به زمان می باشد [2] و [51] . روشی دیگر در IEEE Std C57.12.90 [51] ارائه شده است که در آن از ضرایب تصحیح برای یافتن مقاومت در لحظهٔ قطع تغذیهٔ AC استفاده می شود ، بند ۷ ضمیمهٔ ۱۱ را ببینید .

اولین قرائت مقاومت به محض پایان اثر القایی انجام می شود (بخش ۳ را ببینید) ، اما زمان آن نباید از ۴ دقیقه دیرتر باشد . برای کنترل پایان یافتن اثر القایی می توان از سیم پیچ هایی که مورد آزمایش نیستند اندازه گیری ولتاژ انجام داد . داده های زمان / مقاومت بایستی ۱۰ تا ۲۰ دقیقه ثبت گردد .

اندازه گیری مقاومت نسبت به زمان با روش آمپرمتر - ولت متر (به کمک سیستم های جمع آوری داده) مشکل نیست . از طرف دیگر روش پل ، نیاز به تجربه بیشتری دارد ، زیرا مقاومت دائم در حال تغییر است . روش پیشنهادی ، تنظیم مقاومت دهدهی و اندازه گیری زمان تا صفر شدن انحراف گالوانومتر است . در هر صورت روش پل تحت شرایط خاصی برای اندازه گیری مقاومت در تست حرارتی توصیه می شود .

امروزه اندازه گیری مقاومت در تست حرارتی بیشتر با استفاده از سیستم های جمع آوری داده (Data Acquisition systems) انجام می شود که داده های مقاومت / زمان را بطور اتوماتیک برون یابی کرده و دمای سیم پیچ را محاسبه می کند ، شکل ۱۱- ۱۳ را ببینید .

اگر سیستم جمع آوری داده در دسترس نباشد ، لازم است داده های مقاومت/ زمان بر روی کاغذ شطرنجی مناسب ثبت گردد تا مقاومت در لحظة قطع تغذیة AC (صفر = t) بدست آید . معمولاً برون یابی در مختصات خطی انجام می شود ، شکل ۱۱- ۶ را ببینید.

شکل ۱۱- ۶ نشان می دهد که دمای متوسط روغن چسبیده به سیم پیچ را می توان با استفاده از مجانب تابع مقاومت/ زمان بدست آورد ؛ این موضوع بویژه برای ترانسفورماتورهای چند سیم پیچه اهمیت دارد ، مثال ۳ بند ۹ ضمیمة ۱۱ را ببینید .

معمولاً دمای متوسط روغن از رابطة زیر بدست می آید :

$$\Theta_{oil-av} = \Theta_{oil-max} - 0{,}5(\Theta_{KE} - \Theta_{KA}) \quad \text{(IEEE)} \text{ یا}$$

$$\Theta_{oil-av} = \Theta_{oil-max} - 0{,}5(\Theta_{oil-max} - \Theta_{KA}) \quad \text{(IEC)}$$

دمای متوسط سیم پیچ Θ_{Cu} برای سیم پیچ های مسی با استفاده از فرمول زیر بدست می آید :

$$\Theta'_{Cu} = \frac{R_W}{R_C}(235^* + \Theta_C) - 235^*$$

که در آن :

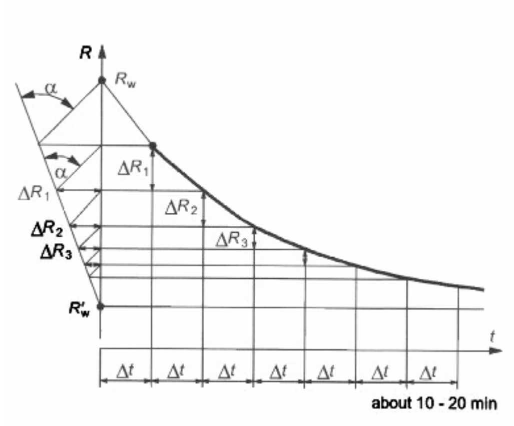
Θ'_{Cu} = دمای سیم پیچ (گرم)

R_W = مقاومت اکتیو در دمای Θ_W (گرم)

R_C = مقاومت اکتیو در دمای Θ_C (سرد)

* 234.5 مطابق استاندارد IEEE

برای سیم پیچ های آلومینیومی بایستی به جای 235 (234.5) از عدد 225 استفاده گردد .



R_W = دمای متوسط سیم پیچ در لحظة قطع تغذیة AC

R'_W = مقدار مقاومت ، مربوط به دمای متوسط روغن در نزدیکی سیم پیچ

شکل ۱۱- ۶ : برون یابی منحنی مقاومت/ زمان در مختصّات خطی

بدلیل اینکه دمای روغن در طی ۱ ساعت تغذیه با جریان نامی پایین می آید ، دمای سیم پیچ محاسبه شده از فرمول بالا بایستی تصحیح گردد ، شکل ۱۱- ۵ را ببینید .

ابتدا اختلاف دمای روغن و سیم پیچ (g) در حال تغذیه با جریان نامی I_r تعیین می شود :

$$g = \Theta'_{Cu} - \Theta_{oil-av(Ir)}$$

و نتیجه به جهش حرارتی متوسط روغن $\Theta_{oil-av(Ptot)}$ اندازه گیری شده در مرحلهٔ اول هنگام اعمال تلفات کل افزوده می شود .

$$\Delta\Theta_{Cu} = \Theta_{oil-av(Ptot)} + g$$

جهش حرارتی متوسط سیم پیچ $\Delta\Theta_{Cu}$ بدست آمده از این راه برابر جهش حرارتی واقعی است . برای توضیح بیشتر بند ۸ ضمیمهٔ ۱۱ را ببینید .

اگر مقدار تعیین شدهٔ جریان را نتوان در طول تست برقرار کرد ، لازم است نتایج با رابطهٔ زیر تصحیح گردند :

$$g_r = g_M \left(\frac{I_r}{I_t}\right)^y$$

که در آن :

I_r = جریان نامی

I_t = جریان تست

g_r = اختلاف دمای روغن و سیم پیچ در جریان نامی

g_M = اختلاف دمای اندازه گیری شدهٔ روغن و سیم پیچ در جریان تست

y = نما [2] ، [51]

۱/۶ برای خنک کنندگی ON و OF

۲/۰ برای خنک کنندگی OD

این معادله در محدودهٔ ±۱۰ % مقدار جریان تعیین شده معتبر است [2] ، [51] .

اگر استفاده از روش مقاومتی برای بدست آوردن جهش حرارتی سیم پیچ ممکن نباشد ، (برای مثال در سیم پیچ های با مقاومت خیلی پایین) ، روش های دیگری را می توان بکار برد .

در اندازه گیری مقاومت LV ترانسفورماتورهای بزرگ یکسوساز یا کوره برای مثال ممکن است از سنسورهای فیبر نوری کار گذاشته شده داخل ترانسفورماتور استفاده کرد .

۱۱- ۷ دمای نقطهٔ داغ (hot spot)

۱۱- ۷- ۱ نقطهٔ داغ سیم پیچ [2] ، [11]

چنانکه در بخش ۱۱- ۵- ۱ ذکر شد ، دمای سیم پیچ در بالاترین نقطهٔ آن برابر دمای نقطهٔ داغ سیم پیچ نیست . نقطهٔ داغ در اثر تلفات پراکندگی ناشی از مولفهٔ افقی شار پراکندگی ایجاد می شود . بدلیل این رفتار غیر خطی ، اختلاف دمای روغن و سیم پیچ (g) در بالاترین نقطهٔ سیم پیچ به ضریب H ضرب می شود .

این ضریب H بسته به بزرگی ترانسفورماتور ، امپدانس اتّصال کوتاه و طرح سیم پیچ ممکن است بین ۱/۱ تا ۱/۵ تغییر کند .

$$\Delta\Theta_{Hot-spot} = \Delta\Theta_{oil-\max} + g \cdot H$$

که در آن :

H = ۱/۱ برای ترانسفورماتورهای توزیع و

۱/۳ برای ترانسفورماتورهای قدرت متوسط و بزرگ

IEC 60076-2 [2] مستقیماً مقادیر مجاز دمای نقطهٔ داغ را تعیین نمی کند ، گر چه IEC 60354 [11] در مورد راهنمای بارگیری بر اساس نقطهٔ داغی با جهش حرارتی ۷۸ °K تدوین شده است . دمای مجاز نقطهٔ داغ مطابق IEEE Std C57.12.00 [50]، ۸۰ °C تعریف شده است .

۱۱- ۷- ۲ نقاط داغ خارجی

بویژه در ترانسفورماتورهای قدرت بزرگ یا پرجریان (ترانسفورماتورهای یکسوساز یا کوره) لازم است وجود نقاط داغ موضعی احتمالی کنترل گردد . این مورد بویژه در قسمت هایی از ترانسفورماتور که در معرض میدان های پراکندگی قوی هستند و یا در نزدیکی بوشینگ جریان بالا قرار دارند اهمیت دارد . این عمل معمولاً با استفاده از دوربین مادون قرمز انجام می شود [2] .

۱۱- ۸ مثال های واقعی و تحلیل مقادیر اندازه گیری شده

مثال هایی از یک ترانسفورماتور دو سیم پیچه ، یک ترانسفورماتور چند سیم پیچه (ترانسفورماتور سه سیم پیچه) و ترکیبی از ترانسفورماتورهای اصلی و تنظیم ولتاژ در بند ۹ ضمیمهٔ ۱۱ ارائه شده است .

۱۱- ۹ عدم قطعیت اندازه گیری

خطای اندازه گیری دمای سیم پیچ ممکن است مجموعه ای از خطاها در انجام موارد زیر باشد :

- اندازه گیری دمای متوسط روغن و دمای بالای روغن
- اندازه گیری دمای هوای محیط (برای مثال تشعشع از ترانسفورماتور) یا دمای آب
- اندازه گیری مقاومت و غیره

برای مثال ۰/۰۵ درصد خطا در اندازه گیری مقدار مقاومت گرم به روش برون یابی (که برای این روش تست نسبتاً خطای کمی می باشد) موجب عدم قطعیت اندازه گیری ۱/۵ K ± (در دمای سیم پیچ ۷۰ °C) می شود .

احتمال خطای کل اندازه گیری K (۲ تا ۳) ± بایستی در نظر گرفته شود .

ضمیمة ۱۱ :

تست حرارتی

ضمیمة ۱۱- ۱ تعاریف دما و جهش حرارتی

ضمیمة ۱۱- ۱- ۱ دما و عمر مورد نظر

سلولز ، پایه ای برای اکثر مواد عایقی بکار رفته در ترانسفورماتور (کاغذ ، مقوای عایقی و غیره) است . میزان پیری یا تجزیة مواد عایقی با بالا رفتن دما افزایش پیدا می کند . حتّی در دمای ۱۰۰ °C نیز میزان تجزیه قابل توجه است . برای طول عمری معقول دمای مجاز قابل توصیه ۱۰۰ °C یا اندکی بیشتر است .

مطابق قانون مونت سینگر (Montsinger) که روش های بارگیری مختلفی بر اساس آن تدوین شده اند ، میزان پیری در محدودة ۸۰ تا ۱۴۰ °C با هر افزایش ۶ K در مقدار جهش حرارتی دو برابر می شود [11] .

در نتیجة این پیری ، استانداردها ([50]،[2]) نه تنها حداکثر مقادیر مجاز دما را برای سیم پیچ و روغن معین کرده اند بلکه مقرراتی را در مورد اضافه بار و تأثیر آن بر عمر مفید (کاهش عمر) وضع کرده اند [11] ، [52] .

ضمیمة ۱۱- ۱- ۲ جهش حرارتی

دما معیاری کمیتی در مورد انرژی حرارتی درون یک جسم می باشد ؛ هر چه انرژی حرارتی بیشتر باشد دما نیز بیشتر خواهد بود . دما با واحد کلوین سنجیده می شود که نماد آن K است .

در گذشته چند مقیاس دما نیز کاربرد داشت ؛ برای مثال درجة سلسیوس که نماد آن °C است و درجة فارنهایت با نماد °F . طبق تعریف ۲۷۳/۱۵ K برابر صفر درجة سانتیگراد است و هر میزان اختلاف دما بر حسب °C برابر همان اختلاف بر حسب K است .

طبق تعریف جهش حرارتی عبارت است از اختلاف دمای بین دمای یک جسم با دمای محیط خنک کنندة آن (برای مثال : روغن ، هوا یا آب) .

در این کتاب ما از درجة سلسیوس برای بیان دمای مطلق و کلوین برای بیان اختلاف دما استفاده می کنیم . IEEE هم برای دمای مطلق و هم برای اختلاف دما از درجة سلسیوس استفاده می کند . نمادهای دما عبارتند از :

- دمای مطلق : Θ یا T
- اختلاف دما : $\Delta\Theta$ یا ΔT

POWEREN.IR

مثال :

مطابق IEC [2] ، ماکزیمم دمای مجاز محیط ۴۰ °C و جهش حرارتی متناسب با آن برای سیم پیچ ۶۵ K است .

دمای متوسط سیم پیچ بنابراین : ۱۰۵ °C = ۴۰+ ۶۵ است .

ضمیمة ۱۱- ۲ سایر روش ها برای تست حرارتی

ضمیمة ۱۱- ۲- ۱ روش " پشت به پشت "

برای انجام این تست لازم است دو ترانسفورماتور مشابه موجود باشد ، شکل ۱۱- ۷ را ببینید . اولی ترانسفورماتور مورد آزمایش و دومی موازی با آن و تحریک شده با ولتاژ نامی ترانسفورماتور اول . با تغییر نسبت ولتاژ و یا تزریق ولتاژ خارجی جریان نامی در ترانسفورماتور مورد آزمایش برقرار می شود [2] ، [15] .

بنابراین هستة آهنی ترانسفورماتور مورد آزمایش مشابه حالت بهره برداری عادی تحریک شده و چگالی شار در آن برابر مقدار نامی می شود . دلیل اینکه استفاده از این روش در ترانسفورماتورهای خشک طبق استاندارد متداول است نیز همین است [15] .

ژنراتور باید بتواند جمع تلفات کل $P_L + P_0$ دو ترانسفورماتور را به همراه توان رئاکتیو لازم برای برقرار کردن دو ترانسفورماتور تأمین نماید .

جریان I قابل دستیابی ، بر حسب درصدی از جریان نامی I_N ترانسفورماتور مورد آزمایش با استفاده از فرمول زیر محاسبه می شود :

$$I = 100 \cdot \frac{\Delta U}{\left(u_{TT} + u_T \frac{S_{TT}}{S_T} \right)}$$

که در آن :

ΔU = اختلاف نسبی ولتاژهای بی باری دو ترانسفورماتور

ΔU = $(1 - U_{TT} / U_T)$ بر حسب p.u.

U_{TT} = ولتاژ نامی (بی باری) ترانسفورماتور مورد آزمایش TT

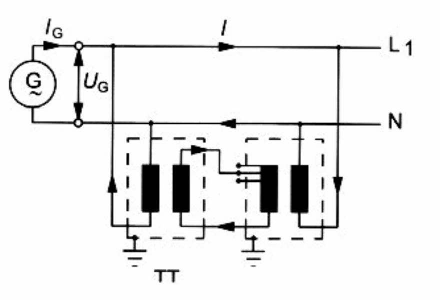
U_T = ولتاژ نامی (بی باری) ترانسفورماتور T

u_{TT} = امپدانس اتّصال کوتاه ترانسفورماتور مورد آزمایش TT

u_T = امپدانس اتّصال کوتاه ترانسفورماتور T

S_{TT} = توان نامی ترانسفورماتور مورد آزمایش TT

S_T = توان نامی ترانسفورماتور T



I_G = جریان تغذیه

U_G = ولتاژ تغذیه

I = جریان نامی ترانسفورماتور مورد آزمایش

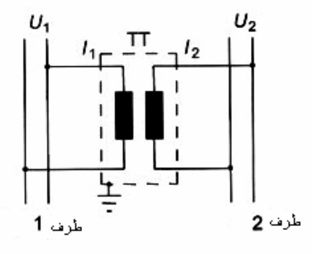
TT = ترانسفورماتور مورد آزمایش

T = ترانسفورماتور مشابه TT

شکل ۱۱- ۷ : مدار و اتّصالات برای تست حرارتی به روش " پشت به پشت "

ضمیمة ۱۱- ۲- ۲ تست حرارتی در حال بهره برداری

این روش (بویژه برای ترانسفورماتورهای قدرت بزرگ) توصیه نمی شود ؛ زیرا تغییرات ولتاژ و بار در طی تست ممکن است نتایج اندازه گیری را تحت تأثیر قرار دهد . بعلاوه اندازه گیری مقاومت برای تعیین دمای سیم پیچ نسبتاً پیچیده است . شکل ۱۱- ۸ مدار سادة اندازه گیری را برای تست حرارتی در حال بهره برداری نشان می دهد .



U_1,U_2 = ولتاژ طرف ۱ و ۲

I_1,I_2 = جریان طرف ۱ و ۲

شکل ۱۱- ۸: مدار اندازه گیری تست حرارتی در حال بهره برداری

ضمیمة ۱۱- ۳ تخمین مدت زمان تست حرارتی [2]

محاسبة ثابت زمانی حرارتی ترانسفورماتور مورد آزمایش

IEC 60076-2 ، بند C1 فرمول محاسبة ثابت زمانی حرارتی τ_0 ترانسفورماتور را بر حسب اطلاعاتی که معمولاً از روی پلاک ترانسفورماتور قابل استخراج است ارائه می کند :

$$\tau_0 = \frac{5m_T + 15m_0}{P_{tot}} \cdot (\frac{\Delta\Theta_{oil-\max}}{60})$$

که در آن :

τ_0 = ثابت زمانی حرارتی ترانسفورماتور بر حسب ساعت

m_T = وزن کل ترانسفورماتور بدون روغن بر حسب تن

m_0 = وزن کل روغن منهای روغن منبع انبساط بر حسب تن

P_{tot} = تلفات کل ترانسفورماتور بر حسب kW

$\Delta\Theta_{oil-max}$ = ماکزیمم جهش حرارتی بالای روغن تخمینی ، معمولاً مقداری کمتر از ۶۰ K

مثال :

برای یک ترانسفورماتور ۲۰ MVA ONAN :

m_T = 32 t ، m_0 = 7 t

P_{tot} = 110kW ، $\Delta\Theta_{oil-max}$ = 54 K

$$\tau_0 = \frac{5{,}32 + 15{,}7}{110} \cdot \left(\frac{54}{60}\right) = 2.2 \text{ h}$$

ثابت زمانی حرارتی معمولاً در حدود ۱ تا ۵ ساعت است . برای ترانسفورماتورهای بزرگ و کمپکت با خنک کاری مصنوعی این ثابت زمانی کوتاهتر و برای ترانسفورماتورهای با خنک کاری طبیعی طولانی تر است .

زمان لازم برای رسیدن به ماکزیمم جهش حرارتی روغن ترانسفورماتور حدود چهار برابر ثابت زمانی حرارتی τ_0 است ؛ بنابراین زمان کل تست حرارتی حدود چهار برابر τ_0 بعلاوة ۱ ساعت است .

ضـــمیمة ۱۱- ۴ بـــرون یـــابی از روی منحنـــی بـــرای ماکزیمم جهش حرارتی [2]

ضـمیمة ۱۱- ۵ انـدازه گیـری دمـای روغـن بـا سـنجش دمای سطح بدنه [51]

روش ارجح برای اندازه گیری دمای سطح استفاده از ترموکوپل است . چون لحـیم کـاری مستقیم ترموکوپل بر روی بدنه ممکن نیست معمولاً آن را به یک صفحة فلزی نازک یـا یک فویل با ابعاد ۲۵ mm² * ۲۵ (۱ in²) لحیم می کنند . ایـن صـفحه بایـد کامـل و محکم به سطح مخزن بچسبد و ترجیحاً رنگ زیر آن تراشیده شود . همچنین لازم اسـت سطح دیگر ترموکوپل کاملاً نسبت به محیط از نظر حرارتی ایزوله گردد .

ضـمیمة ۱۱- ۶ اصـلاح لازم در صـورت تزریـق جریـان بـا فرکانسی غیر از فرکانس نامی

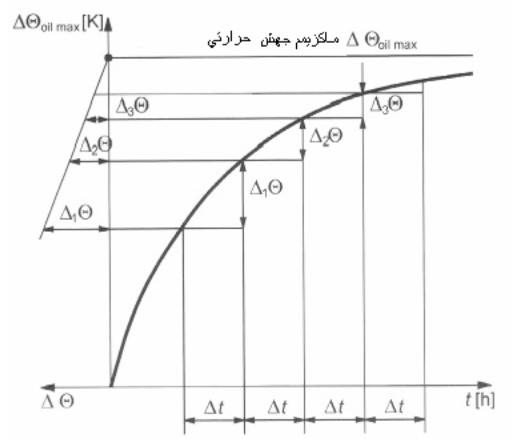
اگر تزریق جریان با فرکانس نامی ممکن نباشد لازم است جریـان بـا رابطـة زیـر اصـلاح گردد :

$$I_{fM} = I_{fr}\sqrt{\frac{P_j + P_a\left(\frac{f_r}{f_M}\right)^2}{P_j + P_a}}$$

که در آن :

I_{fM} = جریان تزریقی برای تست حرارتی انجام شده با فرکانس f_M
I_{fr} = جریان نامی
f_r = فرکانس نامی
f_M = فرکانس هنگام اندازه گیری
P_j = تلفات اهمی I^2R (بخش ۵ را ببینید)
P_a = تلفات گردابی (بخش ۵ را ببینید)

برای یک ترانسفورماتور ۶۰ Hz تست شده در ۵۰ Hz و با نسبت عـادی P_a / P_j لازم است جریان تزریقی در حدود ۴- ۳ % افزایش یابد تا تلفات واقعی ۶۰ Hz را شبیه سـازی کند .



Δt = فاصلة زمانی بین قرائت ها
$\Delta\Theta_{1,2,3}$ = سه قرائت پشت سر هم جهش حرارتی

شکل ۱۱- ۹ : بـرون یـابی مـاکزیمم جهـش حرارتـی توسط منحنی جهش های حرارتی

ضمیمة ۱۱- ۷ ضرایب تصحیح مطابق [51] IEEE Std C57.12.90

ضمیمة ۱۱- ۷- ۱ تلفات ویژة سیم پیچ > ۱۵ W/kg ، و > ۶۶ W/kg

در صورت عدم تجاوز تلفات بار سیم پیچ از ۶۶ W/kg (۳۰ W/lb) برای مس و یا ۱۳۲ W/kg (۶۰ W/lb) برای آلومینیوم لازم است از ضرایب تصحیح به دنبال آمده استفاده شود . توجه کنید که تلفات (I^2R + گردابی) هر سیم پیچ بایستی در جهش حرارتی نامی سیم پیچ (۶۵ K) بعلاوة ۲۰ °C (یعنی ۸۵ °C) بر وزن همان سیم پیچ تقسیم شود .

برای بدست آوردن دما در لحظة قطع تغذیة AC لازم است عددی بر حسب درجة کلوین به اولین دمای قرائت شده افزوده شود . این عدد برابر است با حاصل ضرب ضریب تصحیح بدست آمده از جدول در تلفات ویژه بر حسب W/kg .

برای سیم های مسی ضرایب تصحیح عبارتند از :

ضریب تصحیح	زمان پس از قطع تغذیة AC
۰/۰۹	۱
۰/۱۲	۱/۵
۰/۱۵	۲
۰/۲۰	۳
۰/۲۳	۴

مثال :

برای سیم پیچی با تلفات ۲۵ W/kg در دمای ۸۵ °C که اولین قرائت دما پس از ۱/۵ دقیقه نشان دهندة جهش حرارتی ۶۱ K برای آن است ، ضریب تصحیح ۰/۱۲ است (جدول را ببینید) .

تصحیح : ۲۵ * ۰/۱۲ = ۳ K

جهش حرارتی سیم پیچ در لحظة قطع تغذیه عبارت است از :

۶۱ + ۳ = ۶۴ K

ضمیمة ۱۱- ۷- ۲ تلفات ویژه > ۱۵ W/kg

بایستی تصحیح [دقیقه/ K] ۱ انجام شود .

ضمیمة ۱۱- ۸ تطابق جهش حرارتی متوسط اندازه گیری شدة سیم پیچ با جهش حرارتی واقعی در طی بهره برداری

$$\Delta\Theta_{Cu} = \Theta_{oil-av(Ptot)} + g$$

جهش حرارتی متوسط $\Delta\Theta_{Cu}$ ، محاسبه شده بدین روش کاملاً بر جهش حرارتی واقعی منطبق است زیرا :

- دمای روغن ، مستقیماً اندازه گیری شده است . این دما به نوع تغذیة ترانسفورماتور که تلفات به صورت موضعی درون آن اتّفاق می افتد وابسته نیست چون :
- در طی بهره برداری : تلفات بی باری P_0 در هستة آهنی و تلفات بار در سیم پیچ ها و مخزن وجود دارد .
- در طی تست : تلفات هسته وجود ندارد ، اما مجموع P_0 و P_L در سیم پیچ ها و مخزن تلف می شود .
- اختلاف دمای روغن و سیم پیچ (g) در I_r بدست آمده است (میزان جریان معادل با زمان بهره برداری)

بنابراین جمع جهش حرارتی متوسط روغن هنگام تزریق تلفات کل $\Theta_{oil-av(Ptot)}$ بعلاوة اختلاف دمای g ، جهش حرارتی درست سیم پیچ $\Delta\Theta_{Cu}$ را بدست می دهد .

ضـــــــميمة ۱۱- ۹ مثـــــــال هـــــــاي واقعـــــــی و تحلیل مقادیر اندازه گیری شده

ضمیمة ۱۱- ۹- ۱ مثال ۱ : ترانسفورماتور دو سیم پیچه

برون یابی ترسیمی برای یافتن مقاومت سیم پیچ .

برای ترانسفورماتور سه فاز با مقادیر نامی :

۷۵ MVA

۶۶ kV / ۱/۶۵ * ۸ ± ۱۳۲ ؛ YNd11 ، خنک شوندگی ONAN با بانک رادیاتور مجزا؛ ε_{cc} = ۹/۴ % با

P_0 = ۵۳/۵ kW ، P_L = ۲۵۶/۵ kW (در تپ ۶۶ kV/ ۱۱۸)

توان لازم :

$$S = k^2 \cdot S_r \cdot (\frac{\varepsilon_{cc}}{100}) = 1{,}10^2 \cdot 75 \cdot (\frac{9{,}4}{100}) = 8{,}52 \ \text{MVA}$$

$$k = \sqrt{\frac{P_L + P_0}{P_L}} = \sqrt{\frac{256{,}5 + 53{,}5}{256{,}5}} = 1{,}10$$

$$I_G = k \cdot I_r = 1{,}10 \cdot 656 = 722 \ \text{A} \quad (\text{تغذیة طرف LV})$$

برای تلفات معین ، جریان لازم در شروع تست ، هنگامی کـه ترانسـفورماتور هنـوز سـرد است ، حدود ۸- ۵ % بالاتر از جریان در انتهای تست است . دلیل این امر تغییـر مقاومـت سیم پیچ در اثر دماست .

این موضوع در جدول زیر نشان داده شده است . جریان در t =0 به جای مقدار محاسـبه شـدة ۷۲۲ A ، ۷۶۴ A اسـت ؛ بـه همـان نسـبت تـوان تغذیـة S نیـز بـالاتر اسـت (۹/۵۹ MVA به جای ۸/۵۲ MVA) .

تغذیة توان از طرف LV می باشد و HV اتّصال کوتاه شده است .

اندازه گیری مقاومت سرد قبل از تست :

R_C = ۵۴۷/۸ mΩ در ۱۸/۵ °C (HV)

R_C = ۱۱۷/۹ mΩ در ۱۸/۵ °C (LV)

اندازه گیری جهش حرارتی روغن (مرحلهٔ اول تست)

تزریق تلفات کل : $P_{tot} = P_0 + P_L =$ ۵۳/۵ + ۲۵۶/۵ = ۳۱۰ kW

t h	U_g V	I_g A 1)	P_{tot} kW 2)	Θ_a °C 3)	$\Theta_{oil-max}$ °C	Θ_{KE} °C 4)	Θ_{KA} °C 4)	Θ_{oil-av} °C 5)	$\Delta\Theta_{oil-max}$ K 6)
۰	۷۲۵۰	۷۶۴	۳۱۰	۱۹/۵	۲۰/۵	۲۰/۰	۱۸/۰		۱/۰
۱	۶۹۸۰	۷۳۶	۳۱۰	۱۹/۳	۴۳/۲	۴۳/۰	۳۱/۰		۲۳/۹
۲	۶۸۹۰	۷۲۵	۳۱۰	۲۰/۳	۵۳/۷	۵۳/۵	۴۱/۲		۳۳/۴
|	|	|	|	|	|	|	|	|	|
۹	۶۸۱۰	۷۱۷	۳۱۰	۲۲/۲	۶۹/۵	۶۹/۵	۵۶/۴		۴۷/۳
۹^{۳۰}	۶۸۰۰	۷۱۷	۳۱۰	۲۲/۲	۶۹/۵	۶۹/۵	۵۶/۷		۴۷/۳
۱۰	۶۸۰۰	۷۱۶	۳۱۰	۲۲/۲	۶۹/۵	۶۹/۵	۵۷/۷	۶۳/۱	۴۷/۳

1) متوسط ۳ آمپر متر
2) مجموع ۳ وات متر
3) متوسط ۴ ترموکوپل
4) متوسط ۲ ترموکوپل

5) Θ_{oil-av} =۱/۲ $(\Theta_{oil-max} + \Theta_{KA})$
6) $\Delta\Theta_{oil-max}$ = $\Theta_{oil-max} - \Theta_a$

$\Delta\Theta_{oil-max}$ = ۴۷/۳ K (مقدار گارانتی ۶۰K)

$\Delta\Theta_{oil-av(Ptot)}$ = ۱/۲ (۶۹/۵ + ۵۶/۷) – ۲۲/۲ = ۴۰/۹ K

اندازه گیری جهش حرارتی سیم پیچ (مرحلهٔ دوم تست)

تزریق جریان نامی : $I_r = I_G$ = ۶۵۶ A

t h	U_g V	I_g A 1)	P_{tot} kW 2)	Θ_a °C 3)	$\Theta_{oil-max}$ °C	Θ_{KE} °C 4)	Θ_{KA} °C 4)	Θ_{oil-av} °C 5)	$\Delta\Theta_{oil-max}$ K 6)
۱۰^{۳۰}	۶۲۰۰	۶۵۶	۲۵۴	۲۲/۳	۶۹/۰	۶۹/۰	۵۶/۰		۴۶/۷
۱۱	۶۲۰۰	۶۵۶	۲۵۴	۲۲/۳	۶۸/۵	۶۸/۵	۵۵/۵	۶۲/۰	۴۶/۲

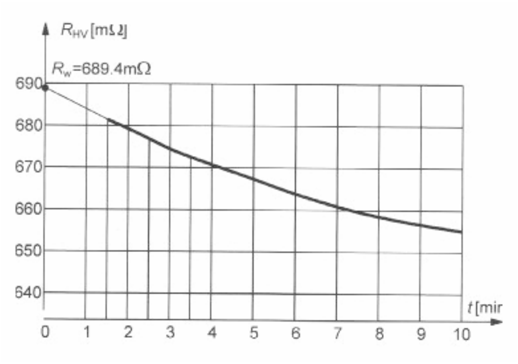
$\Theta_{oil-av(I_r)}$ = ۶۲ °C

1) متوسط ۳ آمپر متر
2) مجموع ۳ وات متر
3) متوسط ۴ ترموکوپل
4) متوسط دو ترموکوپل
5) Θ_{oil-av} = ۱/۲ $(\Theta_{oil-max} + \Theta_{KA})$
6) $\Delta\Theta_{oil-max}$ = $\Theta_{oil-max} - \Theta_a$

پـس از یـک سـاعت بهـره بـرداری در جریـان نـامی ، انـدازه گیـری مقاومـت بـرای هر دو سیم پیچ انجام می شود :

مثال : سیم پیچ HV

R_{HV} [mΩ]	t [دقیقه]
۶۸۱/۳	۱۳۰
۶۷۹	۲
۶۷۷	۲۳۰
۶۷۴/۳	۳
۶۷۴	۳۳۰
۶۷۱/۵	۴
۶۶۸/۱	۵
۶۶۴/۲	۶
۶۵۸/۶	۸
۶۵۵/۲	۱۰



شکل ۱۱- ۱۰ : برون یابی منحنی مقاومت / زمان برای سیم پیچ HV ترانسفورماتور ۷۵ MVA

برون یابی تابع مقاومت/ زمان در شکل ۱۱- ۱۰ نشان داده شده است .

مقدار مقاومت بدست آمده از برون یابی ۶۸۹/۴ mΩ است .

با مقاومت سرد اندازه گیری شده :

R_C = ۵۴۷/۵ mΩ در ۱۸/۵ °C

$$\Theta'_{CuHV} = \frac{689,6}{547,5}(235+18,5)-235 = 84,3 \ °C$$

$$g_{HV} = \Theta_{Cu} - \Theta_{oil-av(I_r)} = 84,3-22,3 \ K$$

بنابراین جهش حرارتی سیم پیچ HV عبارت است از :

$$\Delta\Theta_{CuHV} = g_{HV} + \Delta\Theta_{oil-av(Ptot)} = 22,3+40,9 = 63,2 \ K$$

(مقدار گارانتی = ۶۵ K)

بطور مشابه برای سیم پیچ LV :

R_w = ۱۴۸/۴ mΩ

R_C = ۱۱۷/۹ mΩ در ۱۸ °C

$$\Theta_{CuLV} = \frac{148,4}{117,9}(235+18,5)-235 = 84,1 \ °C$$

$$g_{LV} = \Theta'_{CuLV} - \Theta_{oil-av(I_r)} = 84,1-62 = 22,1 \ K$$

$$\Delta\Theta_{CuLV} = g_{LV} + \Theta_{oil-av(P_{tot})} = 22,1+40,9 = 63 \ K$$

(مقدار گارانتی ۶۵ K)

ضمیمة ۱۱-۹-۲ مثال ۲ : ترانسفورماتور نیروگـاهی دو سیم پیچه

توان نامی ۵۰۰ MVA با خنک کنندگی ODWF ، اندازه گیری مقاومت با سیستم جمع آوری داده و برون یابی به کمک کامپیوتر.

تغذیة AC از طرف HV انجام و طرف LV اتّصال کوتاه شده است .

اندازه گیری مقاومت سرد قبل از تست

R_C = ۶۸۰/۳ mΩ در ۲۱/۷ °C (HV)

R_C = ۰/۸۸۱۴ mΩ در ۲۱/۷ °C (LV)

اندازه گیری جهش حرارتی روغن (اولین مرحلة تست)

تزریق تلفات کل :

$P_{tot} = P_0 + P_L$ = ۱۵۷ +۱۱۹۸ =۱۳۵۵ kW

در حالت پایدار پس از حدود ۵ ساعت :

$\Theta_{آب}$ = ۹/۵ °C (ورودی سیستم خنک کننده)

$\Theta_{oil-max}$ = ۵۱/۳ °C

$\Delta\Theta_{oil-max}$ = ۵۱/۳ - ۹/۵ = ۴۱/۸ K (مقدار گارانتی ۶۰ K)

$\Theta_{oil-av(P_{tot})}$ = ۱ /۲ (۵۱/۳ + ۴۱/۸) = ۴۶/۶ °C

$\Delta\Theta_{oil-av}$ = ۴۶/۶ - ۹/۵ = ۳۷/۱ K

اندازه گیری دمای سیم پیچ (مرحلة دوم)

تزریق جریان نامی :

I_r = ۷۰۴ A

پس از یک ساعت بهره برداری در جریان نامی ، دماهای زیر ثبت شده است :

$\Theta_{آب}$ = ۹/۵ °C (ورودی سیستم خنک کننده)

$\Theta_{oil-max}$ = ۵۰/۴ °C

$\Delta\Theta_{oil-max}$ = ۵۰/۴ - ۹/۵ = ۴۰/۹ K (مقدار گارانتی ۶۰ K)

$\Theta_{oil-av(I_r)}$ = ۱ /۲ (۵۰/۴ + ۴۱) = ۴۵/۷ °C

$\Delta\Theta_{oil-av}$ = ۴۵/۷ - ۹/۵ = ۳۶/۲ K

اندازه گیری مقاومت با استفاده از سیستم جمع آوری داده (پاور آنالایزر)

(مثال سیم پیچ HV : 1U -1V) :

t [دقیقه]	R_{HV} [mΩ]
۲	۸۰۵/۷۱۰
۳	۷۹۸/۹۹۰
۴	۷۹۳/۵۰۰
۵	۷۸۸/۸۰۰
۶	۷۸۴/۷۲۰
۷	۷۸۱/۰۷۰
۸	۷۷۷/۸۹۰
۹	۷۷۵/۰۶۰
۱۰	۷۷۲/۵۰۰
۱۱	۷۷۰/۲۴۰
۱۲	۷۶۸/۲۸۰
۱۳	۷۶۶/۴۵۰
۱۴	۷۶۴/۷۷۰
۱۵	۷۶۳/۳۳۰
۱۶	۷۶۲/۰۱۰
۱۷	۷۶۰/۸۴۰
۱۸	۷۵۹/۷۸۰
۱۹	۷۵۸/۸۱۰
۲۰	۷۵۷/۹۵۰

برون یابی داده های مقاومت - زمان به کمک کامپیوتر ، شکل ۱۱- ۱۱ را ببینید .

مقدار مقاومت بدست بدست آمده از برون یابی ۸۲۱/۴۷۹ mΩ است .

با مقاومت سرد اندازه گیری شدة R_C = ۶۸۰/۳ mΩ در دمای ۲۱/۷ °C :

$$\Theta'_{CuHV} = \frac{821,479}{680,3}(235+21,7)-235 = 75,0 \quad °C$$

$$g_{HV} = \Theta'_{Cu} - \Theta_{oil-av(I_r)} = 75,0-45,7 = 29,3\ K$$

بنابراین جهش حرارتی تصحیح شدة سیم پیچ HV عبارت است از :

$$\Delta\Theta_{CuHV} = g_{HV} + \Delta\Theta_{oil-av(P_{tot})} = 29,3+37,1 = 66,4\ k$$

(مقدار گارانتی ۷۰ K)

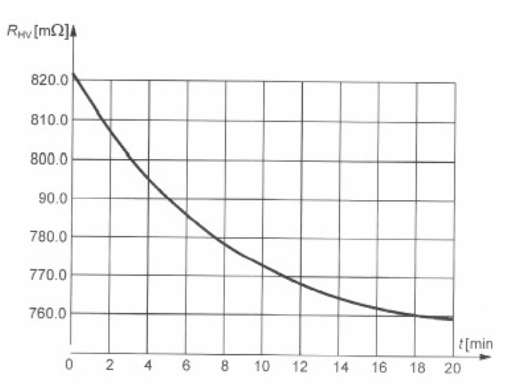
آنالیز گازهای محلول در روغن قبل و بعد از تست حرارتی

گازهای محلول	مقدار نمونه [ppm]	قبل از تست [ppm]	پس از تست [ppm]
H_2	۱۵	۳/۲	۳/۳
CH_4	۵	۰/۴	۰/۴
C_2H_6	۵	۰/۱	۰/۱
C_2H_4	۲	۰/۲	۰/۲
C_2H_2	۱	۰/۲	۰/۱
CO	۸۰	۱۹	۲۷
CO_2	۲۰۰	۵۶	۴۶

*مطابق IEC 61181 [34]

نتیجه :

مقادیر اندازه گیری شده پس از تست حرارتی مطابق IEC 61181 [34] نشان دهندة عیب نیستند .



شکل ۱۱-۱۱ : برون یابی داده های مقاومت / زمان با استفاده از برنامة کامپیوتری برای سیم پیچ HV ترانسفورماتور MVA ۵۰۰

ضمیمة ۱۱-۹- ۳ مثال ۳ :

ترانسفورماتور چند سیم پیچه
(ترانسفورماتور سه سیم پیچه)

برای یک ترانسفورماتور سه فاز با مقادیر نامی

۱۴۶/۵ /۱۴۶/۵ /۴۰ MVA ، ۵۰ Hz

۲۵۰ ± (۱۲ * ۳/۳) / ۱۶۵ / ۲۲/۴ kV ؛ YNyn0d5

؛ OFAF خنک کنندگی ، P_0 =۱۱۰/۵ kW

اندازه گیری جهش حرارتی روغن (مرحلة اول)

تلفاتی که باید تزریق شود :

$$P_{total} = P_0 + P_{L(146,5/146,5/40MVA)}$$

برای تعیین تلفات در ۱۴۶/۵ /۱۴۶/۵ /۴۰ MVA بخش ۵ را ببینید .

P_{L12} = ۴۱۹ kW
P_{L13} = ۱۰۶۵ kW
P_{L23} = ۷۸۱ kW
(مبنا ۱۴۶/۵ MVA)

P_{L1} = ۱/۲ (۴۱۹+۱۰۶۵ -۷۸۱) = ۳۵۱/۵ kW

P_{L2} = ۱/۲ (۴۱۹+۷۸۱ -۱۰۶۵) = ۶۷/۵ kW

P_{L3} = ۱/۲ (۱۰۶۵ +۷۸۱ -۴۱۹) = ۷۱۳/۵ kW

$P_{L(146,5/146,5/40MVA)} = P_{L1} + P_{L2} +$ (۴۰/۱۴۶/۵)۲* P_{L3}

= ۳۵۱/۵ + ۶۷/۵ + (۴۰/۱۴۶/۵)۲*۷۱۳/۵

= ۴۷۲/۲ kW

منبع تغذیه به ترمینال های MV وصل است (۱۶۵ kV) ،

HV اتّصال کوتاه و LV باز است .

پس از رسیدن به پایداری ، بعد از حدود ۸ ساعت :

Θ_a =۲۷/۰ °C

$\Theta_{oil-max}$ = ۶۸/۰°C

$\Delta\Theta_{oil-max}$ = ۶۸/۰ -۲۷/۰ =۴۱K (مقدار گارانتی ۶۰K)

$\Theta_{oil-av(P_{tot})}$ =۱/۲ (۶۸/۰ + ۶۱/۵) = ۶۴/۸ °C

$\Delta\Theta_{oil-av(P_{tot})}$ = ۶۴/۸ - ۲۷/۰ = ۳۷/۸ K

اندازه گیری دمای سیم پیچ **MV** و **HV** (مرحلة دوم)

تزریق جریان نامی به سیم پیچ MV :

I_r = ۵۱۳ A

پس از یک ساعت بهره برداری در جریان نامی ، دماهای زیر ثبت شد :

Θ_a = ۲۶/۳ °C

$\Theta_{oil-max}$ = ۶۴/۵ °C

$\Delta\Theta_{oil-max}$ = ۶۴/۵ – ۲۶/۳ =۳۸/۲ K

$\Theta_{oil-av(In)}$ = ۱/۲ (۶۴/۵ + ۵۸) =۶۱/۳ °C

$\Delta\Theta_{oil-av(Ir)}$ = ۶۱/۳ – ۲۶/۳ = ۳۵ K

برای اندازه گیری مقاومت (برای مثال HV) ، برون یابی مثل قبل است ؛ دمای محاسبه شدهٔ سیم پیچ Θ'_{CuHV} = ۸۶/۹ °C

R_C = (۳۴۱/۵ mΩ در ۲۱ °C)

g_{HV} = ۸۶/۹ -۶۱/۳ = ۲۵/۶ K

$\Delta\Theta_{CuHV}$ = $g + \Theta_{oil-av(Ptot)}$ = ۲۵/۶ + ۳۷/۸ = ۶۳/۴ K

اندازه گیری مقاومت MV به همان روش انجام می شود ؛

اندازه گیری دمای سیم پیچ LV (مرحلهٔ سوم)

جریان نامی (با مبنای ۴۰ MVA) به ترمینال های MV تزریق مـی شـود ، LV اتّصـال کوتاه و HV باز است :

$I_{r(40MVA)}$ = ۵۱۳ * (۴۰ / ۱۴۶/۵) = ۱۴۰ A

پس از دو ساعت بهره برداری در ۱۴۰ A ، دماهای زیر ثبت شد :

Θ_a = ۲۲/۳ °C

$\Theta_{oil-\max}$ = ۴۹ °C

$\Delta\Theta_{oil-max}$ = ۴۹ – ۲۲/۳ = ۲۶/۷K

$\Theta_{oil-av(Ir)}$ = ۱/۲ (۴۹ + ۴۵) = ۴۷ °C

$\Delta\Theta_{oil-av(Ir)}$ = ۴۷ -۲۲/۳ = ۲۴/۷ K

برای اندازه گیری مقاومت LV ، برون یابی مثل قبل است (R_W = ۲۰/۲۴ mΩ) ؛ بـا محاسبهٔ دمای سیم پیچ :

Θ'_{CuLV} = ۶۶/۱ °C (R_C = ۱۷/۲۱ mΩ در ۲۱ °C)

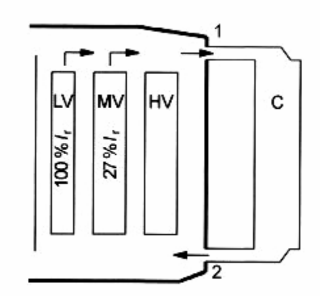
g_{LV} = ۶۶/۱ – ۴۷ =۱۹/۱ K

$\Delta\Theta_{CuLV}$ = $g + \Theta_{oil-av(P_{tot})}$ = ۱۹/۱ + ۳۷/۸ = ۵۶/۹ K

کنترل اختلاف دمای g_{LV} توصیه می شود ، چون دمای متوسـط روغـن $\Theta_{oil-av(I_r)}$ اندازه گیری شده پس از ۲ ساعت اعمال جریان نامی برابر دمای متوسط روغـن چسـبیده به سیم پیچ LV نیست ، شکل ۱۱- ۱۲ را ببینید .

دمایی که از محل ورود و خروج روغن سنجیده می شود ناشی از گرمایش ترکیبی روغـن توسط بارگیری ۱۰۰% از سیم پیچ LV و بارگیری ۲۷% از سیم پیچ MV اسـت ؛ بنـابراین دمای متوسط بدست آمده با دمای واقعی متوسط روغن در نزدیکی سیم پـیچ LV تفـاوت دارد .

استاندارد IEC [2] روش دیگری را برای بدست آوردن دمای واقعی متوسط روغن نزدیک به سیم پیچ LV مبنی بر دمای برون یابی شدهٔ متوسط سیم پیچ R'_W پیشنهاد می نماید . مقاومت R'_W مطابق شکل ۱۱- ۱۳ تعیین می شود .

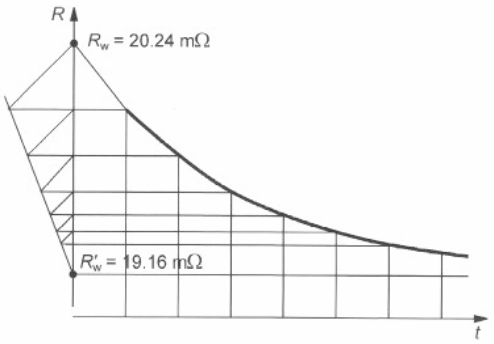


1 = ورود روغن

2 = خروج روغن

C = خنک کننده

شکل ۱۱- ۱۲ : وضعیت خنک کاری ترانسفورماتور سه سیم پیچه در طی تست حرارتی (اندازه گیری جهش حرارتی سیم پیچ)



شکل ۱۱- ۱۳ : برون یابی منحنی مقاومت/ زمان و تعیین R'_W برای سیم پیچ LV ترانسفورماتور سه سیم پیچه

R'_W = ۱۹/۱۶ mΩ

$\Theta_{oil} = \frac{19/16}{17/21}$(۲۳۵ + ۲۱) -۲۳۵ = ۵۰/۰°C

(به جای رقم ۱۹/۱ تعیین شده به روش قبل) g_{LV} = ۶۶/۱ -۵۰ =۱۶/۱K

هر دو اختلاف دمای g_{LV} محاسبه شده با دو روش نسبتاً درست به نظر می رسند . در صورت تردید ، ترجیحاً لازم است اختلاف دمای g بدست آمده به کمک R'_W مورد استفاده قرار گیرد .

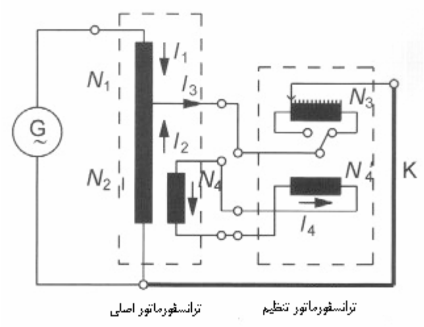
بدین ترتیب جهش حرارتی سیم پیچ عبارت خواهد بود از :

$\Delta\Theta_{CuLV} = g + \Theta_{oil-av(Ptot)} =$ ۱۶/۱ (۱۹/۱) + ۳۷/۸ = ۵۳/۹ (۵۶/۹) K

ضمیمه ۱۱- ۹- ۴ مثال ۴ : ترانسفورماتور متشکّل از بخش های اصلی و تنظیم ولتاژ

نمودار اتّصالات مطابق شکل ۱۱- ۱۴ می باشد .

$$I_4 = I_1 \frac{N_3}{N_4}$$



K = کابل اتصال کوتاه

$I_{1,2,3,4}$ = جریان نامی سیم پیچ ها

$N_{1,2,3,4}$ = تعداد دورهای سیم پیچ ها

$I_2 = I_3 - I_1$

$I_4 = I_3 . N_3 / N'_4$

شکل ۱۱- ۱۴ : نمودار اتصالات برای تست حرارتی ترانسفورماتور ترکیبی اصلی- تنظیم ولتاژ

اگر چه دو ترانسفورماتور متفاوت مورد آزمایش هستند ، اغلب لازم است تست حرارتی بر روی ترکیب ترانسفورماتورهای اصلی/ تنظیم ولتاژ انجام گیرد ؛ بویژه هنگامی که انجام تست در پایین ترین وضعیت تپ ترانسفورماتور تنظیم ولتاژ مورد نظر باشد .

مشکل در تعیین جهش حرارتی سیم پیچ مشترک (common) N_2 (اتو) ترانسفورماتور اصلی می باشد ، زیرا جریان نامی آن کاملاً به وضعیت کلید تنظیم ولتاژ زیر بار وابسته است . اگر تست دو ترانسفورماتور جداگانه انجام گیرد لازم است سیم پیچ HV ترانسفورماتور اصلی بیشتر از محدودة مجاز آن تحت اضافه بار قرار گیرد (بسته به بازة تنظیم ترانسفورماتور تنظیم ولتاژ) .

معمولاً تست های زیر لازم است :

الف) مجموع تلفات ترانسفورماتور اصلی (جهش حرارتی روغن ترانسفورماتور اصلی) . اگر نسبت P_L / P_0 برای ترانسفورماتور اصلی و تنظیم ولتاژ یکی باشد ، بدین ترتیب مقدار درست جهش حرارتی روغن ترانسفورماتور تنظیم ولتاژ نیز بدست می آید .

ب) مجموع تلفات ترانسفورماتور تنظیم ولتاژ (جهش حرارتی روغن ترانسفورماتور تنظیم) . ممکن است انجام این تست لازم نباشد ، بند الف را ببینید .

پ) جریان نامی ترانسفورماتور اصلی (سیم پیچ N_1 و N_2) و جریان نامی (سیم پیچ N_3 و N'_4) .

ت) جریان نامی LV (سیم پیچ N_4) ، زیرا مقادیر نامی N_4 و N'_4 معمولاً برابرند.

۱۱- تست حرارتی

تست ترانسفورماتورهای قدرت

۱۲- اندازه گیری امپدانس(های) توالی صفر در ترانسفورماتورهای قدرت

۱۲-۱ مراجع/ استانداردها

- IEC 60076-1 (2000), clause 10.7
  "Measurement of the zero-sequence impedance(s) on three-phase transformers" [1]
- IEEE Std C57.12.90-1999, clause 9.5
  Zero-phase-sequence impedance" [51]

توجه :

اندازه گیری امپدانس های توالی صفر بر اساس IEC 60076-1 [1] **تست ویژه** یا بر اساس IEEE Std.C57.12.00 [50] تست " **دیگر**" است .

۱۲- ۲ منظور از تست

برای محاسبات پیشرفتهٔ اتصال کوتاه در شبکه نه تنها مؤلفه های متقارن تجهیزات شبکه از جمله ترانسفورماتور مورد نیاز است ، بلکه لازم است مؤلفه های دیگری همچون مؤلفهٔ توالی صفر نیز معلوم باشد .

۱۲- ۳ کلیات

در هر روش محاسباتی (جریان ، ولتاژ و غیره) برای شبکهٔ سه فاز دارای بار متقارن می توان تحلیل را فقط برای یک فاز انجام داد ، زیرا برای فازهای دیگر دامنه ثابت و زاویهٔ فاز ۱۲۰ درجه شیفت دارد . این موضوع برای محاسبات اتّصال کوتاه سه فاز نیز معتبر می باشد . در یک سیستم سه فاز نامتعادل ، بعنوان مثال برای سیستمی با عیب تک فاز به زمین لازم است محاسبات برای هر فاز بطور جداگانه انجام شود ، زیرا امپدانس های فازها بر خلاف حالت متقارن نسبت به همدیگر متفاوت هستند . برای چنین محاسباتی دانش نظریهٔ مؤلفه های متقارن [106] ، [107] ،[108] و مشخصه های توالی فاز هر یک از اجزاء سیستم ضروری است .

با استفاده از روش مؤلفه های متقارن ، هر سیستم سه فاز نامتعادل به سه سیستم سه فاز متعادل زیر تبدیل می شود :

- سیستم توالی فاز مثبت (ترتیب چرخش UVW)
- سیستم توالی فاز منفی (ترتیب چرخش UWV)
- سیستم توالی فاز صفر (سه تک فاز در یک جهت)

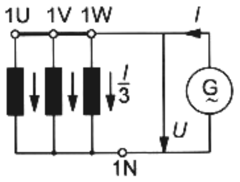
یک مثال از سیستم سه فاز نامتعادل در بند ۱ ضمیمهٔ ۱۲ ارائه شده است .

مؤلفه های متقارن ولتاژ و جریان در هر یک از سه سیستم با سه نوع امپدانس انطباق دارد : امپدانس توالی مثبت ، امپدانس توالی منفی و امپدانس توالی صفر .

برای ترانسفورماتورها امپدانس توالی مثبت Z_+ و امپدانس توالی منفی Z_- معمولاً برابر می باشد . این دو امپدانس همچنین با امپدانس اتّصال کوتاه ترانسفورماتور نیز برابر است.

اما امپدانس توالی صفر Z_0 بسته به نوع گروه برداری سیم پیچ و طراحی ترانسفورماتور (ساختار هسته) به مقدار زیادی با امپدانس توالی مثبت فرق دارد .

۱۲- ۴ تعریف امپدانس توالی صفر



شکل ۱۲- ۱ : تعریف امپدانس توالی صفر

امپدانس توالی صفر برابر است با امپدانس اندازه گیری شده بین سر فاز و نقطهٔ نوترال ، در حالیکه سه سر فاز بـه همـدیگر وصـل شـده باشـند . در ترانسـفورماتورهای سـه فـاز امپدانس توالی صفر فقط در سیم پیچ هایی که اتّصال آنها ستاره یا زیگزاگ باشـد مطـرح است . امپدانس توالی صفر هر فاز را می توان با سه برابر کردن مقدار اندازه گیـری شـدهٔ بالا بدست آورد :

$$Z_0 = 3 \cdot \frac{U_P}{I}$$

که در آن :

U_P = ولتاژ نامی (فاز به نوترال)

I = جریان در نقطهٔ نوترال

امپدانس توالی صفر معمولاً بصورت درصدی از امپدانس مبنای Z_b ترانسـفورماتور بیـان می شود . امپدانس اتّصال کوتاه ترانسفورماتور (امپدانس اتّصال کوتاه توالی مثبـت) نیـز به همین روش بیان می گردد . امپدانس مبنا با فرمول زیر بدست می آید :

$$Z_b = \frac{U_r^2}{S_r} \text{ ohm}$$

که در آن :

S_r = توان نامی

U_r = ولتاژ نامی فاز به فاز

امپدانس نسبی توالی صفر با فرمول زیر بدست می آید :

$$Z_0 = \frac{Z_0}{Z_b} \cdot 100 \quad \text{یا} \quad Z_0 = \frac{S_r}{U_r^2} \cdot 100$$

امپدانس توالی صفر مانند دیگر انواع امپدانس دارای دو مؤلفه است :

مقاومت توالی صفر R_0 و رئاکتانس توالی صفر X_0 . از آنجائیکه در عمل $R_0 << X_0$ می باشد از بخش مقاومتی می توان صرفنظر کرد ؛ به عبارت دیگر : امپدانس توالی صفر برابر با رئاکتانس توالی صفر است .

در عمل برای محاسبات مؤلفه های متقارن ، از امپدانس های اندازه گیری شده بصورت مستقیم استفاده نمی شود و امپدانس مدار معادل مورد استفاده قرار می گیرد [106] ، [107] ، [108] ، [204] ، شکل ۱۲- ۳ را ببینید .

همان طور که در بالا بیان شد ، امپدانس توالی صفر ، بستگی به گروه برداری ترانسفورماتور و ساختار هستهٔ ترانسفورماتور دارد .

انواع متفاوت امپدانس های توالی صفر در ضمیمهٔ ۱۲- ۲ نشان داده شده است . در ضمیمهٔ ۱۲- ۳ نیز تأثیرات اتّصالات سیم پیچ ها و نیز طراحی بر روی امپدانس توالی صفر نشان داده شده است .

۱۲- ۵ فرآیند اندازه گیری

مدار کلی تست در شکل ۱۲- ۲ نشان داده شده است ؛ اندازه گیری باید در فرکانس نامی انجام گردد [1] ، [51] .

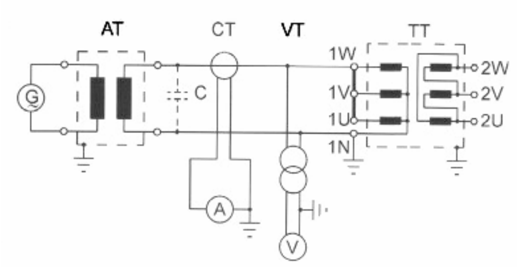
اتّصالات اصلی برای تست اندازه گیری امپدانس توالی صفر در شرایط متفاوت شبکه و نقطهٔ نوترال به همراه مدار معادل مربوطه در شکل ۱۲- ۳ ارائه شده است . بخاطر تأثیر خیلی زیاد مخزن در مقدار امپدانس توالی صفر ، اندازه گیری همیشه باید وقتی که اکتیو پارت در داخل مخزن است انجام گردد (" نوع رئاکتور") ؛ مثال ۱ را در بند ۴- ۱ ضمیمهٔ ۱۲ در این مورد ببینید .

در شرایطی که سیم پیچی با آمپردور متعادل کننده وجود نداشته باشد ، رابطهٔ بین ولتاژ و جریان عموماً غیر خطی است (" نوع رئاکتور") . در این حالت چندین اندازه گیری با مقادیر مختلف جریان ، اطلاعات مفیدی بدست می دهد .

باید توجه داشت که شار توالی صفر می تواند باعث تولید گرمای بیش از حد در قسمت های فلزی از قبیل مخزن ، دریوش و چهار چوب هسته گردد . بدین دلیل جریان اندازه گیری نباید از ۳۰% جریان نامی I_r تجاوز کند . اعمال جریان نامی جهت اندازه گیری فقط برای مدت زمان خیلی کوتاهی (در حدود چند ثانیه) مجاز می باشد . ولتاژ اعمالی نباید از ولتاژ فاز به زمین بهره برداری عادی تجاوز کند .

برای ترانسفورماتورهایی که دارای سیم پیچ با آمپر دور متعادل کننده هستند ، (" نوع اتّصال کوتاه ") جریان اندازه گیری می تواند به اندازهٔ جریان نامی باشد .

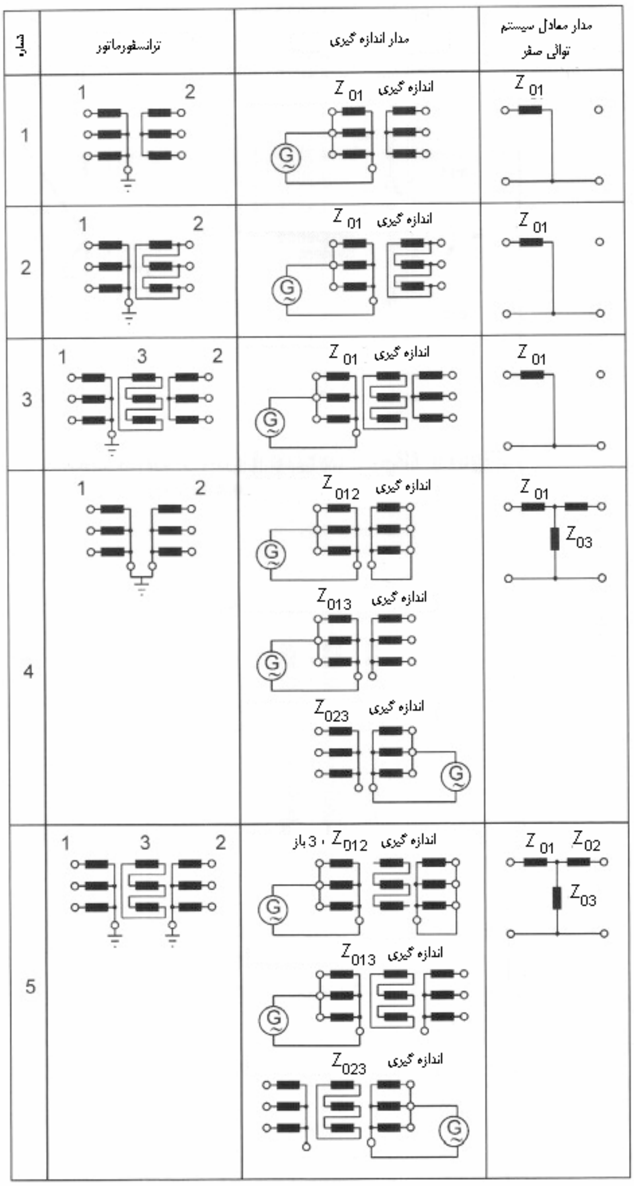
مثال های کاربردی از اندازه گیری توالی صفر برای یک ترانسفورماتور با گروه اتّصال ستاره- ستاره بدون سیم پیچ سوم (" نوع رئاکتور") و برای یک ترانسفورماتور با گروه اتّصال ستاره- مثلث (" نوع اتّصال کوتاه ") در بند ۴ ضمیمهٔ ۱۲ ارائه شده است .



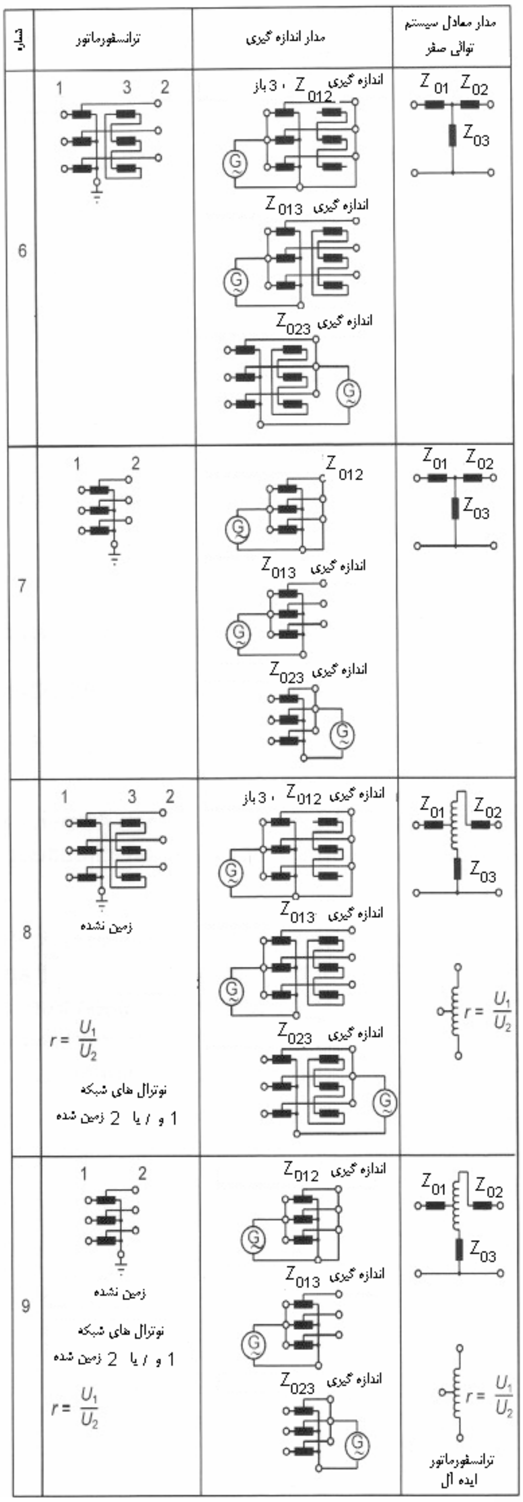
G = منبع ولتاژ (تک فاز)
C = بانک خازنی (معمولاً برای جبران سازی توان رئاکتیو لازم است ، ممکن است چسبیده به ترمینال ژنراتور قرار گیرد)
CT = ترانسفورماتور جریان
VT = ترانسفورماتور ولتاژ
TT = ترانسفورماتور مورد آزمایش

شکل ۱۲- ۲ : مدار عمومی برای اندازه گیری امپدانس توالی صفر؛ برای مثال اتّصال ستاره- مثلث

۱۲- اندازه گیری امپدانس(های) توالی صفر در ترانسفورماتورهای قدرت



شکل ۱۲-۳ الف : اتصالات تست برای اندازه گیری امپدانس توالی صفر



اتصالات اصلی تست برای اندازه گیری امپدانس توالی صفر با وضعیت های مختلف نوترال و شبکه و مدار معادل آن

شکل ۱۲-۳ب : ادامه اتصالات تست برای اندازه گیری امپدانس توالی صفر

ضمیمة ۱۲ :

اندازه گیری امپدانس توالی صفر ترانسفورماتورهای سه فاز

ضمیمة ۱۲- ۱ مثال برای یک سیستم سه فاز نامتعادل

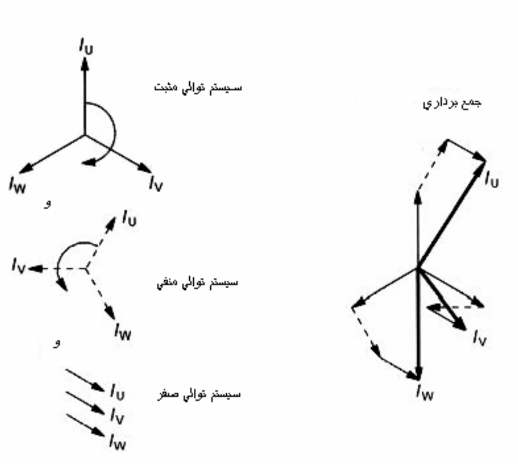
یک مثال از ترکیب جریان ها در یک سیستم سه فاز نامتعادل شامل مؤلفه های توالی مثبت ، توالی منفی و توالی صفر در شکل ۱۲- ۴ ارائه شده است .

ضمیمة ۱۲- ۲ انواع امپدانس توالی صفر

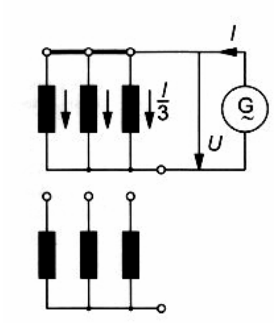
امپدانس توالی صفر را می توان به یکی از دو حالت زیر اندازه گیری کرد :

- امپدانس توالی صفر مدار باز (تمام ترمینال های سایر سیم پیچ ها باز می باشد) ، (شکل ۱۲- ۵) .
- امپدانس توالی صفر اتّصال کوتاه (ترمینال های حداقل یک سیم پیچ ، اتّصال کوتاه شده است) ، (شکل ۱۲- ۶) .

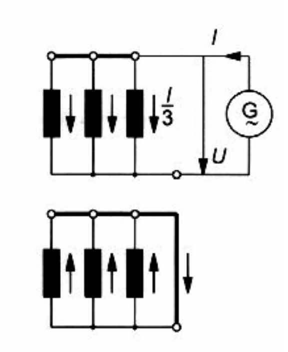
جریان توالی صفر می تواند در داخل سیم پیچ با اتّصال مثلث جاری شده و آمپر دوری متعادل کننده برای سیم پیچ اتّصال ستاره تامین کند . در اتّصال ستاره مثلث ، سیم پیچ مثلث معادل یک سیم پیچ اتّصال کوتاه شده برای جریان توالی صفر است ،(شکل ۱۲-۷).



شکل ۱۲- ۴ : مثال سیستم سه فاز نامتعادل



شکل ۱۲- ۵ : امپدانس توالی صفر مدار باز ترانسفورماتور با اتّصال ستاره- ستاره



شکل ۱۲- ۶ : امپدانس توالی صفر اتّصال کوتاه ترانسفورماتور با اتّصال ستاره- ستاره

از لحاظ فیزیکی سه نوع امپدانس توالی صفر مختلف وجود دارد :

الف) " نوع بی باری"

امپدانس توالی صفر Z_0 منطبق بر امپدانس یک مدار مغناطیسی بسته مانند یک ترانسفورماتور بی بار است . تقریباً تمام شار مغناطیس کننده از طریق مدار مغناطیسی مسیر خود را می بندد و جریان مغناطیس کننده کم است (در حدود I_r % ۱- ۰/۱) ، بدین ترتیب مقدار Z_0 بزرگ است (۱۰۵- ۱۰۴) و بستگی شدیدی به ولتاژ تغذیه دارد ، شکل ۱۲- ۸ را ببینید .

ب) " نوع رئاکتور"

امپدانس توالی صفر Z_0 مشابه مشخّصهٔ یک مدار مغناطیسی باز می باشد (یعنی مانند یک هستهٔ آهنی با فاصلهٔ هوایی) . تنها قسمتی از شار مغناطیس-کننده مسیرش را از طریق آهن بسته و بقیه مسیر خود را از طریق هوا می بندد و در نتیجه جریان ورودی بزرگ است . امپدانس نسبی توالی صفر Z_0 در حدود ۱۰۰% است . Z_0 کم و بیش یک تابع ثابت از ولتاژ تغذیه می باشد ، به مثال ضمیمه ۱۲- ۴ مراجعه کنید . مقاومت مغناطیسی تمام مسیر تقریباً برابر مقاومت مغناطیسی فاصلهٔ هوایی بوده و اشباع هسته ناچیز است .

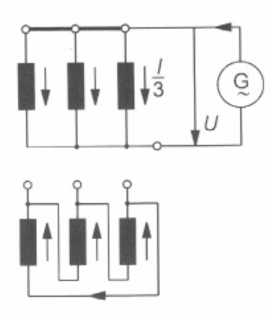
پ) " نوع اتّصال کوتاه "

امپدانس توالی صفر مشابه امپدانس ترانسفورماتور در حالت اتّصال کوتاه است ؛ Z_0 در حدود ۱۰% بوده و مستقل از ولتاژ تغذیه می باشد .

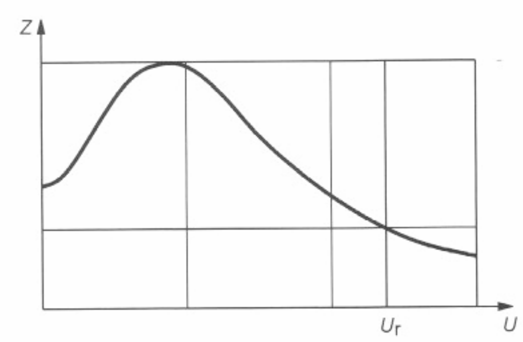
ضمیمهٔ ۱۲- ۳   تأثیر گروه اتّصال و طراحی ترانسفورماتور

ضمیمهٔ ۱۲- ۳- ۱   اتّصال ستاره- ستاره ، هسته سه ستونه (ترانسفورماتور نوع هسته ای)

شار مغناطیس کننده بطور همزمان و برابر در سه ستون وجود دارد . همچنین مسیر برگشت شار ، خارج از هسته بوده و از طریق مخزن یا حفاظ مغناطیسی دیواره ها می باشد (" نوع رئاکتور") . تعادل آمپر دور ، بین سیم پیچ ها وجود ندارد . شکل ۱۲- ۹ را ببینید . مقدار امپدانس توالی صفر مدار باز Z_0 حدود ۵ تا ۱۰ برابر بزرگتر از امپدانس اتّصال کوتاه Z_1 می باشد .

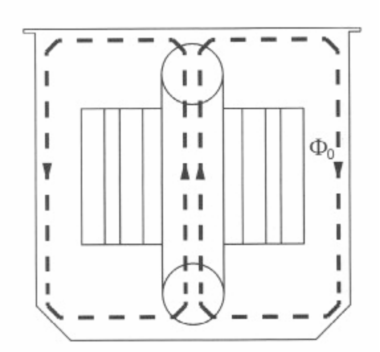


شکل ۱۲- ۷ : امپدانس توالی صفر ترانسفورماتور ستاره- مثلث



U_r = ولتاژ نامی

شکل ۱۲- ۸ : امپدانس توالی صفر ترانسفورماتور ستاره- مثلث



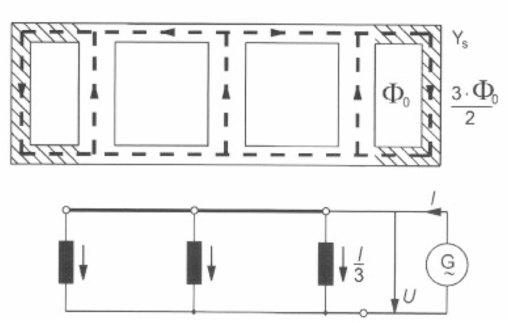
Φ_0 = شار توالی صفر؛ جهت یکسان در سه فاز

شکل ۱۲- ۹ : شار توالی صفر مربوط به ترانسفورماتور با اتّصال ستاره- ستاره

ضمیمة ۱۲- ۳- ۲ اتّصال ستاره- ستاره ، هستة پنج ستونه (ترانسفورماتور نوع هسته ای)

معمولاً ترانسفورماتورهایی که هستة پنج ستونه دارند ، دارای سیم پیچ پایدار کنندة سومی با اتّصال مثلث هستند . هنگام اندازه گیری امپدانس توالی صفر جریانی متعادل کننده از داخل سیم پیچ سوم عبور می کند (" نوع اتّصال کوتاه ") . بنابراین امپدانس توالی صفر مدار باز مشابه امپدانس اتّصال کوتاه بین سیم پیچ تغذیه شده و سیم پیچ سوم می باشد .

در حالتیکه سیم پیچ سوم وجود نداشته باشد یا در مدار نباشد (برای مثال باز باشد) ، مقدار امپدانس توالی صفر بشدت بستگی به ولتاژ تحریک دارد (شکل ۱۲- ۱۰) . با اعمال ولتاژ تحریک تا ۳۰% ولتاژ فاز ، امپدانس توالی صفر مدار باز برابر امپدانس مغناطیس کننده است . در ولتاژهای بالاتر ساق های کناری و یوغ ها تقریباً اشباع شده و امپدانس توالی صفر مدار باز شبیه ضمیمة ۱۲- ۳- ۱ می شود (" نوع رئاکتور") .



Φ_0 = شار توالی صفر
Y_s = یوغ کناری

شکل ۱۲- ۱۰ : شار توالی صفر در هستة ستون های ترانسفورماتور سه فاز

ضمیمة ۱۲- ۳- ۳ اتّصال ستاره - مثلث ، هسته سه ستونه (ترانسفورماتور نوع هسته ای)

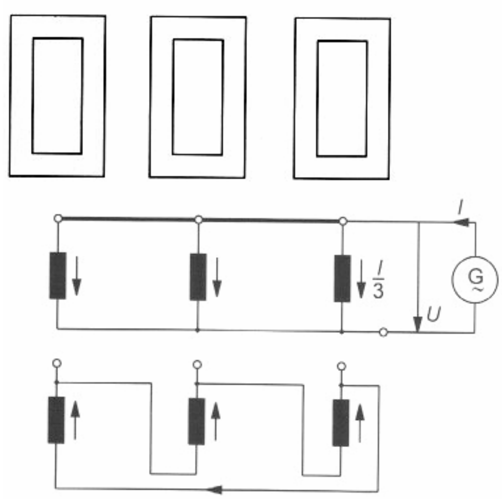
همان طور که در شکل ۱۲- ۷ نشان داده شده است ، آمپردورها بطور کامل متعادل می شوند (" نوع اتّصال کوتاه") ؛ تنها اختلاف آن با اندازه گیری امپدانس اتّصال کوتاه سه فاز این است که شار نشتی سه فاز به جای ۱۲۰° اختلاف ، هم جهت هستند . امپدانس توالی صفر مدار باز Z_0 معمولاً اندکی کمتر از امپدانس اتّصال کوتاه Z_1 ، در حدود Z_1 ۱- ۰/۸ است .

ضمیمة ۱۲- ۳- ۴ اتّصال ستاره- مثلث ، هستة پنج ستونه (ترانسفورماتور نوع هسته ای)

این حالت مشابه بند ۳- ۳ ضمیمة ۱۲ (" نوع اتّصال کوتاه") می باشد . چون شاخه های کناری ، مسیر ایده آلی برای عبور شار توالی صفر است ، امپدانس توالی صفر مدار باز Z_0 دقیقاً برابر امپدانس اتّصال کوتاه Z_1 می باشد .

ضمیمة ۱۲- ۳- ۵ بانک سه فاز سه ترانسفورماتور تک فاز با سه مخزن مجزا ، اتّصال ستاره مثلث (ترانسفورماتور نوع هسته ای)

این حالت مشابه یک ترانسفورماتور سه فاز با اتّصال ستاره- مثلث است ؛ آمپردورها متعادل می باشند (" نوع اتّصال کوتاه") ، شکل ۱۲- ۱۱ را ببینید . مقدار امپدانس توالی صفر دقیقاً برابر امپدانس اتّصال کوتاه است .



شکل ۱۲- ۱۱ : شار توالی صفر در بانک سه فاز سه ترانسفورماتور تک فاز

ضمیمة ۱۲- ۳- ۶ بانک سه فاز سه ترانسفورماتور تک فاز ، اتّصال ستاره- ستاره (ترانسفورماتور نوع هسته ای)

بانک سه فاز با اتّصال ستاره- ستاره یا به صورت اتو ترانسفورماتور ، معمولاً سیم پیچ سومی با اتّصال مثلث جهت پایداری دارند . امپدانس توالی صفر دقیقاً برابر با امپدانس اتّصال کوتاه بین سیم پیچ تغذیه شونده و سیم پیچ سوم است (" نوع اتّصال کوتاه") .

در صورت باز بودن یا نداشتن سیم پیچ سوم ، رفتار ترانسفورماتور مانند حالت بی باری بدون آمپردور متعادل کننده (" نوع بی بار") است . امپدانس توالی صفر برابر امپدانس بی باری است ؛ یعنی $Z_0 \approx 10^4 \rightarrow 10^5$.

ضمیمة ۱۲- ۳- ۷ اتّصال ستاره- مثلث (ترانسفورماتور نوع زرهی)

مشابه ترانسفورماتور با هستة پنج ستونه و با اتّصال ستاره- مثلث ، مسیر شار توالی صفر از طریق یوغ ها بسته می شود (" نوع اتّصال کوتاه") .
امپدانس توالی صفر مدار باز Z_0 دقیقاً برابر امپدانس اتّصال کوتاه Z_1 است .

ضمیمة ۱۲- ۳- ۸ اتّصال ستاره- ستاره (ترانسفورماتور نوع زرهی)

ترانسفوماتورهای زرهی با اتّصال ستاره- ستاره معمولاً دارای یک سیم پیچ پایدار کننده سومی با اتّصال مثلث می باشند . در این حالت ترانسفورماتور مانند ترانسفورماتوری با گروه اتّصال ستاره- مثلث (" نوع اتّصال کوتاه") رفتار می کند .

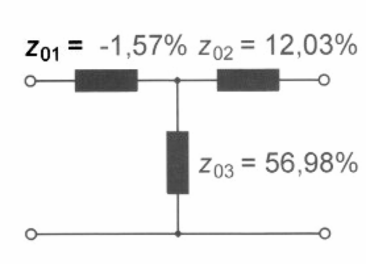
وقتی که سیم پیچ سوم وجود ندارد مقدار امپدانس توالی صفر مدار باز شدیداً به ولتاژ تحریک بستگی دارد .

در اندازه گیری امپدانس توالی صفر ، شار در هسته ها و یوغ های میانی یکسان است . اگر ولتاژ توالی صفر بیشتر از نصف ولتاژ نامی فاز گردد ، یوغ های میانی اشباع گشته و قادر به عبور دادن شار توالی صفر نخواهد بود . رفتار ترانسفورماتور طبق ضمیمة ۱۲- ۳- ۲ شبیه به عملکرد ترانسفورماتوری با هستة پنج ستونه بدون سیم پیچ سوم (" نوع رئاکتور") می شود . لازم به یادآوری است که جریان توالی صفر در سه فاز برابر نیست ؛ بیشترین مقدار همیشه در ستون میانی اندازه گیری می شود ؛ توزیع به نسبت تقریبی ۰/۳ : ۰/۴ : ۰/۳ می باشد .

ضمیمهٔ ۱۲- ۴ مثال ها و تفسیر

ضمیمهٔ ۱۲- ۴- ۱ ترانسفورماتور سه فاز با اتّصال ستاره- ستاره و بدون سیم پیچ سوم (" نوع رئاکتور")

ترانسفورماتور سه فاز با مقادیر نامی MVA ۱۰۰ ، kV (۵۵) / (۲۵۹/۰۵ ±۱۵%) ، Hz ۵۰ (مخزن بدون حفاظ مغناطیسی دیواره) ؛ گروه اتّصال YNyn0 ، نقطهٔ نوترال ترانسفورماتور مطابق شکل ۱۲- ۳ الف شمارهٔ 4 می باشد .



شکل ۱۲- ۱۲ : مدار معادل در سیستم توالی صفر ترانسفورماتور ستاره- ستاره MVA ۱۰۰

- اندازه گیری Z_{012} " امپدانس توالی صفر اتّصال کوتاه "

U [V]	I [A]	Z_0 [Ω]	Z_{012} [%]
۵۲۰۸	۲۲۳	۷۰/۱	۱۰/۴۵
۴۶۸۰	۲۰۰	۷۰/۱	۱۰/۴۵
۴۲۴۰	۱۸۰	۷۰/۶	۱۰/۵۲
۳۱۹۲	۱۳۵	۷۰/۹	۱۰/۵۷
۲۱۶۰	۹۰	۷۲/۰	۱۰/۷۳
۱۱۰۰	۴۵	۷۳/۴	۱۰/۹۴

$$Z_0 = 3 \cdot \frac{U}{I}$$

Z_{012} =۱۰/۴۵ % در I_r =۲۲۲/۹ A

- اندازه گیری Z_{013} " امپدانس توالی صفر مدار باز "

U [V]	I [A]	Z_0 [Ω]	Z_{013} [%]
۹۳۲۰	۷۵	۳۷۲	۵۵/۴۳
۷۶۸۰	۶۰	۳۸۴	۵۷/۲۲
۵۹۶۰	۴۵	۳۹۸	۵۹/۳۱
۴۱۲۰	۳۰	۴۱۲	۶۱/۳۹
۲۱۶۸	۱۵	۴۳۳	۶۴/۵۲
۱۱۶۸	۸	۴۳۷	۶۵/۱۲

Z_{013} = ۵۵/۴ % در I_r = ۷۴/۳ A ۰/۳

- اندازه گیری Z_{023} " امپدانس توالی صفر مدار باز "

U [V]	I [A]	Z_0 [Ω]	Z_{023} [%]
۳۳۱۲	۴۸۰	۲۰/۱	۶۶/۴۴
۲۵۸۰	۳۸۰	۲۰/۴	۶۷/۴۴
۱۹۶۰	۲۸۰	۲۱/۰	۶۹/۴۲
۱۴۴۴	۲۰۰	۲۱/۶	۷۱/۵۷
۷۳۰	۹۶	۲۲/۸	۷۵/۳۷
۳۸۹	۵۰	۲۳/۴	۷۷/۳۶

Z_{023} = ۶۹ % در I_r = ۳۵۰ A ۰/۳

برای مدار معادل در یک سیستم توالی صفر شکل ۱۲-۱۲ را ببینید .

Z_{012} = ۱۰/۴۵ %
Z_{013} = ۵۵/۴۰ %
Z_{023} = ۶۹/۰۰ %

۱۳۴/۸۵ %

۱۳۴/۸۵ / ۲ = ۶۷/۴۳ %

Z_{01} = ۶۷/۴۳-۶۹/۰ =-۱/۵۷ %
Z_{02} = ۶۷/۴۳-۵۵/۴ =۱۲/۰۳ %
Z_{03} = ۶۷/۴۳-۱۰/۴۵ =۵۶/۹۸ %

برای محاسبهٔ امپدانس ، بخش ۵ را ببینید .

امپدانس های توالی صفر برای یک ترانسفورماتور ، یکبار در خارج از مخزن و بار دیگر در داخل مخزن دارای حفاظ مغناطیسی دیواره اندازه گیری شد :

- امپدانس های توالی صفر اندازه گیری شده در خارج از مخزن :
  Z_{012} = ۱۱ /۵ % اندازه گیری شده با جریان I_r در نوترال
  Z_{013} = ۹۷/۰ % اندازه گیری شده با جریان ۰/۳ I_r در نوترال
  Z_{023} = ۱۰۹ /۰ % اندازه گیری شده با جریان ۰/۳ I_r در نوترال
- امپدانس های توالی صفر در داخل مخزن دارای حفاظ مغناطیسی :
  Z_{012} = ۱۲/۱ % اندازه گیری شده با جریان I_r در نوترال
  Z_{013} =۱۰۹/۰ % اندازه گیری شده با جریان ۰/۳ I_r در نوترال
  Z_{023} =۱۱۶/۰ % اندازه گیری شده با جریان ۰/۳ I_r در نوترال
- جهت مقایسه ، امپدانس اتّصال کوتاه برابر است با :
  ε_{cc} = ۱۲/۸ % در جریان I_r

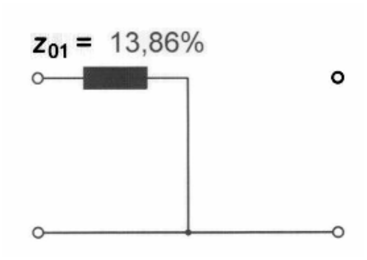
ضمیمهٔ ۱۲- ۴- ۲ ترانسفورماتور سه فاز با اتّصال ستاره- مثلث (" نوع اتّصال کوتاه")

ترانسفورماتور سه فاز با مقادیر نامی ۴۶۵ MVA ، ۴۱۰/۲۱ kV ، ۵۰ Hz ، گروه اتّصال YNd11 ، نقطهٔ نوترال ترانسفورماتور مطابق شکل ۱۲- ۳ الف شمارهٔ 2 .

شکل ۱۲- ۱۳ را ببینید .

Z_{01} [%]	Z_0 [Ω]	I [A]	U [V]
۱۳/۸۶	۵۰/۰۷	۶۲/۴	۱۰۴۲

جهت مقایسه ، امپدانس اتّصال کوتاه برابر است با :
ε_{cc} = ۱۴/۱ % در جریان I_r



شکل ۱۲- ۱۳ : مدار معادل در سیستم توالی صفر ترانسفورماتور ستاره – مثلث ۴۶۵ MVA

تست ترانسفورماتورهای قدرت

۱۳- تست تحمل اتصال کوتاه

۱۳- ۱ مراجع / استانداردها

- IEC 60076-5 (2000) , Power transformers- Part 5: " Ability to withstand short-circuit " [5]
- IEEE Std C57.12.00-2000: "IEEE Standard General Requirements for Liquid-Immersed Distribution , Power , and Regulating transformers" [50]
- IEEE Std.C57.12.90-1999 , "IEEE Standard Test Code for Liquid-Immersed Distribution , Power , and Regulating Transformers " clause 12 " Short-circuit tests" [51]

توجه:

طبق 5 و IEC60076-1 [1] ، [5] و IEEEStd.C57.12.00 [50] تست تحمل اتصال کوتاه یک **تست ویژه** یا تست **" دیگر"** است .

۱۳- ۲ منظور از تست

تست اتصال کوتاه برای اطمینان از استحکام ترانسفورماتور در برابر تنش های ناشی از جریان اتصال کوتاه انجام می گردد ؛ بویژه در ابتدای اتصال کوتاه ، که این تنش ها به صورت مکانیکی می باشد .

۱۳- ۳ کلیات

تست تحمل اتصال کوتاه تشریح شده در این کتاب ، تنها تستی می باشد که در آزمایشگاه تست سازندهٔ ترانسفورماتور انجام *نمی گردد* . انجام این تست مخصوصاً برای ترانسفورماتورهای بزرگ با قدرت ۱۰۰ MVA و بالاتر به آزمایشگاهی بسیار پر قدرت احتیاج دارد . این تست ها فقط در چند آزمایشگاه فشار قوی توان بالا شامل : KEMA (هلند) ، EdF (فرانسه) ، CESI (ایتالیا) یا IREQ (کانادا) انجام می گردد .

تست های اتصال کوتاه ، گران قیمت می باشند . نه تنها خود هزینهٔ تست بالاست ، بلکه انجام کارهایی از قبیل : حمل ترانسفورماتور از کارخانه به آزمایشگاه تست و بلعکس، نصب متعلقات جانبی ترانسفورماتور در آزمایشگاه تست و مجدداً در کارخانه ، بیرون آوردن اکتیو پارت و بازدید آن و تکرار تست های عایقی و غیره در کارخانه ، هزینه ها را افزایش می دهد . بدین دلیل ، استاندارد IEC اثبات استحکام ترانسفورماتور در برابر اتصال کوتاه را با استفاده از محاسبات و ملاحظات طراحی مجاز می داند [5] .

انتخاب روش های اثبات این استحکام ، منوط به توافق بین مشتری و سازنده ، قبل از عقد قرارداد ساخت است ؛ یعنی در این مورد مشابه تست های ویژه عمل می گردد [1] ، [5] .

استانداردهای مربوطه ،ترانسفورماتورها را بر اساس قدرت نامی به چند گروه تقسیم می کنند :

براساس IEC 60076-5 [5] :

- گروه I : تا ۲۵۰۰ kVA
- گروه II : ۲۵۰۱ - ۱۰۰ ۰۰۰ kVA
- گروه III : بالای ۱۰۰ ۰۰۰ kVA

بر اساس IEEE Std C57.12.90 [51] :

- گروه I : تا ۵۰۰ kVA
- گروه II : ۵۰۱ - ۵ ۰۰۰ kVA
- گروه III : ۵۰۰۱ - ۳۰ ۰۰۰ kVA
- گروه IV : بالای ۳۰ ۰۰۰ kVA

۱۳- ۴ شرایط ، روش ها و اتصالات تست

۱۳- ۴- ۱ شرایط تست

تست ها باید بر روی یک ترانسفورماتور نو که آمادة بهره برداری می باشد انجام گردد ؛ متعلقات حفاظتی از قبیل رله بوخهلتس و رلة فشار شکن در هنگام تست باید نصب شده باشند .

تست های روتین باید بر روی ترانسفورماتور ، قبل از تست اتصال کوتاه انجام گردد (به جز تست ضربة صاعقه ، در صورت لزوم انجام) .

اگر سیم پیچ ها انشعاب دار باشند ، رئاکتانس و مقاومت اهمی برای تمام تپ هایی که تست اتصال کوتاه در آن انجام خواهد شد باید اندازه گیری شود [5] .

۱۳- ۴- ۲ روش های تست

اصولاً دو روش مختلف برای انجام دادن تست تحمل اتصال کوتاه وجود دارد ؛ به عبارت دیگر :

- با اتصال کوتاهِ بعداً ایجاد شده

(وصل کلید بین ترمینال های دو نقطه از سیم پیچ برای شبیه سازی اتصال کوتاه ترانسفورماتور برق دار)

- با اتصال کوتاهِ از قبل ایجاد شده

(وصل کلید منبع تغذیه برای اعمال انرژی به ترانسفورماتور اتصال کوتاه شده)

در حد امکان باید روش اتصال کوتاهِ بعداً ایجاد شده ، مورد استفاده قرار گیرد ؛ چون بدین ترتیب شرایط به واقعیت نزدیکتر خواهد بود .

جهت مشاهدة مزایا و معایب دو روش به بند ۴ ضمیمة ۱۳ و [105] مراجعه کنید .

۱۳- ۴- ۳ اتصالات تست

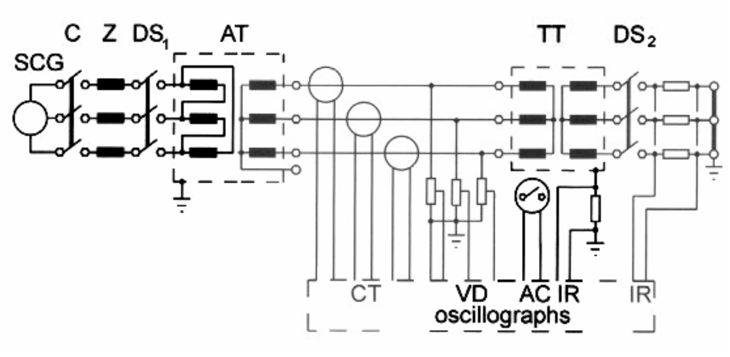
شکل ۱۳- ۱ مدار پایه را برای تست اتصال کوتاه نشان می دهد (ترانسفورماتور دو سیم پیچه ، منبع تغذیهٔ سه فاز) .

بسته به روش تست انتخاب شده ، DS_1 یا DS_2 جهت اعمال اتصال کوتاه مورد استفاده قرار می گیرند .

در حد امکان لازم است از منبع تغذیهٔ سه فاز برای ترانسفورماتورهای سه فاز استفاده کرد. استانداردهای بالا مثال هایی را برای آرایش های تک فاز برای تست ترانسفورماتورهای سه فاز ارائه می کنند . بند ۲ ضمیمهٔ ۱۳ را ببینید .

لازم به ذکر است که برای ترانسفورماتورهای با بیش از دو سیم پیچ یا برای اتو ترانسفورماتورها ، در صورت وقوع اتّصال کوتاه در یک محل و با نوع معین ، جریان عیب ماکزیمم تنها دریک سیم پیچ برقرار می شود و جهت ارزیابی استحکام تمام سیم پیچ ها لازم است تست ها را برای اتصالات مختلف انجام داد [51] .

اتصالات تست ، مقادیر جریان ، توالی و تعداد تست ها همیشه منوط به توافق بین سازنده و خریدار می باشد [5] .



SCG = ژنراتور اتصال کوتاه
C = کلید قدرت تحریک سنکرون
Z = رئاکتورهای قابل تنظیم
DS 1,2 = کلید وصل سنکرون
AT = ترانسفورماتور آزمایشگاه
TT = ترانسفورماتورتحت تست
CT = ترانسفورماتور جریان
VD = مقسم ولتاژ
IR = شنت های اندازه گیری
AC = کنتاکت های آلارم و تریپ

شکل ۱۳- ۱ : مدار پایه برای تست اتصال کوتاه

۱۳- ۴- ۴ الزامات تست

جریان تست : (ترانسفورماتور دو سیم پیچه)

جریان اتصال کوتاه متقارن

بند ۳ ضمیمهٔ ۱۳ محاسبات مقدار r.m.s جریان اتصال کوتاه را بر اساس بند ۴ IEC 60076-5 [5] ارائه می دهد ؛ محاسبات مشابهی نیز در IEEE Std C57.12.00 توضیح داده شده است [50] .

همانطور که در بند های ۳ و ۴ ضمیمهٔ ۱۳ دیده می شود تأثیر امپدانس اتصال کوتاه سیستم باید همیشه بجز در موارد ذیل در نظر گرفته شود :

- بر اساس IEC [5] ، ترانسفورماتور های ۲/۵ MVA (گروه I IEC) ، اگر امپدانس سیستم مساوی یا کوچکتر از ۵% امپدانس ترانسفورماتور باشد .
- بر اساس IEEE [51] ، تمام ترانسفورماتورهای ≥ ۵ MVA (گروه I و II IEEE)

توان ظاهری اتصال کوتاه سیستم بر اساس IEC در جدول 2 ، IEC 60076-5 [5] و بر اساس IEEE در جدول ۱۶ ، IEEE Std C57.12.00 [50] می باشد ، مگر اینکه مقدار دیگری از قبل معین شده باشد .

پیک جریان تست نامتقارن $\hat{I}$

تست باید با جریانی انجام شود که دارای ماکزیمم عدم تقارن نسبت به فاز تحت تست باشد . دامنهٔ $\hat{I}$ پیک اول جریان نامتقارن تست به قرار زیر محاسبه می گردد :

$$\hat{I} = I \cdot k\sqrt{2}$$

ضریب $k\sqrt{2}$ ، یا ضریب پیک ، بستگی به نسبت X/R دارد

که در آن :

X = مجموع رئاکتانس های ترانسفورماتور و سیستم

R = مجموع مقاومت های اهمی ترانسفورماتور و سیستم

برای ترانسفورماتورهای قدرت ، حدود آن برابر ۲/۸ – ۲/۵۵ است . چنانچه X/R برابر ۱۴ باشد مقدار $k\sqrt{2}$ برابر با ۲/۵۵ خواهد بود . مقدار دقیق $k\sqrt{2}$ در جدول 14 استاندارد IEC 60076-5 [5] و جدول 15 استاندارد IEEE Std C57.12.00 [50] ارائه شده است .

تولرانس ها

اگر مدت زمان جریان اتصال کوتاه به اندازهٔ کافی طولانی باشد ، جریان نامتقارن با مقدار پیک اولیهٔ $\hat{I}$ به جریان متقارن I تغییر خواهد کرد .

- حداکثر انحراف مقدار پیک جریان $\hat{I}$ برابر ۵%
- حداکثر انحراف جریان متقارن I برابر ۱۰% بر اساس IEC [5] و برابر ۵% بر اساس IEEE [51]

فرکانس تست [5]

فرکانس منبع تغذیه در اصل باید برابر فرکانس نامی باشد . برای موارد استثناء IEC 60076-5 [5] ، بند 4.2.5.3 را ببینید .

۱۳- ۴- ۵ فرآیند تست

برای دستیابی به حداکثر عدم تقارن در موج جریان در فاز تحت تست ، لحظهٔ وصل شدن بوسیلهٔ یک کلید سنکرون تنظیم می گردد . جهت بدست آوردن حداکثر عدم تقارن جریان در یکی از سیم پیچ های فاز ، وصل کلید باید در لحظه ای باشد که ولتاژ اعمالی به این سیم پیچ از نقطهٔ صفر عبور می کند [5] .

کالیبراسیون [51]

جهت بدست آوردن ولتاژ مورد نیاز برای منبع و یا تعیین زمان های وصل شدن کلید ، تست کالیبراسیون بایستی در سطح ولتاژ کمتر از ۵۰% ولتاژی انجام گردد که جریان اتصال کوتاه متقارن مورد نیاز را تولید می کند .

محدودة ولتاژ [5] ، [51]

اگر از روش اتصال کوتاهِ " بعداً ایجاد شده " استفاده گردد ، ولتاژ اعمالی نباید از ۱/۱۵ برابر ولتاژ نامی سیم پیچ تجاوز کند (بر اساس IEEE از ۱/۱۰ برابر) .

اندازه گیری های ولتاژ و جریان

ثبت شکل موج ها بایستی به منظور کنترل مقدار $\hat{I}$ جریان تست نامتقارن و مقدار جریان تست متقارن انجام گردد .

جریان های اولیه با استفاده از ترانسفورماتور جریان ویژه ای اندازه گیری می گردد ، که قادر به انتقال پدیدة گذرا بدون اعوجاج می باشد .

جریان های ثانویه - در طرف اتصال کوتاه و زمین شده ترانسفورماتور مورد آزمایش - بوسیلة شنت های مخصوص اندازه گیری می شود در حالیکه ولتاژ در ترانسفورماتور تحت تست با استفاده از مقسم ولتاژ RC اندازه گیری می گردد ، شکل ۱۳- ۱ را ببینید .

موقعیت تپ ؛ تعداد تست ها ؛ مدت زمان تست

بر اساس IEC 60076- 5 [5] :

برای گروه های I و II :

IEC سه بار اعمال (shot) متقارن را برای هر فاز مقرر می کند . به این معنی که برای یک ترانسفورماتور سه فاز ۹ مرتبه اعمال اتّصال کوتاه انجام می گردد . برای سیم پیچ های انشعاب دار ، یک مرتبه در موقعیت مربوط به بالاترین نسبت ولتاژ ، یک مرتبه در تپ اصلی و یک مرتبه در پائین ترین نسبت ولتاژ ، اعمال اتّصال کوتاه انجام می شود . مدت زمان هر اتّصال کوتاه برای ترانسفورماتورهای گروه I و II به ترتیب برابر ۰/۵ ثانیه و ۰/۲۵ ثانیه می باشد .

برای ترانسفورماتورهای گروه III ، مطابق IEC 60076-5 [5] تست مشابه ترانسفورماتورهای گروه I و II و با مدت زمان ۰/۲۵ ثانیه انجام می شود ، اما لازم است قبلاً بین سازنده و خریدار در رابطه با تعداد تست ها و موقعیت کلید تنظیم ولتاژ توافق گردد .

بر اساس IEEE Std C57.12.90 [50] , [51]

IEEE شش بار اتّصال کوتاه را برای هر فاز مقرر می کند ، چهار بار با جریان متقارن و دو بار با پیک نامتقارن . مدت زمان های اعمال با جریان تست نامتقارن برای تمام گروه های ترانسفورماتور و با جریان تست نامتقارن برای گروه IV برابر ۰/۲۵ ثانیه می باشد . مدت زمان جریان تست متقارن برای گروه های II و III به ترتیب برابر ۱ ثانیه و ۰/۵ ثانیه است .

برای ترانسفورماتورهایی که دارای سیم پیچ های انشعابدار می باشند ، حداقل یک اتّصال کوتاه که الزامات تست با جریان نامتقارن را برآورده می کند ، باید در وضعیت تپی که بر اساس محاسبات بیشترین تنش مکانیکی در آن وارد می گردد انجام شود .

۱۳- ۴- ۶ آشکارسازی عیب ها و ارزیابی نتایج تست [105],[51],[5]

آشکارسازی عیب ها و ارزیابی نتایج تست در درجه اول بر اساس منحنی های ثبت شدة جریان و ولتاژ و نیز تست ها و اندازه گیری های اضافی دیگر انجام می‌شود . در پایان اکتیوپارت ترانسفورماتور در خارج از تانک بازرسی می شود .

تحمل اتّصال کوتاه با برآورده شدن شرایط ذیل اثبات می گردد :

- عدم تغییرات ناگهانی یا اختلالات در منحنی های ثبت شدة ولتاژ و جریان اتصال کوتاه
- عدم مشاهدة پدیدة غیر عادی در طول تست ، عدم تجمع گاز در رله های تحریک شونده با گاز یا روغن
- کوچکتر بودن اختلاف بین امپدانس اتصال کوتاه (هرفاز) ، اندازه گیری شده قبل و بعد از تست ، از ۲% برای سیم پیچ های متحدالمرکز گِرد و از ۷/۵ % برای سیم پیچ های متحدالمرکز غیرگِرد
- و از ۱% برای ترانسفورماتورهای گروه IV بر اساس IEEE Std C57.12.00
- تکرار موفقیت آمیز تست های عایقی
- کوچکتر بودن اختلاف بین جریان بی باری اندازه گیری شده قبل و بعد از تست از ۵% [5]
- عدم مشاهدة موارد غیر عادی در اندازه گیری های اضافی ، از قبیل منحنی های ثبت شده با ژنراتور مولّد موج تکراری ولتاژ پایین (low-voltage recurrent surge generator) (بند ۱۳ ضمیمة ۱۳) ، آنالیز طیف پاسخ فرکانسی سیم پیچ (FRA) ، آنالیز تابع انتقال (TFA) و غیره
- عدم مشاهدة موارد غیرعادی در آنالیز گازهای محلول در روغن (DGA) قبل و بعد از تست اتصال کوتاه
- عدم مشاهدة عیوبی از قبیل جابجایی و تغییر شکل سیم پیچ ها در طی بازدید از اکتیو پارت در خارج از تانک
- عدم مشاهدة اثرات تخلیة االکتریکی

ضمیمة ۱۳ :

تست تحمل اتصال کوتاه

ضمیمة ۱۳- ۱ اختلاف بین روش های تست (اتّصال کوتاه بعداً ایجاد شده و اتّصال کوتاه از قبل ایجاد شده) [105]

روش اتصال کوتاهِ از قبل ایجاد شده زمانی خوب پاسخ می دهد که سیم پیچ ثانویه (اتصال کوتاه شده) یک بوبین داخلی سیم پیچ های هم مرکز ترانسفورماتور نوع- هسته ای (core-type) باشد . در طول اتصال کوتاه ، شار هسته خیلی کم است ؛ زیرا نزدیک ترین سیم پیچ به هسته اتصال کوتاه بوده و هیچ تغییری در شار هسته اتفاق نمی افتد .

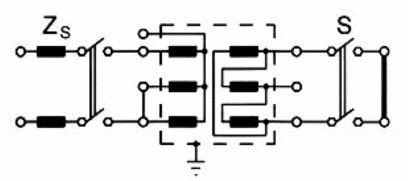
به هر حال اگر اولیه ، یک سیم پیچ داخلی و سیم پیچ اتصال کوتاه شده بیرونی باشد ، شار مغناطیسی به اجبار مسیر خود را در داخل هسته بسته ، و یک جریان هجومی بزرگ ، هسته را مغناطیس می کند . این جریان هجومی به جریان اتصال کوتاه اضافه شده و تنش های مکانیکی را افزایش می دهد [105] .

مشکل عدم امکان کنترل فرآیند مغناطیسی شدن هسته ، با استفاده از روش اتصال کوتاهِ بعداً ایجاد شده حل می شود . بنابراین این روش ترجیح داده می شود .

ضمیمة ۱۳- ۲ مثال های اتصالات تست تک فاز ، برای ترانسفورماتورهای سه فاز

شکل ۱۳- ۲ اتصالات ممکن را برای تست تک فاز جهت معادل سازی تست سه فاز برای ترانسفورماتور ستاره- مثلث نشان می دهد . شکل ۱۳- ۳ همان مورد را برای اتو ترانسفورماتور ستاره- ستاره نشان می دهد [5] .

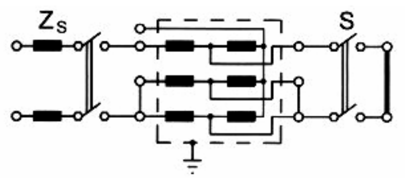
برای سیم پیچ های با اتصال ستاره با عایق بندی غیر یکنواخت لازم است کافی بودن عایق بندی نقطة ستاره قبل از انجام تست تک فاز بررسی گردد .



Z_S = امپدانس سیستم تغذیه

S = کلید سنکرون برای اتصال کوتاهِ بعداً ایجاد شده و یا شین ثابت برای اتصال کوتاهِ از قبل ایجاد شده

شکل ۱۳- ۲ : اتصال تک فاز برای شبیه سازی تست سه فاز ترانسفورماتور ستاره- مثلث



Z_S = امپدانس سیستم تست

S = کلید سنکرون برای اتصال کوتاهِ بعداً ایجاد شده و یا شین ثابت برای اتصال کوتاهِ از قبل ایجاد شده

شکل ۱۳- ۳ : اتصال تک فاز برای شبیه سازی تست سه فاز اتوترانسفورماتور ستاره- ستاره

ضمیمهٔ ۱۳- ۳ محاسبات جریان اتصال- کوتاهِ متقارن بر اساس IEC 60076-5 [5]

برای ترانسفورماتورهای سه فاز با دو سیم پیچ جداگانه ، مقدار مؤثر جریان تست اتصال کوتاهِ متقارن I برابر است با [5] :

$$I = \frac{U}{\sqrt{3}(Z_t + Z_s)}$$

$$Z_s = \frac{U_s^2}{S} \; [\Omega / \text{فاز}]$$

که در آن :

Z_s = امپدانس اتصال کوتاه سیستم

U_s = ولتاژ نامی سیستم بر حسب kV

S = توان ظاهری اتصال کوتاه سیستم بر حسب MVA

U و Z_t بصورت زیر تعریف می شوند :

U عبارت است از ولتاژ نامی سیم پیچ مورد نظر و یا ولتاژ انشعاب ، در صورتی که تست در تپی غیر از تپ اصلی انجام گردد .

Z_t امپدانس اتصال کوتاه ترانسفورماتور ، منتقل شده به طرف سیم پیچ مورد نظر است ؛ محاسبهٔ آن به صورت زیر می باشد :

$$Z_t = \frac{z_t \cdot U_r^2}{100 \cdot S_r}$$

که در آن :

z_t = امپدانس اتصال کوتاه اندازه گیری شدهٔ سیم پیچ مورد نظر برحسب %

S_r = توان نامی ترانسفورماتور بر حسب MVA

ضمیمهٔ ۱۳- ۴ محاسبهٔ جریان اتصال کوتاه متقارن I_{sc} بر اساس IEEE Std C57.12.00 [50]

$$I_{sc} = \frac{I_r}{Z_T + Z_s}$$

که در آن :

I_{sc} = جریان اتصال کوتاه متقارن

I_r = جریان نامی در انشعاب معین

Z_T = امپدانس ترانسفورماتور [pu] ، بر مبنای توان بدست آمده با استفاده از I_r

Z_s = امپدانس سیستم [pu] ، بر مبنای توان بدست آمده با استفاده از I_r

$$I = \frac{I_{sc}}{I_r}$$

I = جریان اتصال کوتاه متقارن بصورت مضربی از جریان نامی مبنا

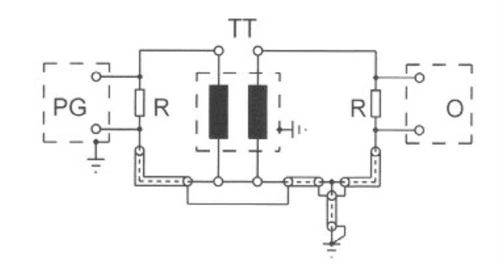
ضمیمهٔ ۱۳- ۵ روش موج تکراری با ولتاژ پایین

اعمال ضربه های صاعقه با ولتاژ پایین ، یک تست عیب یابی اضافی ، به منظور پی بردن به جابجایی و یا تغییر شکل ترانسفورماتور در اثر نیروهای اتصال کوتاه است .

اساس کار :

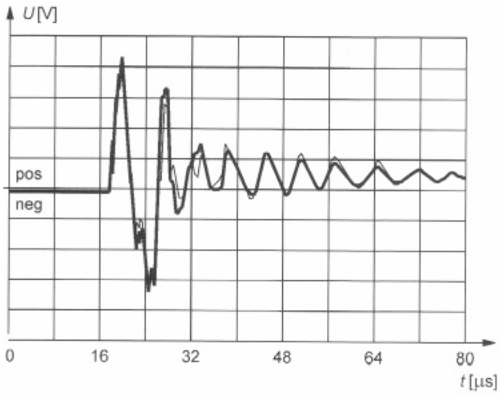
ژنراتور موج ضربهٔ تکراری (recurrent surge generator) ، یک پالس ولتاژ را به یک یا چند ترمینال ترانسفورماتور اعمال می کند و پاسخ جریان از همان ترمینال و یا از ترمینال های دیگر ثبت می گردد ، شکل ۱۳- ۴ را ببینید .

معمولاً یک دسته مرجع شامل سه خروجی اسیلوسکوپ (برای هر فاز یک خروجی) قبل از تست گرفته می شود . بعد از تست یک مجموعه جدید ثبت می گردد (شکل ۱۳- ۵).



PG = پالس ژنراتور
TT = ترانسفورماتور مورد آزمایش
O = اسیلوسکوپ
R = مقاومت بارگیری

شکل ۱۳- ۴ : نمودار شماتیک روش اسیلوسکوپی موج تکراری



= قبل از تست
= بعد از تست

شکل ۱۳- ۵ : مقایسهٔ شکل موج گرفته شده بعد از تست اتصال کوتاه با شکل موج مبنای ثبت شده قبل از تست اتصال کوتاه برای ترانسفورماتور سه فاز MVA ۵۰ ؛ فاز 1

تست ترانسفورماتورهای قدرت

۱۴- اندازه گیری سطح صدا

۱۴- ۱ مراجع / استانداردها

- IEC 60076-10 (2001) Power transformers - Part 10:"Determination of sound levels" [7]
- IEC 60076-10 Power transformers- Part 10-1: Draft: " Determination of transformer and reactor sound levels" – User Guide [30]
- IEEE Std C57.12.90- 1999, clause 13 : "Audible sound emissions" [51]

توجه :

اندازه گیری سطح صدا مطابق IEC 60076-1 [1] یک **تست ویژه** و مطابق IEEE Std C57.12.00 [50] یک **تست طراحی** یا یک تست " **دیگر**" است .

۱۴- ۲ منظور از اندازه گیری

بدلیل اینکه تأسیسات الکتریکی روز به روز به محل زندگی مردم نزدیکتر می شود ، توجه به صدا و تشعشات ترانسفورماتور نیز بیشتر می گردد .

ترانسفورماتورهای در حال بهره برداری ، صدا یا به بیان بهتر نویز تولید می کنند . برای حفاظت مردم از مزاحمت های نویز قوانین و مقرراتی در اکثر کشورها تصویب شده است که مطابق آن لازم است تجهیزات الکتریکی از جمله ترانسفورماتور محدودة نویز معینی داشته باشند .

بدلایل فوق دانستن میزان انتشار صدای قابل شنیدن از ترانسفورماتور اهمیت بسیار دارد .

برای ارزیابی دقیق و مطالعة روش های کاهش صدا - با استفاده از عناصر پسیو مانند دیواره های جاذب صدا و یا به روش حذف نویز اکتیو- اندازه گیری باریک باند [7] ، [51] یک الزام است .

۱۴- ۳ کلّیات [7] ، [51] ، [106]

بایستی گفت که نویز پدیده ای است که بسته به ساختمان بدن انسان ها دارای شدت دریافتی متفاوت است . برای کسب اطلاعات بیشتر در مورد حس شنوایی انسان بند ۱ ضمیمة ۱۴ را ببینید .

بر خلاف سایر تست های توضیح داده شده در این کتاب ، استانداردهای مربوط به تست صدا (بند ۱۴- ۱) نحوة انجام این تست را دقیقاً بیا ن می کنند ؛ بویژه IEC 60076-10 [7] در نشریه ای کامل ۳۵ صفحه ای .

هدف این کتاب تکرار مطالب استاندارد نیست بلکه منظور این فصل جمع بندی مهمترین موارد و ارائه اطلاعات بیشتر بر اساس تجربیات موجود است .

۱۴- ۳- ۱ منابع صدای ترانسفورماتور

صدای بی باری (نویز هسته)

صدای ترانسفورماتور بی بار از پدیدۀ لرزش (magnetostriction) (تغییر الاستیک طول بخش های هستۀ آهنی) در طی فرآیند مغناطیسی شدن هسته ناشی می شود . این نوسانات از طریق روغن و نگهدارنده های مکانیکی به شکل لرزش های مکانیکی از دیواره های مخزن منتقل و از روی سطح آن در هوای آزاد منتشر می شود . دامنۀ لرزش به چگالی شار هسته و خواص مغناطیسی فولاد هسته بستگی دارد .

طیف فرکانسی صدای قابل شنیدن بطور عمده شامل دو برابر فرکانس نامی و ضرایب فرد آن است ؛ برای سیستم توان ۵۰ Hz ، صدای قابل شنیدن شامل هارمونیک های ۱۰۰ Hz ، ۲۰۰ Hz ، ۳۰۰ Hz ، ۴۰۰ Hz و غیره می باشد .

بسته به نوع خنک کنندگی ، نویز دمنده ها و پمپ ها نیز افزوده می شود .

معمولاً صدای ترانسفورماتور فقط در حالت بی باری اندازه گیری می شود .

صدای بار (نویز سیم پیچ ها)

جریان بار بدلیل نیروهای مغناطیسی لرزش هایی را در سیم پیچ ، دیوار مخزن و پوشش های مغناطیسی آن ایجاد می کند . در ترانسفورماتورهای مدرن با چگالی شار کم (low induction) این صدا حتّی ممکن است از صدای بی باری بیشتر باشد .

توان صدای بار کاملاً به جریان بار وابسته است ، بند ۲ ضمیمۀ ۱۴ را ببینید .

اندازه گیری صدای بار در استاندارد IEC مورد اشاره بوده ، اما در استاندارد IEEE به آن اشاره ای نشده است .

ضمیمۀ ۱۴- ۳- ۲ ترکیب کردن صدای بی باری و صدای بار

بند ۳ ضمیمۀ ۱۴ را ببینید .

ضمیمۀ ۱۴- ۳- ۳ تعریف اصطلاحات مهم

تعاریف فشار صدا ، توان صدا ، شدت صدا ، خط محیط فرضی و سطح صدای زمینه ، در بند ۴ ضمیمۀ ۱۴ ارائه شده است .

۱۴- ۴ اندازه گیری و مدار اندازه گیری

تست سطح صدا با اندازه گیری سطح فشار صدا و یا سطح شدت صدای عمود(normal) به روشی که فقط در IEC [7] توضیح داده شده است انجام می شود. معمولاً اندازه گیری سطح فشار صدا با وزن دهی A متداول است .

اندازه گیری سطح شدت صدا در موارد خاصی کاربرد دارد بویژه در مواردی که تعدد منابع صدا موجب دشواری و حتی امکان ناپذیری تست به روش های متداول می شود . مثلاً برای حالتیکه اختلاف سطح صدای گارانتی شده با صدای زمینه کمتر از ۳ dB باشد [30] ، [7] . این روش در اینجا توضیح داده نخواهد شد . (بند 12 ، IEC 60076-10 [7] و پیش نویس IEC 60076-10-1 : راهنمای کاربر [30] بند 5.3 را ببینید) .

مطابق IEC [7] ، نحوة برقدار کردن مورد آزمایش بایستی مطابق توافق سازنده و خریدار باشد . کلمة " برقدار شدن " هم به معنی حالت بی باری و هم حالت بار است ؛ ترکیبات مجاز به شرح زیر است :

- ترانسفورماتور برقدار ، تجهیزات خنک کننده و پمپ ها خاموش
- ترانسفورماتور برقدار ، تجهیزات خنک کننده و پمپ ها روشن
- ترانسفورماتور برقدار ، تجهیزات خنک کننده خاموش ، پمپ ها روشن
- ترانسفورماتور بی برق ، تجهیزات خنک کننده و پمپ ها روشن

مطابق IEEE [51] تجهیزات خنک کننده بایستی متناسب با توان نامی مورد نظر برای ترانسفورماتور ، برقدار باشند .

برای اندازه گیری نویز حالت بی باری (سطح فشار صدا مطابق IEC و IEEE یا سطح شدت صدا مطابق IEC) ، مدار اندازه گیری مشابه مدار تست بی باری است ؛ ولتاژ باید با ولت متر متوسط سنج تنظیم شود (بخش ۶ را ببینید) .

برای اندازه گیری نویز حالت بار مطابق IEC [7] مدار اندازه گیری مشابه مدار تست بار است (بخش ۵ را ببینید) . برای بدست آوردن سطح صدای کل لازم است نویز بار با صدای بی باری طبق رابطة ارائه شده در بند ۳ ضمیمة ۱۴ ترکیب شود .

در مورد موقعیت میکرفن ها ، بخش ۳- ۵- ۵ و IEC [7] ، IEEE [51] را ببینید .

۱۴- ۵ فرآیند اندازه گیری

۱۴- ۵- ۱ نکتة مهم

بر خلاف سایر تست ها ، نزدیک شدن پرسنل آزمایشگاه به ترانسفورماتور مورد آزمایش در حال تست صدا غیر قابل اجتناب است .

بنابراین برای جلوگیری از نزدیکی بیش از حد نفرات یا میکرفن ها به هادی های فشارقوی لازم است هر اقدام پیشگیرانه از قبل صورت گیرد . می توان یک نفر را برای این منظور در طول تست موظف نمود . گاهی لازم است نقاط اندازه گیری برای رعایت فواصل ایمنی جابجا شود .

۱۴- ۵- ۲ مکان تست

ترانسفورماتور مورد آزمایش بایستی در حد امکان دور از دیواره های منعکس کنندة صدا یا سایر تجهیزات قرار گیرد تا اثر انعکاسات یا امواج ایستا به حداقل برسد . بایستی از قرار دادن دیواره های مخزن ترانسفورماتور بطور موازی با دیوارهای آزمایشگاه یا سایر اجسام بزرگ اجتناب کرد .

ترانسفورماتور باید بر روی چرخ یا تیغه های زیر خود قرار گیرد . در صورت عدم امکان نصب چرخ ها بایستی نگهدارنده هایی در محل چرخ ها نصب گردند بطوریکه ارتفاع ترانسفورماتور (نسبت به زمین یا ریل های جابجایی) کمتر از حالت اصلی بهره برداری آن نگردد .

۱۴- ۵- ۳ شرایط تست

اگر از ترانسفورماتور واسطه ای برای تنظیم ولتاژ بین ژنراتور و ترانسفورماتور مورد آزمایش استفاده می شود و این ترانسفورماتور داخل سالن آزمایشگاه قرار دارد ، اتّصال تست بایستی به نحوی انجام گیرد که میزان القای صدا به حداقل برسد و سطح نویز اندازه گیری شده مینیمم گردد .

سینوسی بودن ولتاژ تحریک و حفظ دامنه و فرکانس آن در حد نامی (جریان بار در اندازه گیری سطح صدای بار) در کل مدت اندازه گیری حائز اهمیت است .

همچنین لازم است زمان لازم برای غیر مغناطیس شدن هسته قبل از شروع تست سپری شود زیرا ، شار DC پس ماند سبب ایجاد هارمونیک های زوج در طیف فرکانس صدا شده و سطح صدای کل را چندین dB افزایش می دهد . این زمان برای ترانسفورماتورهای قدرت با اندازة متوسط حدود ۲۰- ۱۰ دقیقه و برای ترانسفورماتورهای قدرت پنج ستونه چندین ساعت است .

۱۴- ۵- ۴ نقاط و دستگاههای اندازه گیری

مطابق IEC 60076-10 [7] ، [30]

خنک شوندگی طبیعی با هوا (و یا در حالت خاموش بودن دمنده ها) :

- خط محیط فرضی بایستی فاصله ای برابر m ۰/۳ از سطح منتشر کنندة اصلی صدا داشته باشد .

خنک شوندگی اجباری با هوا :

- خط محیط فرضی بایستی فاصله ای برابر m ۲ از سطح منتشر کنندة اصلی صدا داشته باشد .

برای ترانسفورماتورهای با ارتفاع مخزن > ۲/۵ m :
اندازه گیری بایستی در نصف ارتفاع مخزن انجام گیرد .

برای ترانسفورماتورهای با ارتفاع مخزن ≤ ۲/۵ m :
اندازه گیری بایستی در ۳ / ۱ و ۳ / ۲ ارتفاع مخزن انجام گیرد .

محل های قرار گرفتن میکرفن بایستی روی خط محیط فرضی و به فاصلة حداقل ۱m از هم باشد ؛ (IEC 60076-10 ، شکل 5-1 [7]) و شکل ۱۴- ۱ را ببینید .

اندازه گیری بایستی با استفاده از صدا سنج نوع 1 مطابق IEC 60651 [31] انجام و کالیبراسیون مطابق بند 5.2 ، ISO 3746 [70] صورت گیرد .

مطابق IEEE Std C57.12.90 [51]

خنک شوندگی طبیعی :

- صفحه اندازه گیری (measuring surface) بایستی فاصله ای برابر با ۰/۳ m (۱ ft) از صفحه مبنای مولد صدا داشته باشد .

خنک شوندگی اجباری :

- صفحه اندازه گیری بایستی از تمام نقاط رادیاتور ، خنک کننده یا لوله های خنک شونده با جریان هوا ۲ m فاصله داشته باشد (شکل 29 ، IEEE Std C57.12.90 را ببینید) .

برای ترانسفورماتورهای با ارتفاع مخزن > ۲/۴ m (۷/۲ ft) : اندازه گیری بایستی در نصف ارتفاع مخزن انجام گیرد .

برای ترانسفورماتورهای با ارتفاع مخزن ≤ ۲/۴ m (۷/۲ ft) : اندازه گیری بایستی در ۱/۳ و ۲/۳ ارتفاع مخزن انجام گیرد .

محل های قرار گرفتن میکرفن بایستی روی صفحة اندازه گیری (خط محیط فرضی) و به فاصلة حداقل ۱ m از هم باشد ؛ (شکل 29 ، IEEE C57.12.90 [51] را ببینید) .

اندازه گیری بایستی با تجهیزات نوع 1 منطبق بر الزامات ANSI S1.4-1983 [59] انجام گیرد .

کالیبراسیون

لازم است تجهیزات اندازه گیری بلافاصله قبل و بعد از تست توسط کالیبراتور کالیبره شود . اگر میزان انحراف از ۰/۳ dB مطابق IEC [7] یا ۱ dB مطابق IEEE [51] بیشتر گردد ، اندازه گیری غیر معتبر است .

تصحیح مربوط به انعکاسات ناخواستة صدا (فقط IEC [7])

IEC 60076-10 ضریب تصحیح مربوط به محیط K را تعریف می کند و انعکاسات ناخواسته را مد نظر قرار می دهد ، بند ۵ ضمیمة ۱۴ را ببینید .

IEEE Std C57.12.90 [51] تصحیح مربوط به محیط را مجاز نمی داند . طبق تصریح این استاندارد هیچ سطح منعکس کننده ای غیر از کف زمین نباید در فاصلة کمتر از ۳ m از میکرفن قرار گیرد .

اندازه گیری سطح نویز زمینه

سطح فشار صدای با وزن دهی A مربوط به زمینه بایستی بلافاصله قبل از شروع تست اندازه گیری شود . ارتفاع میکرفن (ها) بایستی مشابه موقعیت مربوط به تست باشد . اندازه گیری زمینه بایستی روی خط محیط فرضی انجام گیرد .

در صورتی که اختلاف اندازه ها کمتر از ۵ dB (مطابق IEC [7]) یا ۳ dB (مطابق IEEE [51]) باشد ، سطح زمینه با محاسبة متوسط حسابی اندازه ها بدست می آید .

POWEREN.IR

در غیر اینصورت بایستی از رابطة زیر استفاده کرد :

$$L_{bg} = 10 \cdot \log_{10}\left(\frac{1}{M}\sum_{i=10}^{M} 10^{0,1L_{bgi}}\right)$$

که در آن :

L_{bg} = متوسط سطح فشار صدای زمینه

M = تعداد نقاط اندازه گیری زمینه ، بین ۱ و ۱۰ مطابق IEC [7] ، بند 11.2 یا حداقل ۴ مطابق IEEE [51]

L_{bgi} = سطح فشار صدای زمینه در نقطة اندازه گیری i

توالی تست

لازم است بلافاصله پس از اندازه گیری زمینه ، سطح فشار صدا با وزن دهی A برای تمام نقاط اندازه گیری گردد . صدا سنج را باید در حالت اندازه گیری سریع (fast) قرار داد تا از ثبت نویزهای ناخواستة زمینه جلوگیری شود .

متوسط تصحیح نشدة سطح فشار صدا با وزن دهی A $\overline{L_{pA0}}$ بایستی از اندازه های سطح فشار صدا L_{pAi} محاسبه گردد .

اگر محدودة مقادیر اندازه گیری شدة L_{pAi} از ۵ dB (یا ۳ dB مطابق IEEE [51]) تجاوز نکند ، می توان بسادگی از متوسط- یابی حسابی استفاده کرد . در غیر این صورت رابطة زیر معتبر است :

$$\overline{L_{pA0}} = 10 \cdot \log_{10}\left(\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N} 10^{0,1L_{pAi}}\right)$$

که در آن :

$\overline{L_{pA0}}$ = متوسط تصحیح نشدة سطح فشار صدا

N = تعداد نقاط اندازه گیری

L_{pAi} = سطح فشار صدای اندازه گیری شده در نقطة i

پس از پایان تست ، اندازه گیری مجدد زمینه بایستی صورت گیرد .

مطابق IEC 60076-10 [7] تست در صورتی معتبر است که اختلاف بین سطح زمینه اندازه گیری شده قبل و بعد از تست کمتر از ۳ dB باشد . برای جزئیات بیشتر بند 11.3 از [7] را ببینید که اعتبار تست را برای حالتی که اختلاف بین سطح صدای تعیین شده و زمینه کمتر از ۸ dB است نیز بررسی می کند .

متوسط تصحیح شدة سطح فشار صدا با وزن دهی A ، $\overline{L_{pA}}$ بایستی با رابطة زیر محاسبه شود :

$$\overline{L_{pA}} = 10 \cdot \log_{10}(10^{0,1\overline{L_{pA0}}} - 10^{0,1\overline{L_{bgA}}}) - K$$

IEEE Std C57.12.90 [51] تصحیح مربوط به محیط را مجاز نمی داند ولی برای حالتی که اختلاف سطح فشار صدای ترکیبی ترانسفورماتور و محیط با سطح صدای محیط کوچکتر یا مساوی ۱۰ و بزرگتر از ۵ باشد ضرایب تصحیحی را معین می کند ؛ جدول 8 بند 13.3.1 از استاندارد IEEE [51] را ببینید .

محاسبهٔ سطح توان صدا

اگر مقدار توان صدا گارانتی شده باشد ، می توان آن را با استفاده از رابطهٔ زیر و متوسط تصحیح شدهٔ سطح فشار صدا $\overline{L_{pA}}$ بدست آورد :

$$L_{wA} = \overline{L_{pA}} + 10 \cdot \log_{10} \frac{S}{S_0}$$

که در آن :

S = مساحت سطح اندازه گیری بر حسب m^2 ، محاسبه شده طبق روابط بند ۵ ضمیمهٔ ۱۴ .

برای مثال بند ۶ ضمیمهٔ ۱۴ را ببینید .

اندازه گیری ها و محاسبات محل نصب

در مورد محاسبات محل نصب بند ۷ ضمیمهٔ ۱۴ را ببینید .

برخی از مشتریان نیاز دارند که سطح نویز را در فاصلهٔ نسبتاً دوری در اطراف ترانسفورماتور در محل نصب آن بدانند . هنگام اندازه گیری سطح صدا در سایت لازم است پارامترهای تأثیرگذار همچون موارد زیر در نظر گرفته شود :
ضریب توان بار ، جریان بار ، ولتاژ بهره برداری ، هارمونیک های ولتاژ و جریان ، مغناطیس شدگی DC و غیره .

کنترل سطح صدای زمینه آسان نیست ، حتّی اگر اندازه گیری در شب با ترافیک پایین و عدم وجود سایر عوامل جوی همچون باران و صدای حیوانات ، پرندگان و حشرات انجام گیرد .

۱۴- ۶ عدم قطعیت اندازه گیری

اگر دستگاههای اندازه گیری بطور صحیح مطابق استانداردهای مربوطه تولید و نگهداری شود ، عدم قطعیت کمتر از ۱ dB خواهد بود . اما عوامل زیر تأثیر زیادی بر عدم قطعیت اندازه گیری دارند :

- تنظیم ولتاژ : ۱% تغییر ولتاژ در چگالی شار ۱/۶ T و یا ۱/۸ T به ترتیب موجب ۰/۵ و یا ۱ dB خطا می شود .
- هارمونیک های ولتاژ تحریک
- پس ماند مغناطیس شدگی DC هسته (تا ۳ dB خطا در صورت شروع اندازه گیری به محض برقدار کردن)
- خطا در فاصلهٔ مکانی اندازه گیری
- کم بودن فاصلهٔ ته مخزن و کف زمین (افزایش صدا تا ۴ dB)
- انعکاس دیوارهای آزمایشگاه (بویژه برای اندازه گیری مطابق استاندارد IEEE اهمیت دارد ، زیرا این استاندارد اجازهٔ تصحیح مربوط به محیط را نمی دهد)
- کم بودن اختلاف سطح زمینه با صدای ترانسفورماتور

ضمیمة ۱۴ :

اندازه گیری سطح صدا

ضمیمة ۱۴- ۱ حس شنوایی انسان [106]

حس شنوایی انسان بیشتر لگاریتمی است تا نسبی . صدایی با افزایش ده برابر با دو برابر حساسیت دریافت می شود . این حس وابسته به فرکانس نیز هست و حداکثر دریافت در Hz ۱۰۰۰ صورت می گیرد . صداهای با فرکانس بالاتر یا پایین تر از Hz ۱۰۰۰ به نظر دارای سطح فشار صدایی کمتر از صداي موج Hz ۱۰۰۰ هستند .

برای آسان تر کردن ثبت و محاسبة محدودة وسیعی از مقادیر شدت صدا ، مقدار مطلق با لگاریتم آن جایگزین می شود . این لگاریتم (log_{10}) معمولاً بر حسب بل (Bel) یا دسی بل (یک دهم عدد بر حسب بل) و یا به اختصار با واحد [dB] بیان می شود . با روش وزن دهی متداول ، مقدار بدست آمده با واحد dB(A) نشان داده می شود . وزن دهی dB(A) بر روی ۴۰ dB یعنی بر روی مقدار واقعی (typical) نویز زمینه تنظیم می شود . تضعیف نسبی آن در Hz ۱۰۰۰ برابر صفر و در Hz ۱۰۰ برابر ۲۰ dB است ؛ با این یادآوری که حس شنوایی انسان هم به سطح نویز و هم به فرکانس وابسته است .

ضمیمة ۱۴- ۲ تخمین سطح توان صدای بار و تأثیر میزان بارگذاری بر آن [7]

برای تصمیم گیری در مورد لزوم اندازه گیری صدای بار ، مقدار تخمینی سطح توان صدای بار را می توان از رابطة زیر بدست آورد :

$$L_{WA,IN} \approx 39 + 18 \cdot \log_{10} \frac{S_r}{S_p}$$

که در آن :

$L_{WA,IN}$ = سطح توان صدا با وزن دهی A برای ترانسفورماتور در جریان نامی

S_r = توان نامی بر حسب MVA

S_p = توان مبنا (۱ MVA)

برای یک ترانسفورماتور ۲۵۰MVA مثلاً داریم :

$$L_{WA,IN} \approx 39 + 18\log_{10} 250 \approx 82 \text{ dB}$$

اگر $L_{WA,IN}$ به میزان ۸ dB یا بیشتر زیر سطح توان صدای گارانتی شده باشد ، اندازه گیری صدای بار توصیه نمی شود .

اگر امکان انجام اندازه گیری فقط با جریان کاهش یافتة I_R ممکن باشد ، سطح توان صدا در جریان نامی I_r با افزودن مقدار زیر بدست می آید :

$$40 \cdot \log_{10} \frac{I_r}{I_R}$$

ضمیمه ۱۴- ۳ ترکیب صدای بی باری و صدای بار [7]

مطابق IEC 60076-10 [7] می توان سطح صدا را جداگانه در دو حالت اندازه گیری و آنها را به روش محاسباتی با هم ترکیب نمود تا سطح توان صدای کل در طی بهره برداری واقعی بدست آید .

$$L_{WASN} = 10 \cdot \log_{10}(10^{0,1L_{WAUN}} + 10^{0,1L_{WAIN}})$$

که در آن :

L_{WASN} = سطح توان صدای ترانسفورماتور با وزن دهی A در ولتاژ نامی سینوسی و جریان نامی سینوسی

L_{WAUN} = سطح توان صدای ترانسفورماتور با وزن دهی A در ولتاژ نامی سینوسی و بی باری

L_{WAIN} = سطح توان صدای ترانسفورماتور با وزن دهی A در ولتاژ اتّصال کوتاه سینوسی و جریان نامی (یکی از سیم پیچ ها اتّصال کوتاه)

ضمیمه ۱۴- ۴ تعاریف [7]

ضمیمه ۱۴- ۴- ۱ فشار صدا

فشار صدا p (sound pressure)

جمع فشار متغیر و فشار استاتیک ناشی از صدا ؛ با واحد پاسکال [Pa] بیان می شود .

سطح فشار صدا L_p (sound pressure level)

ده برابر لگاریتم (بر مبنای ۱۰) نسبت مجذور فشار صدا به مجذور فشار صدای مبنا P_0 ، که در آن $P_0 = 20 \cdot 10^{-6}$ Pa ؛ این مقدار بر حسب دسی بل [dB] سنجیده می شود :

$$L_p = 10 \cdot \log_{10} \frac{p^2}{p_0^2}$$

ضمیمه ۱۴- ۴- ۲ توان صدا

توان صدا W (sound power)

نرخ تشعشع انرژی صوتی از یک منبع ؛ با واحد وات [W] بیان می شود .

سطح توان صدا L_W (sound power level)

ده برابر لگاریتم (بر مبنای ۱۰) نسبت توان صدای معین به توان صدای مبنا $W_0 = 1 \cdot 10^{-12}$ W ؛ این مقدار بر حسب دسی بل [dB] سنجیده می شود :

$$L_W = 10 \cdot \log_{10} \frac{W}{W_0}$$

ضمیمهٔ ۱۴- ۴- ۳ شدت صدا (تنها در IEC [7] تعریف شده است)

شدت صدا I (sound intensity)

یک کمیت برداری است که مقدار و جهت جریان خالص انرژی صوتی را در یک مکان معین تعیین می کند ؛ واحد آن W/m^2 است .

شدت صدای عمودی I_N (Normal sound intensity)

مولفهٔ شدت صدا در جهت عمود بر صفحهٔ مورد اندازه گیری .

سطح شدت صدای عمودی L_I

ده برابر لگاریتم (بر مبنای ۱۰) نسبت شدت صدای عمود بر مقدار شدت صدای مبنا $I_0 = 1.10^{-12}$ وات بر متر مربع ؛ این مقدار بر حسب [dB] بیان می شود :

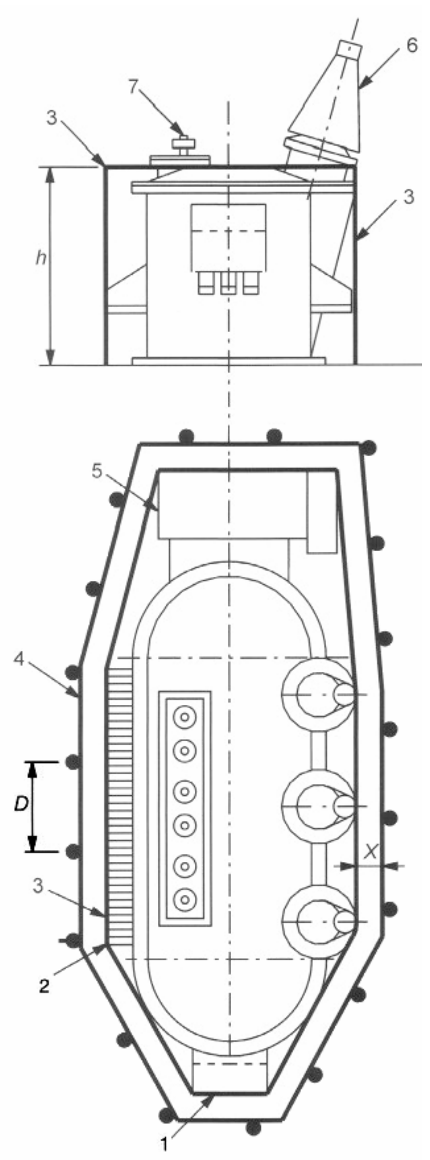
$$L_I = 10 \cdot \log_{10} \frac{|I_N|}{I_0}$$

خط محیط فرضی (Prescribed contour)

خطی افقی که نقاط اندازه گیری روی آن قرار دارند ، به فاصلهٔ معین افقی (فاصلهٔ اندازه گیری) از صفحهٔ منتشر کنندهٔ اصلی (principal radiating surface) ، شکل ۱۴- ۱ را ببینید .

نویز زمینه

سطح فشار صدا با وزن دهی A در حالیکه ترانسفورماتور و تجهیزات خنک کنندهٔ مورد آزمایش بی برق باشند .



1 = بوشینگ های سیم پیچ سوم
2 = پشت بندها و قلاب های حمل
3 = سفحهٔ منتشر کنندهٔ اصلی
4 = خط محیط فرضی
5 = کلید تنظیم ولتاژ زیر بار
6 = بوشینگ HV
7 = بوشینگ LV
D = فاصلهٔ میکروفن ها
h = ارتفاع مخزن
X = فاصلهٔ اندازه گیری

شکل ۱۴- ۱ : مکان واقعی میکروفن برای اندازه گیری سطح صدای ترانسفورماتور بدون تجهیزات خنک کننده؛ با شکل 1 IEC60076-10(2001) مقایسه کنید .

ضمیمة ۱۴- ۵ محاسبة ضریب تصحیح محیط K [51]

ضریب تصحیح K عبارت است از :

$$K = 10 \cdot \log_{10}\left(1 + \frac{4}{A/S}\right)$$

که در آن :

S = مساحت سطح اندازه گیری بر حسب متر مربع مطابق روابط زیر :

$$S = \begin{cases} 1{,}25 \cdot h \cdot l_m , x = 0{,}3m \\ (h+2) \cdot l_m , x = 2m \end{cases}$$

$$A = \alpha \cdot S_v$$

که در آن :

A = ضریب واسط
α = ضریب متوسط جذب صدا (جدول 1 ، IEC 60076-10 را ببینید)
S_v = مساحت سطح کل سالن آزمایش بر حسب m^2
x = فاصلة بین میکروفن و ترانسفورماتور مورد آزمایش بر حسب m
h = ارتفاع مخزن ترانسفورماتور بر حسب m
l_m = طول خط محیط فرضی که نقاط اندازه گیری روی آن قرار دارند بر حسب m

ضریب متوسط جذب صدا α بین ۰/۵ (برای سالن با مواد جاذب صدا روی سقف و دیوارها) و ۰/۰۵ (برای سالن با دیوارهای بتنی یا آجری) در نوسان است .

برای یک آزمایشگاه مناسب بایستی $A/S \leqslant$ ۱ باشد . بدین ترتیب میزان تصحیح مربوط به محیط $K \leq$ ۷ dB خواهد بود .

برای سالن ها و کارگاههای بسیار بزرگ که کاملاً بسته نیستند مقدار K به صفر dB میل می کند .

برای مثال :

برای ترانسفورماتوری با توان نامی ۴۵۰ MVA :

H = ۴/۳ m
S = ۴۰۹/۵ m^2

و ترانسفورماتور مورد آزمایش در آزمایشگاهی با مساحت S_v = ۲۷۱۰ m^2 و ضریب جذب α = ۰/۲۵ :

A = ۰/۲۵ * ۲۷۱۰ = ۶۷۷/۵ m^2

ضریب تصحیح K عبارت است از :

$$K = 10\log_{10}\left(1 + \frac{4}{677{,}5 / 409{,}5}\right) = 5{,}3 \text{ dB}$$

ضمیمة ۱۴- ۶ محاسبة سطح توان صدا ، مثال

برای ترانسفورماتور با توان نامی ۴۵۰ MVA با خنک شوندگی OFAF

H = ۴/۳ ، l_m = ۶۵ m

سطح فشار صدای متوسط تصحیح شده : ۶۴/۵ dB

محاسبه مطابق IEC [7] :

S = (h +۲) . l_m = (۴/۳ +۲) * ۶۵ = ۴۰۹/۵ m^2

$$L_{wA} = \overline{L_{pA}} + 10 \cdot \log_{10} \frac{S}{S_0} =$$

= ۶۴/۵ + ۱۰ * $\log_{10}$ ۴۰۹/۵ = ۹۰/۵ dB

محاسبه مطابق IEEE [51] :

S = ۱/۲۵ * Hl_m = ۱/۲۵ * ۴/۳ * ۶۵ = ۳۴۹ m^2

$$L_{wA} = \overline{L_{pA}} + 10 \cdot \log_{10} \frac{S}{S_0} =$$

= ۶۴/۵ + ۱۰ * $\log_{10}$ ۳۴۹ = ۹۰/۰ dB

ضمیمة ۱۴- ۷ محاسبات محل نصب

محاسباتی تقریبی برای سطح فشار صدا با وزن دهی A ، L_{pAR} در فاصلة R متـری از مرکز ترانسفورماتور با استفاده از رابطة زیر انجام می شود :

$$L_{pAR} = L_{WA} - 10\log_{10}\frac{S_h}{S_0}$$

که در آن :

S_h = $2\pi \cdot R^2$ برای $R >$ ۳۰ m

L_{WA} = سطح توان صدا با وزن دهی A

برای مثال :

برای ترانسفورماتوری با سطح توان صدای ۸۷ dB ، در فاصلة ۳۰۰ m داریم :

S_h = ۲ π * ۳۰۰^۲ = ۵۶۵۴۸۷ m²

L_{pA300} = ۸۵ - ۱۰ * $\log_{10}$ ۵۶۵۴۸۷ = ۲۹/۵ dB

تست ترانسفورماتورهای قدرت

۱۵- تست کلید تنظیم ولتاژ زیر بار و سایر تجهیزات جانبی

۱۵- ۱ مراجع / استانداردها

- IEC 60076-1 (2000), Power transformers – Part 1 , Clause 10.8: " Test on on-load tap-changers" [1]
- IEC 60076-3 (2000) , Power transformers – Part 3 , Clause 10 : " Insulation of auxiliary wiring " [3]
- IEEE Std. C57.12.00 (2000) , table 19 and clause 8.2.3: " Dielectric test for low voltage control wiring, associated control equipment and current transformer secondary circuits, on Class II power transformers"

توجّه :

این تست ها مطابق IEC [1],[3] **تست روتین** محسوب می شود ؛ تست دی الکتریک تجهیزات کمکی برای ترانسفورماتورهای کلاس II مطابق با IEEE [50] **تست روتین** و برای ترانسفورماتورهای پائین تر از کلاس II **تست " دیگر "** می باشد .

۱۵- ۲ منظور از تست / کلّیات

اگر چه برای هر کلید تنظیم ولتاژ زیر بار تست های روتین در آزمایشگاه سازندهٔ آن مطابق استاندارد مربوطه [9] انجام می شود ، امّا لازم است عملکرد صحیح کلید پس از مونتاژ کامل آن بر روی ترانسفورماتور کنترل شود .

لازم است همهٔ تجهیزات کنترلی دیگر ، در ارتباط با این تست ، برای تأیید عملکرد حفاظتی صحیح آنها تست شوند .

۱۵- ۳ روش تست [1] / مدار تست

برای کلید تنظیم ولتاژ زیر باری (on-load) که به صورت کامل بر روی ترانسفورماتور مونتاژ شده است تست های زیر باید بدون وقوع خطا انجام شود (فقط برای ترانسفورماتورهایی که توسط استانداردهای IEC مشخص شده اند) :

۱۵- ۳- ۱ ترانسفورماتور برق دار نشده

- ۸ دور عملکرد کامل در ولتاژ نامی تغذیه موتور کلید (یک دور عبارت است از حرکت از ابتدا تا انتهای تپ ها و برگشتن دوباره) .
- یک دور عملکرد کامل با ولتاژ تغذیة کاهش یافته به مقدار ۸۵ % ولتاژ نامی موتور کلید .

۱۵- ۳- ۲ ترانسفورماتور برق دار شده

- یک دور عملکرد کامل در حالت بی باری ترانسفورماتور در ولتاژ و فرکانس نامی .
- ۱۰ بار عملکرد کلید در دو پله بالا و پایین حول پله ای که سلکتور سویچ (coarse or reversing change-over selector) عمل می کند و یا حول پلهٔ نامی در حالیکه جریان نامی از سیم پیچ اتّصال کوتاه شده عبور می کند .

مدار آزمایش برای تست عملکرد با ولتاژ نامی ، شبیه مدار اندازه گیری تلفات بی باری (بخش ۶) و مدار آزمایش برای تست عملکرد با جریان نامی ، شبیه مدار اندازه گیری تلفات بار (بخش ۵) می باشد .

کنترل چشمی عملکرد کلید هنگام برق دار بودن ترانسفورماتور و گوش دادن به صداهای غیر عادی توصیه می شود .

۱۵- ۴ تست تجهیزات جانبی [50] , [3]

همهٔ سیم بندی های مدارات کنترل و قدرت جانبی لازم است تحت تست AC اعمالی با ولتاژ r.m.s ۲ kV نسبت به زمین به مدّت ۱ دقیقه قرار گیرند [3] . مطابق استاندارد IEEE C57.12.00 [50] ، ولتاژ تست AC اعمالی ، r.m.s ۱/۵ kV برای تجهیزات کمکی و r.m.s ۲/۵ kV برای مدارات ترانسفورماتور جریان می باشد .

توجّه :
چون بعضی از دستگاههای جانبی (مثل موتورها و سایر دستگاهها) ولتاژ تست کمتری نسبت به سیم بندیشان دارند ، باید قبل از تست از مدار جدا شوند [3] .

۱۵- تست کلید تنظیم ولتاژ زیر بار و سایر تجهیزات جانبی

تست ترانسفورماتورهای قدرت

۱۶- اندازه گیری هارمونیک های جریان بی باری

۱۶- ۱ مراجع / استانداردها

- IEC 60076-1 (2000) Power transformers- Part 1 General [1]

توجه :

مطابق استاندارد IEC [1] این **یک تست ویژه** است ؛ در استاندارد IEEE [50] ، [51] این تست ذکر نشده است .

۱۶- ۲ منظور از اندازه گیری

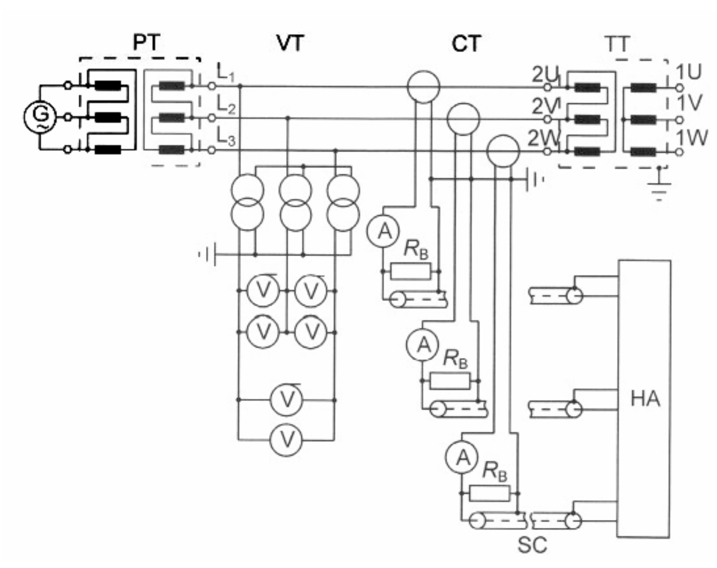
بدلیل رابطهٔ غیر خطی بین شدت میدان مغناطیسی H و چگالی شار B (منحنی مشخّصهٔ مغناطیسی) ، با اعمال ولتاژ سینوسی به ترانسفورماتور جریان مغناطیس کنندگی غیر سینوسی خواهد بود .

در مورد ترانسفورماتورهای قدرت مدرن با جریان بی باری پایین در حدود ۰/۱ تا ۰/۵ % جریان نامی ، دانستن میزان هارمونیک های جریان بی باری آنچنان مورد علاقه نیست .

در مورد ترانسفورماتورهای قدیمی در حال بهره برداری در شبکه بویژه برای تنظیم رله های الکترومکانیکی رایج اغلب مشتریان به دانستن میزان هارمونیک های جریان بی باری علاقه دارند .

۱۶- ۳ کلّیات

جریان بی باری کاملاً به چگالی شار ترانسفورماتور وابسته است . این موضوع در شکل ۱۶- ۲ دیده می شود . هارمونیک های جریان نیز با افزایش چگالی شار بیشتر می شود ، شکل ۱۶- ۳ را ببینید .



G = ژنراتور
PT = ترانسفورماتور واسط
VT = ترانسفورماتور ولتاژ
CT = ترانسفورماتور جریان
$\bar{V}$, V = ولت مترها (r.m.s و متوسط سنج)
A = آمپرمتر
TT = ترانسفورماتور موردآزمایش
R_B = مقاومت اندازه گیری
HA = آنالایزر هارمونیک
SC = اتصالات شیلد دار

شکل ۱۶- ۱ : مدار اندازه گیری برای آنالیز هارمونیک های جریان بی باری

۱۶- ۴   مدار اندازه گیری [100]

مدار اندازه گیری کاملاً مشابه مدار انـدازه گیـری تلفـات و جریـان بـی بـاری بـه کمـک پاور آنالایزر می باشد (بخش ۶ را ببینید) .

همچنین مدار آن مشابه مدار اندازه گیری بی باری با دستگاههای اندازه گیری قدیمی تـر است با این تفاوت که آنالایزر هارمونیک در کنار یکی از آمپرمترها قرار می گیرد ، شـکل ۱۶- ۱ را ببینید .

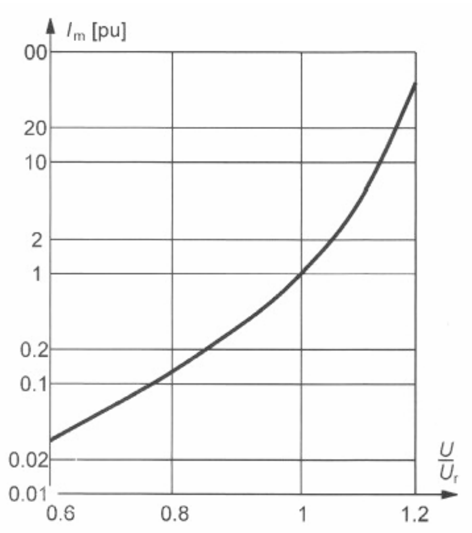
مسئله اعوجاج ولتاژ برای ایـن تسـت بسـیار مهـم اسـت (بخـش ۶ را ببینیـد) . میـزان هارمونیک ها بایستی با اعمال ولتاژ سینوسی اندازه گیری شود . بنابراین برای اطمینـان از خطی بودن مشخّصة مغناطیسـی لازم اسـت اتّصـالات ژنراتـور و ترانسـفورماتور واسـطه به درستی انتخاب شده باشد ، توان ژنراتور و ترانسفورماتور واسطة بکـار رفتـه بایسـتی در حد امکان بزرگ باشد .

۱۶- ۵   فرآیند اندازه گیری

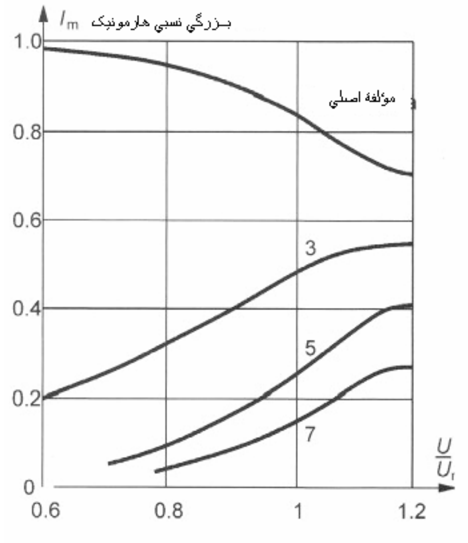
ولتاژ لازم برای تست با استفاده از یک ولت متر متوسط سنج تنظیم مـی شـود . معمـولاً اندازه گیری در ۹۰ % ، ۱۰۰ % و ۱۱۰ % ولتاژ نامی ترانسفورماتور انجام می گیـرد . ولتـاژ از صفر تا ولتاژ نهایی به تدریج بالا برده می شود . وصـل لحظـــه ای ولتـــاژ موجب پدیدة جریان هجومی و ایجاد مؤلفة DC می شود . این مؤلفة DC ممکـن اسـت هسـتة ترانسفورماتور ولتاژ را اشباع کرده عدم قطعیت اندازه گیری را افـزایش دهـد . بـه همـین دلیل لازم است کاهش ولتاژ به تدریج انجام شود و از قطع ناگهانی تغذیه خودداری شود .

۱۶- ۶   چند مثال

چند مثال از آنالیز هارمونیک های جریان بی باری در بند ۲ ضمیمة ۱۶ ارائه شده است .



شکل ۱۶- ۲ : جریان مغنـاطیس کننـدگی بـا واحـد پریونیت بر حسب چگالی شار



شکل ۱۶- ۳ : میزان هارمونیک ها بر حسب چگالی شار

ضمیمهٔ ۱۶ :

اندازه گیری هارمونیک های جریان بی باری

ضمیمهٔ ۱۶- ۱ ارتباط چگالی شار ، جریان بـی بـاری و میـزان هارمونیک ها [106]

جریان مغناطیس کنندگی کاملاً به چگالی شار وابسته است ، شکل ۱۶- ۲ را ببینید .

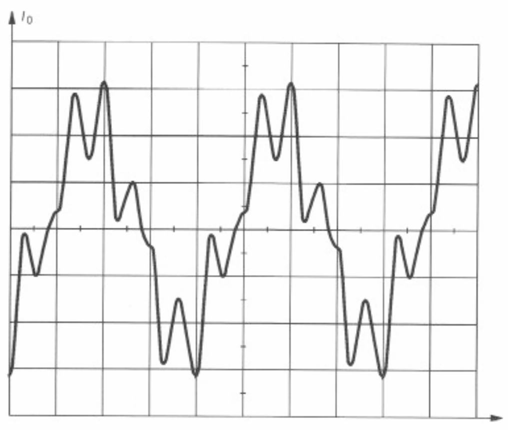
میزان هارمونیک ها نیز به چگالی شار وابسته است . در کل می توان گفت که چگالی شار بیشتر معادل میزان هارمونیک های بیشـتر اسـت . مهمتـرین هارمونیـک هـا عبارتنـد از هارمونیک سوم ، پنجم و هفتم (شکل ۱۶- ۳) .

ضمیمهٔ ۱۶- ۲ مثال

مثال ۱

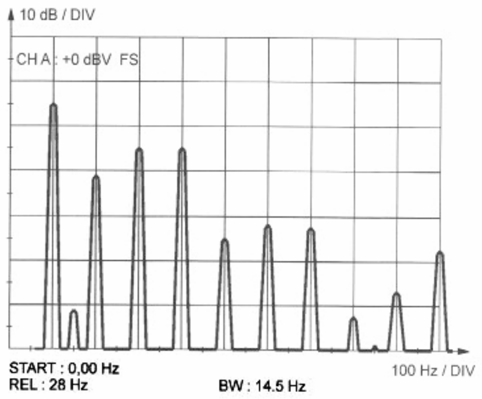
ترانسـفورماتور نیروگـاهی ۴۶۵ MVA ، ۵۰ HZ ، ۲۱ kV / ۴۱۰ ، ۱۲۷۸۴ A / ۶۵۵ ، YNd1 ؛ هستهٔ پنج ستونه ؛

شکل ۱۶- ۴ موج جریان بی باری اندازه گیری شده در فاز U طرف LV ترانسـفورماتور را نشان می دهد ؛ شکل ۱۶- ۵ نتیجهٔ آنالیز هارمونیک ها را نشان می دهد .



I_0 = ۸/۵ A (فاز U) – ۰/۰۷ %

شکل ۱۶- ۴ : شکل موج جریان بی باری در ۱۰۰% ولتاژ نامی



شکل ۱۶- ۵ : آنالیز هارمونیک های جریان بی باری در ۱۰۰% ولتاژ نامی

آنالیز :

مرتبه	تضعیف [dB]	درصد مؤلفهٔ اصلی
۱	۰	۱۰۰
۳	-۱۸/۶	۱۱/۸
۵	-۱۱/۸	۲۵/۷
۷	-۱۱/۶	۲۶/۳
۹	-۳۲/۶	۲/۳
۱۱	-۲۹/۷	۳/۳
۱۳	-۳۰/۵	۳/۰
۱۵	-۵۰/۴	۰/۳
۱۷	-۴۵/۰	۰/۶
۱۹	-۳۵/۷	۱/۶

مثال ۲

اندازه گیری هارمونیک های جریان بـی بـاری (و ولتـاژ منبـع) ترانسـفورماتور سـه فـاز MVA ۱۰۰ ، Hz ۶۰ با استفاده از پاور آنالایزر در ۱۱۰% ولتاژ نامی :

تغذیه از طرف LV ، 2U ، 2V ، 2W

جریان بی باری						
مرتبه هارمونیک	دامنه [%] و زاویهٔ فاز [°]					
	2U		2V		2W	
۱	۱۰۰	۰	۱۰۰	۰	۱۰۰	۰
۳	۳۷	۱۷۹	۸۳	۸۳	۵/۸۱	۵۵
۵	۵۰/۶	۶۴	۱۴۴	۱۴۴	۶۰/۵	۱۳۰
۷	۴۰/۱	۱۱۶	۴۳	۴۳	۴۴/۷	۷۴
۹	۷/۷	۱۲۰	۱۶۷	۱۶۷	۰/۴۵	۰
۱۱	۱۳/۲	۲	۶۱	۶۱	۱۴/۷	۳۳
منبع ولتاژ						
مرتبه هارمونیک	دامنه [%] و زاویهٔ فاز [°]					
	2U		2V		2W	
۱	۱۰۰	۰	۱۰۰	۰	۱۰۰	۰
۳	۰/۱۱	۰	۰/۱۱	۰	۰/۰۴	۰
۵	۱/۴۵	۱۷۹	۰/۱۵	۱۷۷	۱/۳۷	۱۷۹
۷	۰/۴۳	۱۷۲	۰/۴۲	۱۷۹	۰/۴۹	۱۷۲
۹	۰/۰۷	۰	۰/۰۷	۰	۰/۰۲	۰
۱۱	۰/۱۵	۰	۰/۱۴	۵	۰/۱۷	۴

۱۶- اندازه گیری هارمونیک های جریان بی باری

تست ترانسفورماتورهای قدرت

۱۷- اندازه گیری مقاومت عایقی

۱۷- ۱ مراجع / استانداردها

- IEC 60076-1 (2000), Clause 10.1.3: Power transformers – Part 1 " General " [1]
- IEEE Std. 57.12.90 1999 , clause:10.11 " Insulation resistance tests " [51]

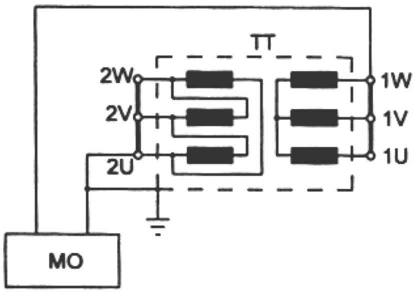
توجّه :

این تست مطابق استاندارد IEC [1] **تست ویژه** است امّا مطابق IEEE [50] برای ترانسفورماتورهای کلاس II **تست روتین** ، یا برای ترانسفورماتورهای کلاس I تست " دیگر " است . این موارد برای مقاومت عایقی بین هسته و زمین نیز معتبر است .

۱۷- ۲ منظور از اندازه گیری

تست مقاومت عایقی - تست میگر- برای تعیین مقاومت عایقی تک تک سیم پیچ ها نسبت به زمین یا بین سیم پیچ ها انجام می گیرد . دانستن مقاومت عایقی هنگام ارزیابی شرایط عایقی ترانسفورماتور مفید است .

امروزه روش های پیشرفتهٔ مختلفی برای تشخیص کیفیت سیستم عایقی بکار برده می شود . از آن جمله می توان به طیف سنجی دی الکتریک فرکانس پایین (FDS) ، اندازه گیری جریان پلاریزاسیون / دی پلاریزاسیون در حوزهٔ زمان (PDC) و طیف پلاریزاسیون ولتاژ برگشتی (RVM) اشاره کرد [207] .



TT = ترانسفورماتور مورد آزمایش
MO = مگا اهم متر

شکل ۱۷- ۱ : مدار تست ساده برای اندازه گیری مقاومت عایقی

۱۷- ۳ کلّیات

مقاومت عایقی معمولاً بر حسب مگا اهم (MΩ) اندازه گیری می شود .

باید تأکید کرد که تغییرات مقاومت عایقی از عوامل متعددی شامل : طراحی ، دما ، خشکی و تمیزی قطعات ، مخصوصاً بوشینگ ها ناشی می شود . هنگامی که مقاومت عایقی کمتر از مقدار مشخص شده باشد ، اغلب می توان با تمیز کردن و خشک کردن ، مقدار آن را تا حد مورد پذیرش افزایش داد .

مقاومت عایقی با ولتاژ اعمالی تغییر می کند . مقایسهٔ هر اندازه گیری باید در همان ولتاژ انجام گیرد .

IEEE Std C57.12.00 [50] اندازه گیری مقاومت عایقی بین هسته و زمین را نیز لازم می داند . این تست باید بعد از مونتاژ کامل ترانسفورماتور با حداقل سطح ولتاژ ۰/۵ kV DC به مدّت ۱ دقیقه انجام شود .

۱۷- ۴ مدار اندازه گیری / فرآیند اندازه گیری [51]

مدار اندازه گیری شباهت زیادی بـه مـدار تسـت ولتـاژ اعمـالی دارد (بخـش ۷) . همـة ترمینال های یک سیم پیچ (فشار قوی یا فشار ضعیف) به همدیگر وصـل مـی شـوند . فشارقوی نسبت به فشارضعیف و زمین ، و فشارضعیف نسبت به فشارقوی و زمین تسـت می شود . مخزن ترانسفورماتور زمین شده است . شکل ۱۷- ۱ مدار اندازه گیری را بـرای ترانسفورماتور دو سیم پیچه نشان می دهد .

معمولاً از مگا اهم مترهای با منبع تغذیة DC داخلی برای اندازه گیـری مقاومـت عـایقی استفاده می شود . ولتاژ نامی مگا اهـم مترهـای متـداول ۰/۵ kV ، ۱ kV ، ۲/۵ kV و ۵ kV DC است .

مدّت زمان اندازه گیری باید ۱ دقیقه باشد . معمولاً قرائت ها بعـد از ۱۵ ثانیـه و ۶۰ ثانیـه انجام می شود . نسبت بین مقادیر اندازه گیری بعد از ۶۰ ثانیه ($R60$) به ۱۵ ثانیه ($R15$) در حدود ۱/۳ تا ۳ می باشد ؛ این عدد معیاری برای وضعیّت عایقی می باشد .

دمای ترانسفورماتور مورد آزمایش باید ثبت شود ؛ این دما بایـد بـه دمـای مرجـع ۲۰ °C نزدیک باشد .

با همان مدار اندازه گیری می توان انـدیکس پلاریزاسـیون PI را تعیـین کـرد . نتیجـة تست PI ، نسـبتِ مقـدار ۱۰ دقیقـه بـه مقـدار ۱ دقیقـه اسـت . ایـن مقـدار ، انـدیکس پلاریزاسیون می باشد ، مثال ۲ ضمیمة ۱۷ را ببینید . مقدار PI ، راهنمـایی تقریبـی در مورد شرایط عایقی است .

مقادیر $PI > 2$ شرایط عایقی خوب را نشـان مـی دهـد و $PI < 1$ مربـوط بـه شـرایط غیر قابل پذیرش است .

مثالی از اندازه گیری مقاومت عایقی در ترانسفورماتور دو سیم پیچه در ضـمیمة ۱۷ ارائـه شده است .

POWEREN.IR

ضمیمة ۱۷ :

اندازه گیری مقاومت عایقی

مثال ۱

ترانسفورماتور سه فاز ۴۶۵ MVA ، ۵۰ Hz ، ۴۱۰ /۲۱ kV

مگا اهم متر : CHAUVIN ARNOUX Type ISOL 5002

ولتاژ تست : ۵ kV DC

دمای ترانسفورماتور : ۲۴/۵ °C

	HV به مخزن LV زمین شده	LV به HV و زمین
R15 [MΩ]	۲۰۰۰	۱۰۰۰
R60 [MΩ]	۳۰۰۰	۱۵۰۰
R60/*R15*	۱/۵	۱/۵

مثال ۲

اندازه گیری اندیکس پلاریزاسیون *PI*

اتو ترانسفورماتور تک فاز 500:3 MVA با ثالثیه :

۵۰ Hz ، ۴۰۰/√۳ / ۱۷۰/√۳ / ۳۰/۸ kV

ولتاژ تست : ۵ kV DC

دمای ترانسفورماتور : ۲۸ °C

زمان [min]	LV به HV مخزن زمین شده [GΩ]	LV به مخزن HV زمین شده [GΩ]
۱	۸	۱۰
۲	۱۲	۱۳
۳	۱۵	۱۵
۴	۱۸	۱۷
۵	۲۰	۱۹
۶	۲۲	۲۱
۷	۲۴	۲۳
۸	۲۶	۲۴
۹	۲۸	۲۵
۱۰	۲۹	۲۵
$T_{10}/T_1=PI$	۳/۶۲	۲/۵

تست ترانسفورماتورهای قدرت

۱۸- اندازه گیری ضریـــب تـلفات($\tan \partial$) خازن های سیستم عایق بندی

۱۸- ۱ مراجع / استانداردها

- IEC 60076-1 (2000), Clause 10.1.3: Power transformers – Part 1 General , " Measurement of the dissipation factor (tan δ) of the insulation resistance capacitances" [1]
- IEEE Std. 57.12.90-1999 , clause10.11: " Insulation power-factor tests " [51]

توجه :

این تست مطابق استاندارد IEC [1] **تست ویژه** می باشد ، اما بـرای ترانسـفورماتورهای کلاس II مطابق IEEE [50] **تست روتین** و برای ترانسفورماتورهای کـــلاس I **تست " دیگر"** است .

۱۸- ۲ منظور از تست

تست ضریب تلفات عایقی ، مشابه تست مقاومت عایقی می باشد و نتـایج مشخصـی را از شرایط عایقی ترانسفورماتور بدست می دهد .

اهمیت ضریب تلفات هنوز هم مورد بحث می باشد . تجربه نشان داده است هنگامی کـه تشخیص دقیق شرایط عایق بندی لازم باشد ، ضریب تلفات پارامتری مهـم خواهـد بـود [51].

۱۸- ۳ کلّیات

IEC ضریب تلفات را به صورت نسبت توان اکتیو جذب شده به مقدار مطلق توان رئاکتیو بیان می کند این مقدار برابر با $\tan\delta$ است .

از طرف دیگر طبق IEEE [51] ضریب تلفات عایقی عبارت اسـت از نسـبت تـوان تلـف شده در عایق بندی بر حسب وات به حاصل ضرب ولتـاژ و جریـان مـؤثر تولیـد شـده بـر حسب ولت آمپر (*متناسب با توان ظاهری*) در ولتاژ سینوسی. ضریب تلفات عایقی معمولاً بر حسب درصد بیان می شود [51] .

اندازه گیری مقدار ضریب تلفات در کارخانه برای مقایسه با انـدازه گیـری هـای ضـریب تلفات در سایت و تشخیص عیوب احتمالی عایق کاربرد دارد .

تعیین مقادیر استاندارد برای ضریب تلفات به دلایل زیر عملی نیست :

- بین ضـریب تلفـات و توانـایی ترانسـفورماتور بـرای تحمـل تسـت هـای مقـرر دی الکتریـک ارتباطی قابل تعریف وجود ندارد .
- تغییرات ضریب تلفات با دما زیاد و نامنظّم می باشد .
- تعدد انواع مواد عایقی جامد و مایع استفاده شده در ترانسفورماتور تغییـرات بزرگـی را در ضریب تلفات عایقی ایجاد می کند [51].

۱۸- ۴ مدار اندازه گیری / فرآیند اندازه گیری [51]

ضریب تلفات عایقی را ممکن است با مدارهای پل مخصوص و یا با روش به اصطلاح ولت- آمپر- وات که با عنوان " تست دوبل " (Doble test) شناخته می شود اندازه گیری کرد .

۱۸- ۴- ۱ اندازه گیری با استفاده از پل

روش اندازه گیری بر پایهٔ مقایسة خازن C_X (ترانسفورماتور مورد آزمایش) با خازن معلوم C_N (خازن استاندارد) استوار است .

پل متعارف شرینگ

شکل ۱۸- ۱ الف مدار اندازه گیری ضریب تلفات عایقی ترانسفورماتور دو سیم پیچه را با استفاده از پل شرینگ نشان می دهد .

آرایش مدار

مدار تست پل شرینگ از سه قسمت مهم تشکیل شده است :

- خازن مجهول C_X یا ترانسفورماتور مورد آزمایش که ضریب تلفات (یا $\tan\delta$) و ظرفیت خازنی آن مورد اندازه گیری است .
- خازن استاندارد C_N ، که باید خازنی فشارقوی با تلفات دی الکتریک پایین باشد . معمولاً ظرفیت آن بین ۱۰۰ pF و ۱۰ nF است .
- جعبة پل شرینگ که شامل مقاومت های R_3 ، R_4 و r ، خازن متغیر C_4 و گالوانومتر G می باشد .

به منظور کاهش تأثیر اغتشاشات بیرونی ، باید از کابل های کواکسیال برای اتّصال بین C_X (ترانسفورماتورمورد آزمایش) و پل ، و بین خازن استاندارد C_N و پل استفاده شود.

هنگامی که پل به تعادل می رسد ، خازن مجهول C_X و $\tan\delta$ با استفاده از معادلات زیر محاسبه می شود :

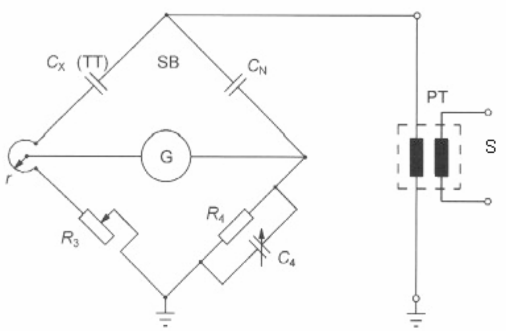
$$C_X = \frac{C_N \cdot R_4}{R_3 + r}$$

$$\tan\delta = C_4 \cdot \omega \cdot R_4$$

که در آن :

$$\omega = 2\pi f$$

به منظور سادگی محاسبات ، در بیشتر پل ها از مقادیر زیر برای R_4 استفاده می شود : $100/\pi$ و $1000/\pi$ یا $10000/\pi$ و الی آخر بر حسب اهم .



SB	=	پل شرینگ
C_X	=	خازن مجهول (TT – ترانسفورماتورمورد آزمایش)
C_N	=	خازن استاندارد
G	=	گالوانومتر
$R_{3,4}$ ، r	=	مقاومت های پل شرینگ
C_4	=	خازن قابل تنظیم پل شرینگ
S	=	منبع ولتاژ
PT	=	منبع تغذیه

شکل ۱۸- ۱ الف : مدار تست برای اندازه گیری ضریب تلفات و ظرفیت خازنی سیم پیچ ها

برای اندازه گیری با فرکانس ۵۰ Hz ، با $R_4 = ۱۰۰۰/\pi$ و C_4 بر حسب nF ضریب تلفات عایقی tan δ به صورت زیر خواهد بود :

$$\tan\ \delta = 2\pi 50 \cdot C_4 \frac{1000}{\pi} \cdot 10^{-9} \cdot 10^{2} = 0{,}01 C_4 [\%]$$

برای مثال بند ۱ ضمیمهٔ ۱۸ را ببینید .

پل اندازه گیری پیشرفته tan δ با مقایسه گر جریان و ریز پردازنده [208]

این پل اساساً از همان اصول اندازه گیری که در بالا توضیح داده شد استفاده می کند . شکل ۱۸- ۱ ب مدار تست را برای اندازه گیری ضریب تلفات و ظرفیت خازنی با پل مدرن اندازه گیری tan δ با استفاده از ریز پردازنده نشان می دهد .

جریان ها در یک مقایسه گر (ترانسفورماتور چند سیم پیچه تفاضلی) به تعادل می رسند و جریانی با اختلاف فاز ۹۰° برای تعادل تلفات تزریق می شود .

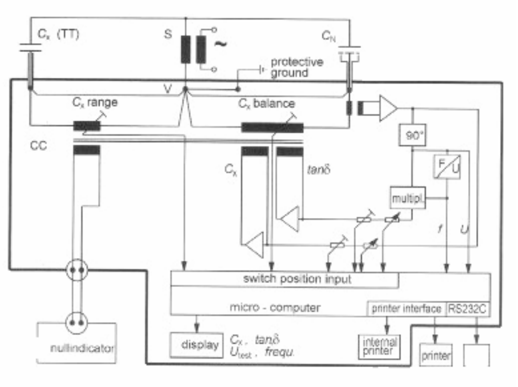
در مورد خازن مجهول C_X ، خازن استاندارد C_N و اتصالات بین ترانسفورماتور و پل از همان روش پل متعارف شرینگ استفاده می شود .

۱۸- ۴- ۲ " تست دوبل" (روش ولت- آمپر- وات)[209], [210]

" تست دوبل " بر اساس اندازه گیری جریان شارژ AC بر حسب mA یا µA ، تلفات دي الکتریک AC بر حسب W و ظرفیت خازنی بر حسب pF در نمونه عایق (ترانسفورماتور مورد آزمایش) استوار است . این درصد ضریب تلفات از جریان شارژ و عدد تلفات ثبت شده بر حسب وات محاسبه می شود .

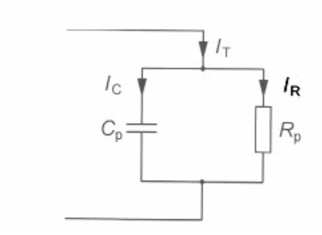
مجموعهٔ " تست دوبل " مدار اندازه گیری ویژه ای دارد . ابتدا جریان کل I_T عبوری از ترانسفورماتور مورد آزمایش برقرار می گردد . ترانسفورماتور را می توان به صورت شبکهٔ موازی خازن و مقاومت شکل ۱۸- ۲ نشان داد . در مرحلهٔ بعدی یک شبکهٔ متعادل کننده وارد مدار اندازه گیری می شود و مؤلفهٔ خازنی I_C مربوط به ترانسفورماتور مورد آزمایش را حذف می کند و مؤلفهٔ هم فاز جریان I_R بطور خالص اندازه گیری می شود .

شکل ۱۸- ۳ مدار اندازه گیری ساده شده از آنالیزر عایقی " دوبل " را نشان می دهد .



C_x = ترانسفورماتور مورد آزمایش (TT)
C_N = خازن استاندارد
S = منبع ولتاژ
CC = مقایسه گر جریان

شکل ۱۸- ۱ ب : بلوک دیاگرام اندازه گیری tan δ و ظرفیت خازنی با پل Tettex مدل 2809



I_T = جریان کل ترانسفورماتور مورد آزمایش
I_C = مولفهٔ عمودی یا خازنی جریان کل
I_R = مولفهٔ هم فاز یا مقاومتی جریان کل
C_p = ظرفیت خازنی موازی معادل عایق مورد آزمایش (TT)
R_p = مقاومت موازی معادل عایق مورد آزمایش (TT)

شکل ۱۸- ۲ : مدار معادل ساده شدهٔ ترانسفورماتور مورد آزمایش (TT) به صورت شبکهٔ موازی خازن/ مقاومت

فرآیند اندازه گیری [51] :

قبل از تست ، همهٔ ترمینال های هر سیم پیچ ها باید اتّصال کوتاه شوند .

ولتاژ تست نباید بیشتر از نصف ولتاژ تست فرکانس پایین (فرکانس توان) اشاره شده در استاندارد IEEE C.57.12.00 [50] برای هر قسمت از سیم پیچ ، و یا بیشتر از ۱۰ kV باشد؛ مقدار کمتر ملاک است .

دستگاه آنالیزر عایقی دوبل معمولاً منبع تغذیهٔ داخلی خود را دارد (ولتاژ تست ۱۰ kV AC) .

تست ضریب تلفات عایقی باید برای سیم پیچ ها نسبت به زمین و بین سیم پیچ ها انجام شود . برای ترانسفورماتور دو سیم پیچه تست های زیرصورت می گیرد (روش I ، تست بدون مدار گارد) :

- فشارقوی به فشارضعیف و زمین
- فشارضعیف به فشارقوی و زمین
- فشارقوی و فشارضعیف به زمین

در مورد اندازه گیری مطابق روش II (تست با مدار گارد) و تست ترانسفورماتورهای سه سیم پیچه استاندارد IEEE C.57.12.90 جدول 4 بند 10.10.4 ، [51] را ببینید .

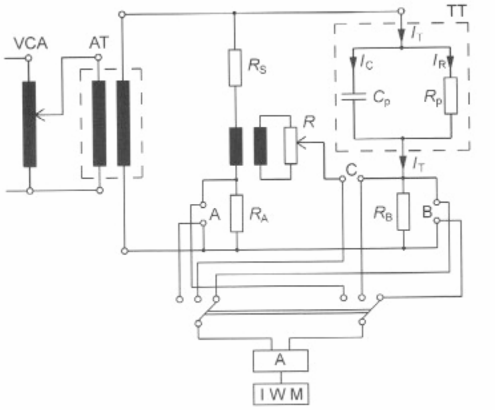
تجهیزات دوبل ، اندازه گیری را در حالت های زیر انجام می دهد :

- GND (حالت زمین)
- GRD (حالت حفاظتی)
- UST (تست در حالی که مورد آزمایش زمین نشده است)

برای توضیحات بیشتر به بند ۲ ضمیمهٔ ۱۸ مراجعه کنید .

هنگامی که ضریب تلفات عایقی در دمای (متوسط روغن) بیشتر یا کمتر از دمای مبنای ۲۰ °C اندازه گیری شود باید مطابق با بند ۲ ضمیمهٔ ۱۸ تصحیح شود .

توجه شود که ضریب تصحیح مربوط به دما برای ضریب تلفات عایقی بستگی به مادهٔ عایقی و ساختار آن و مقدار رطوبت و غیره دارد . مقادیر داده شده در ضمیمهٔ ۱۸ بر پایهٔ استاندارد IEEE [51] می باشند و برای اهداف کاربردی ، رضایت بخش و قابل استفاده اند .



A = آمپلی فایر
I W M = دستگاه اندازه گیری - W ، mA
VCA = اتو ترانسفورماتور کنترل ولتاژ
AT = ترانسفورماتور افزایندهٔ فشارقوی
R_S = مقاومت استاندارد بزرگ
$I_{T,R,C}$ = شکل ۱۸- ۲ را ببینید
TT = ترانسفورماتور مورد آزمایش

شکل ۱۸- ۳ : *دیاگرام سادهٔ مدار تست دوبل آمپلی فایر در موقعیت :*

A: کنترل قرائت تمام مقیاس

B: اندازه گیری I_T

C: اندازه گیری I_R (پس از تعادل جزئی)

ضمیمة ۱۸ :

اندازه گیری ضریب تلفات عایقی

ضمیمة ۱۸- ۱ چند مثال :

ضمیمة ۱۸- ۱- ۱ اندازه گیری با استفاده از پل شرینگ

برای اتو ترانسفورماتور تک فاز با مقادیر نامی :

۵۰۰ / ۳ MVA ، ۵۰ Hz

۴۰۰÷√۳ / ۱۷۶/۲ ÷ √۳ / ۳۰/۸ kV:

اندازه گیری بین HV (منبع تغذیه) و LV و مخزن :

ولتاژ تغذیه : ۱۰ kV

C_N =۱۰۰/۵ pF

دما : ۳۰ °C

ضریب تصحیح : ۱/۲۵ K ، جدول بند ۲ ضمیمة ۱۸ را ببینید .

R_3 =۱۳/۵۴ Ω ، R_4 =۱۰۰۰/ π Ω

C_4 =۲۹/۷ nF

$\tan\delta$ (۳۰ °C) = ۰/۰۱ C_4 = ۰/۲۹۷ %

یا $\tan\delta$ (۲۰ °C) = ۰/۲۹۷ / ۱/۲۵ = ۰/۲۳۷ %

ضمیمة ۱۸- ۱- ۲ اندازه گیری با استفاده از آنالایزر عایقی دوبل [209]

برای ترانسفورماتور سه فاز ، اندازه گیری در سایت ممکن است به صورت زیر انجام شود :

مقادیر نامی ترانسفورماتور :

۳۳/۳ MVA ، ۶۰ Hz

۱۳۸ / ۱۳/۸ kV Dy

دمای روغن ترانسفورماتور : ۵۰ °C

ولتاژ تست : ۱۰ kV AC

الف) HV برقدار / LV زمین شده

مقادیر اندازه گیری شده : ۳۳/۶ mA
۱/۹۲ W

ضریب تلفات PF :

$$PF = \frac{1{,}92}{10000 * 0{,}0336} = 0{,}0057 = 0{,}57\%$$

ضریب تصحیح برای ۵۰ °C ← ۱/۹۵

$$PF_{corr} = \frac{0{,}57}{1{,}95} = 0{,}29\%$$

ب) HV برقدار / LV گارد شده

مقادیر اندازه گیری شده : ۱۵/۳ mA

۱/۱۲ W

ضریب تلفات PF :

$$PF = \frac{1{,}12}{10000 * 0{,}0153} = 0{,}0073 = 0{,}73\%$$

ضریب تصحیح برای ۵۰ °C ← ۱/۹۵

$$PF_{corr} = \frac{0{,}73}{1{,}95} = 0{,}37\%$$

برای این ترانسفورماتور تست UST انجام نشد .

فرآیندی مشابه برای LV برقدار / HV زمین شده یا گارد شده انجام گردید .

ضمیمة ۱۸- ۲ حالت های تست مورد استفاده در آنالایزر عایقی دوبل [209]

GND (حالت زمین)
تلفات ظاهری و اکتیو (mVA و W) در عایق بین پروب HV و زمین و نیز در عایق بین پروب HV و سیم های LV اندازه گیری می گردد .

GRD (حالت گارد)
تلفات ظاهری و اکتیو (mVA و W) در عایق بین HV و زمین اندازه گیری می گردد . جریان نشتی از طریق عایق بین پروب HV و سیم های LV از دستگاه اندازه گیری عبور نمی کند !

UST (تست مورد آزمایش زمین نشده)
تلفات ظاهری و اکتیو (mVA و W) در عایق بین پروب HV و سیم های LV اندازه گیری می گردد . نشتی از طریق عایق بین پروب HV و سیم زمین از دستگاه اندازه گیری عبور نمی کند !

ضمیمة ۱۸- ۳ ضرایب تصحیح دما مطابق [51] IEEE Std C57.12.90

(بر اساس سیستم عایقی با استفاده از روغن معدنی)

$$F_{p20} = \frac{F_{pT}}{K}$$

که در آن :

F_{p20} = ضریب تلفات اصلاح شده برای ۲۰ °C
F_{pT} = ضریب تلفات اندازه گیری شده در T
T = دمای تست
K = ضریب تصحیح

دمای تست T [°C]	ضریب تصحیح K
۱۰	۰/۸۰
۱۵	۰/۹۰
۲۰	۱/۰۰
۲۵	۱/۱۲
۳۰	۱/۲۵
۳۵	۱/۴۰
۴۰	۱/۵۵
۴۵	۱/۷۵
۵۰	۱/۹۵
۵۵	۲/۱۸
۶۰	۲/۴۲
۶۵	۲/۷۰
۷۰	۳/۰۰

۱۸- اندازه گیری ضریب تلفات($\tan\delta$) خازن های سیستم عایق بندی

تست ترانسفورماتورهای قدرت

واژه نامة انگلیسی

واژه	صفحه
A	
Acceptance criteria for PD test	127
Acoustic absorption coefficient	258
Analog impulse peak voltmeter	188
Analog impulse measuring system	187
Apparent charge	121, 123-128, 132f, 143-148, 152
B	
Background sound level	252-254
Back-to-back method (Temperature rise test)	201, 212
Basic Lightning Impulse Level (BIL)	26, 30, 107, 162
Basic Switching Impulse Level (BSL)	27, 162
Buchholz-relay	89, 99, 109,171, 203
Burden of instrument transformer	70
C	
Capacitive impulse voltage divider	184f
Cathode ray oscilloscope	187
Chopped wave on the tail	21, 27, 163-165, 188, 192
Class I transformers	26f, 30, 107f, 111
Class II transformers	26f, 30, 107f, 110f
Clock number of vector group	42f
Coaxial cables	123, 183-186, 193
Compensation of capacitive load (Applied voltage test)	101
Compensation of capacitive load (Induced voltage test)	113
Controlled resistive impulse voltage divider	185
Core-type transformer	231-233
Corona gun	128
Corona shielding	109, 160
D	
Damped-capacitive impulse voltage divider	185
Damping resistance (Applied voltage test)	104
Damping resistance (Impulse test)	177, 180, 184-186, 190
Data Acquisition System	34f, 39, 208, 219
DC source for resistance measurements	34, 37, 39
Definition of Partial Discharge	120, 140-143
Definition of relative short circuit voltage	57
Definition of Sound Intensity	257
Definition of Sound Power	256
Definition of Sound pressure	256

Definition of tests 14
Definition of voltage ratio 43
Defintion of short-circuit voltage 56
Dielectric test requirements (IEC) 25
Dielectric test requirements (IEEE) 26
Digital impulse measuring system 188
Doble Insulation Analyzer 278-280
Doble test 277-281
Duration of the induced voltage test 113

E
Eddy losses (no-load losses) 82f
Electron avalanche 142
External electrodes 99

F
Faraday's law 81
Form-factor of voltage 83, 93
Frequency response analysis (FRA) 243
Front chopped wave (front-of-wave) 21, 163, 166
Full wave test 163-165

G
Gas-in-oil analysis (DGA) 204, 220, 243
Gauss's Law 65
Graded insulation 27, 30, 98f

H
Harmonic analyzer 266
Harmonic content of the no-load current 267-269
Hysteresis losses 80, 82f, 92f

I
ICM system 134f, 151f
Impulse circuit earthing 194
Impulse generator 167, 177-178, 180-182
Impulse peak voltmeter 187f
Impulse voltage distribution across a winding 198
Impulse voltage divider 184-187
Impulse voltage transfer 188
Instrument error correction 69-72
Interdependence of load loss and frequency 60f
Interdependence of load loss and winding temperature 60

K

Kelvin (Thomson) bridge 34, 36f, 39

L

Lightning impulse withstand level (LI) 25-29, 162
Lightning over-voltages 21, 23
Load sound 249f, 255f
Long duration AC test (ACLD) 25f, 106, 108, 110, 114, 126
Low Frequency Dielectric spectroscopy (FDS) 272

M

Magnetic asymmetrie 89
Magnetostriction 173, 249
Marx generator
Meggohm-meter 272-274
Montsinger's Law

N

No-load sound 249, 256
No-load type (Zero-sequence impedance measurement) 231, 233
Non uniform insulation 26, 108
Non-graded insulation 27, 30, 108

O

Ohmic-capacitive mixed impulse voltage divider 186
Ohm's Law 34
One hour level 30, 107, 110

P

Peak factor of voltage 83
Peak voltmeter 98, 104
Phase Resolving Partial Discharge Analyzer 129, 152f
Phase-angle error (instrument transformer) 65, 68, 70f
Piezoelectric transducer 133
Polarization Index (PI), (Insulation resistance measurement) 273f
Post-established short-circuit 239, 244
Power Analyzer 34, 65, 83, 269
Power factor (Definition IEC) 276
Power factor (Definition IEEE) 276
Precribed contour 257
Pre-established short-circuit 239, 244
Protection sphere gap 100

Q

Q factor	103
Quasi-integration of the PD current impulses	122, 124, 143f, 149

R

Ratio measurement (special vector group)	48
Reactor type (Zero-sequence impedance measurement)	228, 231-234
Recurrent-surge oscillographic method	246
Relative ratio error	43f, 53
Repeated dielectric tests	27
Resistive impulse voltage divider	184
Response time	188f
Returm voltage polarization spectra (RVM)	272
RIV-method	121, 124, 127, 149

S

Schering Bridge	277
Schering-Alberti Bridge	44
Self excitation	100, 113, 116
Series Resonant Systems (Applied voltage test)	102
Shell-type transformer	233
Short -circuit method (Temperature rise test)	202
Short duration AC test (ACSD)	25f, 106, 110, 114, 126
Short-circuit type (Zero-sequence impedance measurement)	228, 231-233, 235
Spectrum analyzer (PD Measurement)	134f, 137, 158
Sphere gaps	104, 118,190-192
Spheres	99, 160
Standing time	109
Starting transformer (no-load loss measurement)	94
Starting transformer (short-circuit voltage measurement)	72
Surge arrestors	99
Switching impulse wave form	165f
Switching impulse withstand level (SI)	25-27, 29, 162
Switching over-voltages	22
Symmetrical short-circuit current	240-242, 245f

T

Temperature / temperature rise	200, 211
Temporary over-voltages	22
Theory of symmetrical components	226f
Thermal time-constant of transformer (Temperature rise test)	213
thermal winding time constant	62, 207

Three Transducer Detector (TTD)	155f
Three winding transformers (load loss measurement)	63, 75-77
Three-wattmeter method	61, 67, 92
Three-winding transformer (Temperature rise test)	221-223
Time domain polarization/depolarization current measurements	272
Transmission factor alpha	197
Trigatron	180
Two-wattmeter method	61, 67, 92
Typical PD pattern	130 -132

U

Ultrasonic detector (PD Measurement)	126, 150
Uniform insulation	26, 28, 110f
Unloaded transformer (Theory)	80

V

Vector group and phase displacement	42, 44
Voltmeter-ammeter method	34-36, 39

W

Winding hot-spot	209f
Winding resistance	32f
Winding resistance, temperature dependance	32

Z

Zero-flux current transformer	65
Zero-sequence impedance (Definition)	227f

توضیح : **f** به معنی شکل می باشد .

تست ترانسفورماتورهای قدرت

مراجع

Standards

International Electrotechnical Commission (IEC)

[1] IEC 60076-1 (2000) Power Transformers - Part 1: General

[2] IEC 60076-2 (1993) Power Transformers - Part 2: Temperature rise

[3] IEC 60076-3 (2000) Power Transformers - Part 3: Insulation levels, dielectric test and external clearances

[4] IEC 60076-4 (Draft) Guide to lightning impulse testing of power transformers and reactors, see also [14]

[5] IEC 60076-5 (2000) Power transformers - Part 5: Ability to withstand short circuit

[6] IEC 60076-8 (1997) Power transformers - Part 8: Application guide

[7] IEC 60076-10 (2001) Power transformers - Part 10: Determination of sound levels

[8] IEC 60137 (1995) Bushings for alternating voltages above 1000 V

[9] IEC 60214 (1989) On-load tap changers

[10] IEC 60289 (1988) Reactors

[11] IEC 60354 (1991) Loading guide for oil-immersed power transformers

[12] IEC 60542 (1976) Application guide for on-load tap changers and Am. N°1 (1988)

[13] IEC 60616 (1978) Terminal and tapping markings for power transformers

[14] IEC 60722 (1982) Guide to the lightning impulse and switching impulse testing of power transformers and reactors

[15] IEC 60726 (1982) Dry-type power transformers

[16] IEC 60905 (1987) Loading guide for dry-type power transformers

[17] IEC 61181 (1993) Impregnated insulating materials -Application of dissolved gas analysis (DGA) to factory tests on electrical equipment

[18] IEC 61378-1 (1997) Converter transformers - Part 1: Transformers for industrial applications

[19] IEC 61378-2 (2001) Converter transformers - Part 2: Transformers for HVDC application

[20] IEC 60050-421 (1990) International Electrotechnical Vocabulary. Chapter 421: Power transformers and reactors

[21] IEC 60060-1 (1989) High-voltage test techniques - Part 1:General definitions and test requirements

[22] IEC 60060-2 (1994) High-voltage test techniques - Part 2: Measuring systems

[23] IEC 60060-3 (w.i.p.) High-voltage test techniques - Part 3: Definitions and requirements for on-site tests

[24] IEC 60071-1 (1993) Insulation coordination - Part 1: Definitions, principles and rules

[25] IEC 60071-2 (1976) Insulation coordination - Part 2: Application guide

[26] IEC 60270 (2000) Partial discharge measurement

[27] IEC 60790 (1984) Oscilloscopes and peak voltmeters for impulse tests (withdrawn in 2001 and replaced by [28])

[28] IEC 61083-1 (2001) Instruments and software used for measurements in high-voltage impulse tests - Part 1: Requirements for instruments

[29] IEC 61083-2 (1996) Digital recorders for measurements in high-voltage impulse tests - Part 2: Evaluation of software used for the determination of the parameters of impulse waveform

[30] IEC 60076-10-1 (2001) Determination of transformer and rector sound level - User guide

[31] IEC 60651 (2001) Sound level meters

[32] IEC61083-1, (2001) Digital recorders for measurements in high-voltage impulse tests - Part 1: Requirements for digital recorders

[33] IEC 1083-2 (1996) Digital recorders for measurements in high-voltage impulse tests - Part 2: Evaluation of software used for the determination of the parameters of impulse waveforms

[34] IEC 61181 (1993) Impregnated insulation materials - Application of dissolved gas analysis (DGA) to factory tests on electrical equipment

[35] IEC 60052 (2002) Voltage measurement by means of standard air gaps

IEEE / ANSI Standards

[50] C57.12.00 (2000) IEEE Standard General Requirements for Liquid-Immersed Distribution, Power, and Regulating Transformers

[51] C57.12.90 (1999) IEEE Standard Test Code for Liquid-Immersed Distribution, Power, and Regulating Transformers

[52] C57.92 (1981) Guide for Loading Mineral-Oil -Immersed Power transformers up to and including 100 MVA with 55°C or 65°C average winding Rise (ANSI)

[53] Std 4 (1995) IEEE Standard Techniques for High Voltage Testing

[54] C57.12.80 (1978) IEEE Standard Terminology for Power and Distribution Transformers

[55] C57.98 (1993) IEEE Guide for Transformer Impulse Tests

[56] C57.113 (1991) IEEE Guide for Partial discharge Measurements in Liquid Filled Power Transformers and Shunt Reactors

[57] C57.123 (2002) IEEE Guide for Transformer loss measurement

[58] C57.98 (1993) Guide of impulse testing techniques, interpretation of oscillograms and failure detection criteria

[59] S1.4 (1983*) American Standard for Sound Level meters *(Reaff 1997) ISO Standards

[70] ISO 3746 (1995) Acoustics, Determination of sound power levels of noise sources using sound pressure - Survey method using an enveloping measurement surface over a reflecting plane

Books

[100] D.J. Kraaij,G.S. Schemel, F.M. Wegscheider: Die Prüfung von Leistungstransformatoren. Buchverlag Elektrotechnik 5001 Aarau/Schweiz 1983

[101] IEC multilingual dictionary of electricity, 1983

[103] R. Richter: Elektrische Maschinen: Dritter Band. Die Transformatoren, Birkhäuser Verlag, Basel, Stuttgart

[104] W. Nürnberg, R.Hanitsch: Die Prüfung elektrischer Maschinen, Springer Verlag, Heidelberg, 7.Auflage, 2001

[105] G. Bertagnolli: Short-circuit Duty of Power Transformers, ABB Trasformatori, Legnano Milano) Italy, 1996

[106] Hochrainer, A.: Symmetrische Komponenten in Drehstromsystemen, Berlin / Göttingen / Heidelberg, Springer 1957

[107] Roeper, R.: Kurzschlussströme in Drehstromnetzen. Siemens, Erlangen 1964

[108] J & P, Transformer Book, 12th edition, Newnes, Oxford, Boston, Johannesburg, Melbourne, New Dehli, Singapur, 1998

[109] D. König, Y. Narayana Rao: Partial Discharge in electrical power Apparatus, vde verlag gmbh, Berlin und Offenbach, 1993

[110] E. Kuffel, W.S. Zaengl. High Voltage Engineering Fundamentals, Pergamon Press, Oxford, New York, Toronto, Sydney, Paris, Frankfurt, 1984

[111] G. Lesch: Lehrbuch der Hochspannungstechnik, Springer-Verlag, Berlin, Göttingen, Heidelberg, 1959

[112] W. Schnorrenberg: Spektrumanalyse, VOGEL Buchverlag Würzburg, 1990[107]
Roeper, R.: Kurzschlussströme in Drehstromnetzen. Siemens, Erlangen 1964

Technical Reviews

[200] A. Jenni, M. Pasquier, R. Gleyvod, P.Thommen: Testing of High Voltage Power Cables with Series Resonant Systems and Water Terminations, Documentation Emil Hafely&Cie

[201] CIGRE Working Group Report, Electra N°82, May 1982, pages 33 - 40.

[202] LEM NORMA, Power Analyzer D6000, 1996

[203] Widerstandsmessungen an Grosstransformatoren. Tettex Information 15 D/E 5-9.79

[204] Kratzer, R.: L'impédance homopolaire des transformateurs, Bulletin Sécheron 1958, Nr 27 pages 23 - 32

[205] Schlosser, K.: Die Nullimpedanzen des Voll- und Spartransformators.
BBC-Nachrichten, Bd.44(1962), Nr. 2 , Seiten78 - 83

[206] Christoffel, M.: Nullreaktanzen von Transformatoren und Drosselspulen,
BBC-Mitteilungen, Bd.52 (1965), Nr. 11/12, S 837 - 842

[207] U. Gäfert, L.Adeen, M. Tapper, P. Ghasemi, B. Jönsson: „Dielectric Spectrocopy in Time and Frequency Domain to Diagnostics of Power Transformers", 6th International Conference on Properties and Applications of Dielectric Materials, June 21-26, 2000, X'ian University, China

[208] TETTEX A.G. ZÜRICH, Kapazitäts- und Verlustfaktor (tg() Messbrücke, Typ 2809

[209] DOBLE Engineering Company, General Description and Technical Specification
of the Type M2H Test Set, M2H-I-881

[210] DOBLE Engineering Company, M4000 Insulation Analyzer User Guide, 72A-1230 Rev. C

[211] Woschnagg E.: Unsymmetrische Leistungsverteilung an leerlaufenden Grosstransformatoren
und Drosselspulen. Brown Boveri Mitteilungen 56 (1969), Heft 7, S 314 - 322

[212] Tettex Instruments AG: Partial discharge measuring technique, Information 21, TI21-d/e05.94

[213] J. Fuhr, B. Fruth, L. Niemeyer, D. Königstein, M. Hässig, F. Gutfleisch: Generic Procedure
for Classification of aged Insulating Systems, International Conference on Properties
and Applications of Dielectric Materials (ICPDAM), Tokyo, Japan, 1991

[214] J. Fuhr, M. Hässig, P. Boss, D. Tschudi, R.A. King: Detection and Localication of Internal Defects in
the Insulation of Power Transformers, IEEE Transaction on Electrical Insulation Vol.28, No.6, 1993

[215] B. Fruth, J. Fuhr: Partial discharge pattern recognition - a tool for diagnosis and monitoring of aging,
CIGRE Session, paper 15/33-12, Paris, France 1990

[216] J. Fuhr: Non-standard PD-measurement-tool for successful PD-source identification in the laboratory, to be published at XIIIth International Symposium on High Voltage Engineering (ISH), Delft, the Netherlands, 2003

[217] L.E. Lundgaard: Partial Discharge - Part XIV: Acoustic Partial Discharge Detection -
Practical Application, IEEE Electrical Insulation Magazine, Vol.8, No5, 1992

[218] T. Bengtsson, L. Ming, M. Leijon: Partial Discharge Studies using Acoustical Emission,
Proceeding of NORD-IS, Vaasa, Finland, 1994

[219] J. Fuhr: Analyse von TE-Messungen an Transformatoren im Labor und vor Ort;
Highvolt-Kolloquium, Dresden, Germany, 1997

[220] L. Niemeyer, B. Fruth, F. Gutfleisch: Simulation of Partial Discharge in Insulating Systems,
VIIth International Symposium on High voltage Engineering (ISH), Dresden, Germany, 1991

[221] R. Bräunlich, M. Hässig, J. Fuhr, Th. Aschwanden: Assessment of insulation condition of large power transformer by on-site electrical diagnostic methods, Conference Record of the 2000 IEEE International Symposium on Electrical Insulation, IEEE Publication 00CH37075, pp368-372.

تست ترانسفورماتورهای قدرت

واژه نامه فارسی

فارسی	انگلیسی	صفحه
آ		
آشکار ساز دستی مافوق صوت	portable ultrasonic detector	۱۲۸
آشکارساز مافوق صوت	corona gun	۱۵۰
آنالایزر تخلیة جزئی وابسته به فاز	PRPDA -Phase Resolving Partial Discharge Analyzer	۱۲۹
آنالیز گازهای حل شده در روغن	DGA	۲۰۴
ا		
استقامت	strength	۱۰۶
اثر- فرانتی	Ferranti effect	۲۲
اختلاف	gradient	۲۰۰
اعمالی	applied	۱۶
ادغام شده	superimposed	۱۵۴
افزایشی	additive	۴۵
الکترون های آغازگر	starting electrons	۱۲۹
انتگرال زمانی	time integral	۱۶۵
اندازه گیر ی تخلیه جزیی	PD–measurement	۱۲۰
ایستادگی	withstand	۲۳
ب		
بازیابی	reproducibility	۱۳۱
بالاترین ولتاژ دستگاه	Highest voltage for equipment	۲۳ ،...
بالای روغن	top oil	۲۰۰
بدون بار	off-load	۱۷۱
بدون تخلیة جزئی	PD-free	۱۲۰ ،۱۲۶
بدون حفاظ الکترو مغناطیسی	non-shielded	۱۲۴
بوشینگ تپ	measuring tap	۱۱۸
بیرون زدگی	overshoot	۱۶۵
پ		
پاور آنالایزر	power analyzer	۶۵
پدیدة لرزش (تغییر الاستیک طول بخش های هستة آهن)	magnetostriction	۱۷۳ ، ۲۴۹
پردازش داده	data processing	۱۵۱
پلاریته	polarity	۲۴
پیش مغناطیس شدگی	pre-magnetization	۶۲
پیک	peak	۱۱۸

فارسی	انگلیسی	صفحه
ت		
تحلیل ویژگی	characterization	۱۳۶
ترانسفورماتور تغذیه	testing transformer	۱۱۷
ترانسفورماتور راه انداز	starting transformer	۴۴، ۹۴
ترانسفورماتور تنظیم کننده	Regulating Transformer	۱۰۱
تست تایپ	type test	۱۰۶
تست ایستادگی AC القایی کوتاه مدت	ACSD	۲۵ ،۱۲۶،۱۰۶
تست حرارتی	temperature rise test	۲۰۰
تست ایستادگی AC القایی بلند مدت	ACLD	۲۵، ۱۰۶ ،۰۰۰
تست ولتاژ القایی	induced voltage test	۱۶۳
تست ولتاژ اعمالی	Applied potential test	۲۵ ، ۱۶۳
تست ویژه	special test	۱۰۶
تشدید مربوط به هسته ترانسفورماتور	Ferro resonance	۲۲
تفکیک	resolution	۴۹ ، ۱۵۳
توان صدا	sound power	۲۵۶
ث		
ثبت شده	registered	۱۲۸
ج		
جابجایی	shift	۶۹
جبران سازی	compensation	۱۰۸
جرقه	flashover	۱۰۰
جمع آوری داده دیجیتال	digital data acquisition	۱۵۱
جهش حرارتی	temperature rise	۲۰۰
چ		
چگالی دامنهٔ طیفی ثابت	constant spectral amplitude density	۱۴۴
خ		
خط محیط فرضی	Prescribed contour	۲۵۷
د		
دامنهٔ طیف توان	power spectrum amplitude	۱۳۶
دستگاه اندازه گیری نویز رادیویی	RIV-meter	۱۴۶
دمنده	fan	۲۰۵

فارسی	انگلیسی	صفحه
دیاگرام فازوری	phasor diagram	۴۳
دیگر	other	۱۴
ذ		
ذخیرة بار	charge storage	۱۴۰
ر		
رادیاتور - خنک کننده	Cooler	۲۰۵
روتین	routine	۱۰۶
رهایی	de-trapping	۱۴۳
ز		
زمـــان اوج گیری	rise-time	۱۳۷، ۱۸۵
زمان ایستایی	Standing time	۱۷۱
ژ		
ژنراتور مولّد موج تکراری ولتاژ پایین	low-voltage recurrent surge generator	۲۴۳ ، ۲۴۶
س		
سد کردن	to gate out	۱۵۱
سطح ۶۰ ثانیه	enhancement level	۳۰
سطح ایستادگی ضربة صاعقه	Lightning Impulse Withstand Level	۱۶۲
سطح ایستادگی ضربة کلید زنی	Switching Impulse Withstand Level	۱۶۲
سطح توان صدا	sound power level	۲۵۶
سـطح عـایقی پـایة ضربة صاعقه	Basic lightning Impulse insulation Level	۱۶۲
سطح فشار صدا	sound pressure level	۲۵۶
سلفی	Inductive	۱۱۵
سلکتور سویچ	coarse or reversing change-over selector	۲۶۳
سیستم های جمع آوری داده	Data Acquisition Systems	۳۴ ، ۲۰۸
سیم پیچ دارای جابجایی	interleaved winding	۱۱۶
سیم پیچ مشترک	common winding	۲۲۳
سیم پیچی دو جهته	bifilar winding	۱۷۸
ش		
شبه- انتگرال گیری	quasi – integration	۱۲۴
شبه آشکار سازی پیک	quasi-peak detection	۱۲۴
شدت صدا	sound intensity	۲۵۷
شدت صدای عمود	normal sound intensity	۲۵۷ ، ۲۴۹

فارسی	انگلیسی	صفحه
ص		
صحت	integrity	۱۷ ، ۱۹
صدور میدانی	field emission	۱۴۱
صفحهٔ اندازه گیری	measuring surface	۲۵۲
صفحه منتشر کنندهٔ اصلی	principal radiating surface	۲۵۷
ض		
ضربه بریده	chopped wave	۲۱
ضریب فرم	form factor	۸۳
ضریب مقیاس	scale factor	۱۹۰
ط		
طراحی	design	۱۴
ظ		
ظرفیت خازنی ژنراتور ضربه	impulse capacity	۱۸۰
ع		
عایق بندی اصلی	major insulation	۱۹۸
ف		
فاصله یابی مثلثی	triangulation	۱۳۳
فرکانس توان	power frequency	۲۴ ،۱۲۰، ۱۵۱
فرکانس قطع	cut-off frequency	۱۴۴
فشار صدا	sound pressure	۲۵۶
فعال	active	۳۲
فیلتر باند- گذر	band–pass filter	۱۲۲
فیلتر پهن- باند گذر	wide band pass filter	۱۲۶
ق		
قانون تست	test code	۱۶۴
قانون مونت سینگر	Montsinger law	۲۱۱
قلهٔ موج ولتاژ	voltage crest	۱۶۳
ک		
کاملاً	solidly	۱۶۸
کاهشی	subtractive	۴۵
کلی/ جزئی	coarse/fine	۱۶۸
کلید تنظیم ولتاژ زیر بار	on-load-tap changer	۱۶۸

فارسی	انگلیسی	صفحه
کنترل شیفت فاز یا کنتـــرل ربعی	quadrature controlled	۴۹
کوپلاژ تزویجی	cross-coupling	۱۳۵
کاملاً	solidly	۱۶۸
گ		
گوی برش	chopping gap	۱۶۷
م		
مبتنی بر زمان	time resolved	۱۳۴
محیط	medium	۱۵۴
مشخصات درخواست	specification	۱۲۰
منحنی غیر خطی	psophometric	۱۴۶
موثر	r.m.s	۱۱۸
موج پشت- بریده	chopped wave on the tail	۱۶۳
موج پیشانی _ بریده	Front chopped wave	۱۶۳
موج دیواره ای	wall wave	۱۵۵
موج کامل	full wave	۱۶۳
ن		
نقطه داغ	hot spot	۲۰۰
نوع- هسته ای	core-type	۲۴۴
و		
وزن دهی	weighting	۱۴۶
وضعیت تپ	tap position	۱۶۹
ولتاژ ایستادگی نامی	rated withstand voltage	۱۱۰
ولتاژ پائین تر- کاهش داده شده	reduced voltage	۱۶۴
ولتاژ تداخل رادیویی	Radio Interference Voltage (RIV)	۱۲۴
ولتاژ شکست	flashover-voltage	۱۷۳