



الکترونیک صنعتی

الکترونیک قدرت

تألیف هانس رودی بولر

ترجمه قدیر عزیزی قنادی



مرکز نشر دانشگاهی، تهران



Electronique de Puissance
Hansruedi Bühler
Second Edition
Dunod, 1981

الکترونیک صنعتی: الکترونیک قدرت
تألیف هانس رودی بولر
ترجمه دکتر قدیر عزیزی قنادی
ویراسته محمدحسین سالمی
مرکز نشر دانشگاهی، چاپ اول ۱۳۶۴
مرکز نشر دانشگاهی، چاپ دوم ۱۳۶۹
تعداد ۵۰۰۰

لیتوگرافی: بهزاد
چاپ و صحافی: سترگ
حق چاپ برای مرکز نشر دانشگاهی محفوظ است

بولر، هانس رودی Bühler, Hansruedi
الکترونیک قدرت

عنوان اصلی: Electronique de Puissance
واژه نامه: ص

۱. صنایع الکترونیک. الف. عزیزی قنادی قدیر، مترجم. ب. عنوان.

۶۲۱/۳۸۱.۰۴ TK ۷۸۸۱



صفحه	عنوان
هفده	پیشگفتار مترجم
نوزده	مقدمه مؤلف
۱	فصل اول مقدمه‌ای بر الکترونیک صنعتی
۱	۱-۱ تحول در الکترونیک صنعتی
۱	۱-۱-۱ کلیات
۲	۲-۱ تقسیم‌بندی به الکترونیک قدرت و الکترونیک تنظیم و فرمان
۲	۱-۲-۱ کلیات
۲	۲-۲-۱ الکترونیک قدرت
۴	۳-۲-۱ الکترونیک تنظیم و فرمان
۴	۴-۲-۱ تأسیسات کامل
۴	۳-۱ کاربردهای الکترونیک صنعتی
۴	۱-۳-۱ کلیات
۶	۲-۳-۱ تنذیه تنظیم‌شده
۶	۳-۳-۱ وسایل حمل و نقل (کشند)
۶	۴-۳-۱ نیروگاه‌ها و شبکه‌های الکتریکی
۷	۵-۳-۱ ماشین ابزارها
۷	۶-۳-۱ تأسیسات تحقیقات هسته‌ای
۷	۷-۳-۱ فرایندهای شیمیایی و متالورژی
۷	۴-۱ طرح و اجرای یک تأسیسات
۷	۱-۴-۱ کلیات
۸	۲-۴-۱ تحلیل سیستم تنظیم شونده
۸	۳-۴-۱ طرح مدارهای تنظیم فرمان
۸	۴-۴-۱ تعیین مقادیر و تحلیل کیفیت تنظیم
۱۰	۵-۴-۱ تهیه شمای مدار

صفحه	عنوان
۱۰	۶-۴-۱ ساخت مدار تجربی
۱۱	۷-۴-۱ آزمایشها
۱۱	۸-۴-۱ ساخت نمونه
۱۲	۹-۴-۱ آزمایشهای نهایی
۱۲	۱۰-۴-۱ نصب و راه اندازی
۱۲	۱۱-۴-۱ ساخت به صورت سری
۱۲	۵-۱ ارتباط الکترونیک صنعتی با سایر رشته ها
۱۳	۶-۱ تخصص یابی مهندسانی که در زمینه الکترونیک صنعتی کار می کنند
۱۳	۱-۶-۱ کلیات
۱۳	۲-۶-۱ فروش
۱۴	۳-۶-۱ توسعه
۱۴	۴-۶-۱ طرح
۱۴	۵-۶-۱ ساخت
۱۴	۶-۶-۱ تولید
۱۴	۷-۶-۱ آزمایش
۱۵	۸-۶-۱ نصب و راه اندازی

۱۷	فصل دوم مقدمه ای بر الکترونیک قدرت
۱۷	۱-۲ عناصر قدرت
۱۷	۱-۱-۲ کلیات
۱۸	۲-۱-۲ دیودها
۱۸	۳-۱-۲ تیرستورها
۱۸	۴-۱-۲ تیرستورهای قابل قطع از طریق چکاننده
۱۹	۵-۱-۲ تریاکها
۲۰	۲-۲ تقسیم بندی بر حسب نوع کموتاسیون
۲۰	۱-۲-۲ کلیات
۲۰	۲-۲-۲ کارکرد بدون کموتاسیون
۲۲	۳-۲-۲ کموتاسیون طبیعی
۲۳	۴-۲-۲ کموتاسیون اجباری
۲۵	۳-۲ تقسیم بندی بر حسب چگونگی عمل تبدیل
۲۵	۱-۳-۲ کلیات
۲۵	۲-۳-۲ کنتاکتور جریان
۲۶	۳-۳-۲ تغییر دهنده (برشگر) جریان

صفحه	عنوان
۲۶	۴-۳-۲ یکسو کننده
۲۷	۵-۳-۲ اندولر
۲۷	۶-۳-۲ مبدل جریان
۲۸	۷-۳-۲ مبدل جریان دو طرفه
۲۸	۸-۳-۲ مبدل مستقیم فرکانس
۲۹	۹-۳-۲ مبدل فرکانس با مدار میانجی
۳۰	۴-۲ تقسیم بندی بر حسب نوع کموتاسیون و چگونگی عمل تبدیل

۳۳	فصل سوم ملاحظات کلی در مورد عناصر قدرت
۳۳	۱-۳ مقدمه
۳۳	۲-۳ انتخاب عنصر یکسو کننده
۳۳	۱-۲-۳ مقادیر مشخصه
۳۴	۲-۲-۳ انتخاب عنصر یکسو کننده
۳۵	۳-۲-۳ رعایت مقادیر حد دیگر
۳۶	۳-۳ رفتار حرارتی و خنک سازی
۳۶	۱-۳-۳ کلیات
۳۷	۲-۳-۳ تلفات در عنصر یکسو کننده
۳۹	۳-۳-۳ طرح واره معادل حرارتی
۴۰	۴-۳-۳ محاسبه حرارتی
۴۱	۵-۳-۳ مثال برای محاسبه حرارتی
۴۲	۶-۳-۳ طرح واره معادل حرارتی برای پدیده های گذرا
۴۳	۷-۳-۳ محاسبه حرارتی برای پدیده های گذرا
۴۵	۴-۳ اتصال موازی با متوالی عناصر یکسو کننده
۴۵	۱-۴-۳ کلیات
۴۵	۲-۴-۳ اتصال موازی
۴۸	۳-۴-۳ اتصال متوالی
۴۹	۵-۳ حفاظت در مقابل اضافه جریان
۴۹	۱-۵-۳ علت های اضافه جریان
۴۹	۲-۵-۳ حفاظت به وسیله فیوز (گداز پذیر)
۵۰	۳-۵-۳ حفاظت به وسیله فیوز (گداز پذیر) و دیژنکتور (گشاینده) سریع
۵۱	۶-۳ حفاظت در مقابل اضافه فشار الکتریکی
۵۱	۱-۶-۳ علت های اضافه فشار الکتریکی
۵۲	۲-۶-۳ حفاظت به وسیله مدارهای RC در مقابل اضافه فشار های الکتریکی داخلی

صفحه	عنوان
۵۴	۳-۶-۳ حفاظت به وسیله مدارهای RC در مقابل اضافه فشارهای الکتریکی خارجی
۵۴	۳-۶-۴ حفاظت به وسیله نیمه هادیها در مقابل اضافه فشارهای الکتریکی
۵۶	۳-۷ جزوهای مکمل

۵۷	فصل چهارم تغییر دهنده (برشگر) های جریان متناوب
۵۷	۴-۱ مقدمه
۵۷	۴-۱-۱ کلیات
۵۷	۴-۱-۲ اتصال موازی معکوس تیرستورها-ترياك
۵۸	۴-۱-۳ کاربردهای تغییر دهنده (برشگر) های جریان متناوب
۵۹	۴-۲ تغییر دهنده (برشگر) جریان متناوب تک فازه
۵۹	۴-۲-۱ مدار
۶۰	۴-۲-۲ باراهمی
۶۱	۴-۲-۳ بارالقای
۶۳	۴-۲-۴ باراهمی و القایی
۶۷	۴-۲-۵ مشخصه های فرمان
۶۸	۴-۲-۶ قدرت اکتیو و رثا کتیو
۷۲	۴-۳ تغییر دهنده (برشگر) جریان سه فازه
۷۲	۴-۳-۱ مدار
۷۲	۴-۳-۲ باراهمی
۷۳	۴-۳-۳ بارالقای
۷۷	۴-۳-۴ باراهمی و القایی
۷۹	۴-۳-۵ مشخصه های فرمان

۸۱	فصل پنجم مبدل های جریان: کارکرد ایدئال
۸۱	۵-۱ مقدمه
۸۱	۵-۱-۱ کلیات
۸۱	۵-۱-۲ کاربردهای مبدل های جریان
۸۳	۵-۱-۳ بار با جریان دائم
۸۴	۵-۱-۴ مفروضات بررسی کارکرد ایدئال
۸۴	۵-۲ اتصال ستاره سه فازه
۸۴	۵-۲-۱ مدار
۸۵	۵-۲-۲ کارکرد

صفحه	عنوان
۸۷	۵-۲-۳ شاخص ضربان و شاخص کموتاسیون
۸۷	۵-۳ اتصال ستاره تک فازه
۸۷	۵-۳-۱ مدار
۸۷	۵-۳-۲ کارکرد
۸۹	۵-۳-۳ شاخص ضربان و شاخص کموتاسیون
۸۹	۵-۴ اتصال ستاره شش فازه
۸۹	۵-۴-۱ مدار
۹۰	۵-۴-۲ کارکرد
۹۱	۵-۴-۳ شاخص ضربان و شاخص کموتاسیون
۹۱	۵-۵ اتصال با پیچک جذب کننده
۹۱	۵-۵-۱ کلیات
۹۱	۵-۵-۲ مدار
۹۲	۵-۵-۳ کارکرد
۹۴	۵-۵-۴ شاخص ضربان و شاخص کموتاسیون
۹۴	۵-۵-۵ اتصالهای دیگر با پیچک جذب کننده
۹۵	۵-۶ اتصال پل سه فازه
۹۵	۵-۶-۱ به دست آوردن اتصال پل سه فازه
۹۶	۵-۶-۲ مدار
۹۷	۵-۶-۳ کارکرد
۹۹	۵-۶-۴ شاخص ضربان و شاخص کموتاسیون
۱۰۰	۵-۷ اتصال پل تک فازه
۱۰۰	۵-۷-۱ مدار
۱۰۱	۵-۷-۲ کارکرد
۱۰۲	۵-۷-۳ شاخص ضربان و شاخص کموتاسیون
۱۰۳	۵-۸ اتصال پل تک فازه مختلط
۱۰۳	۵-۸-۱ کلیات
۱۰۳	۵-۸-۲ اتصال نیمه کنترل شده به طریق متقارن
۱۰۳	۵-۸-۳ کارکرد
۱۰۵	۵-۸-۴ اتصال نیمه کنترل شده به طریق نامتقارن
۱۰۶	۵-۸-۵ کارکرد
۱۰۸	۵-۸-۶ شاخص ضربان و شاخص کموتاسیون
۱۰۸	۵-۹ فشار الکتریکی دایم و مشخصه ایدئال
۱۰۸	۵-۹-۱ تعریف فشار الکتریکی دایم
۱۰۸	۵-۹-۲ روند تغییرات فشار الکتریکی دایم بر حسب زاویه تأخیر آتش

۱۱۰	۳-۹-۵ فشار الکتریکی دایم يك گروه كموتاسيون
۱۱۱	۴-۹-۵ فشار الکتریکی دایم مبدل جریان
۱۱۲	۵-۹-۵ فشار الکتریکی دایم در اتصال پل مختلط
۱۱۲	۶-۹-۵ فشار الکتریکی دایم در اتصال با پیچك جذب كننده
۱۱۲	۷-۹-۵ مشخصه ایدئال
۱۱۴	۸-۹-۵ شرایط كار
۱۱۴	۱۰-۵ جمع بندی

فصل ششم مبدل‌های جریان: پدیده داخل

۱۱۷	۱-۶ مقدمه
۱۱۷	۱-۱-۶ کلیات
۱۱۷	۲-۱-۶ فرض‌های مطالعه پدیده داخل
۱۱۸	۲-۶ پدیده داخل
۱۱۸	۱-۲-۶ داخل در يك گروه كموتاسيون
۱۲۰	۲-۲-۶ زاویه داخل يك گروه كموتاسيون
۱۲۲	۳-۲-۶ بستگیهای زاویه داخل
۱۲۳	۴-۲-۶ فشار الکتریکی دایم در حين داخل
۱۲۴	۵-۲-۶ داخل در اتصال پل سه فازه
۱۲۶	۶-۲-۶ داخل در اتصال پل تك فازه
۱۲۸	۷-۲-۶ داخل در اتصال پل تك فازه مختلط
۱۲۹	۳-۶ افت فشار الکتریکی القایی و مشخصه بار
۱۲۹	۱-۳-۶ افت فشار الکتریکی القایی
۱۳۱	۲-۳-۶ افت فشار الکتریکی القایی در اتصال پل تك فازه
۱۳۱	۳-۳-۶ افت فشار الکتریکی القایی نسبی
۱۳۲	۴-۳-۶ مقاومت داخلی مبدل جریان
۱۳۳	۵-۳-۶ افت فشارهای الکتریکی دیگر
۱۳۳	۶-۳-۶ فشار الکتریکی دایم در مبدل جریان
۱۳۴	۷-۳-۶ فشار الکتریکی دایم در اتصال پل مختلط
۱۳۴	۸-۳-۶ مشخصه بار
۱۳۶	۹-۳-۶ شرایط كار كرد
۱۳۶	۴-۶ محدودیت‌های عناصر يكسو كننده
۱۳۶	۱-۴-۶ کلیات
۱۳۶	۲-۴-۶ محدودیت فشار الکتریکی

صفحه	عنوان
۱۳۸	۳-۴-۶ محدودیت جریان
۱۳۹	۵-۶ کارکرد به صورت اندولر
۱۳۹	۱-۵-۶ کلیات
۱۴۰	۲-۵-۶ زاویه خاموشی
۱۴۱	۳-۵-۶ حد کارکرد به صورت اندولر
۱۴۲	۴-۵-۶ کموتاسیون ناموفق
۱۴۵	فصل هفتم مبدل‌های جریان: کارکرد واقعی
۱۴۵	۱-۷ مقدمه
۱۴۵	۱-۱-۷ کلیات
۱۴۵	۲-۱-۷ فرض‌های بررسی کارکرد واقعی
۱۴۶	۲-۷ روند تغییرات جریان دایم
۱۴۶	۱-۲-۷ تعیین طرح‌واره (شمای) معادل برای اتصال ستاره سه‌فازه
۱۴۸	۲-۲-۷ طرح‌واره (شمای) معادل برای اتصال پل سه‌فازه
۱۵۰	۳-۲-۷ تعیین طرح‌واره معادل برای اتصال پل تک‌فازه
۱۵۱	۴-۲-۷ معادله دیفرانسیل عمومی
۱۵۲	۵-۲-۷ پاسخ عمومی معادله دیفرانسیل
۱۵۴	۶-۲-۷ پاسخ خاص برای اتصال ستاره سه‌فازه
۱۵۷	۷-۲-۷ زاویه تداخل
۱۵۸	۸-۲-۷ نتیجه‌گیری
۱۵۹	۳-۷ هدایت ناپیوسته
۱۵۹	۱-۳-۷ کلیات
۱۵۹	۲-۳-۷ شرایط کار در اتصال ستاره سه‌فازه
۱۶۰	۳-۳-۷ شرایط کار در اتصال پل سه‌فازه
۱۶۱	۴-۳-۷ شرایط کار در اتصال پل تک‌فازه
۱۶۲	۵-۳-۷ محاسبه جریان دایم
۱۶۴	۶-۳-۷ حد هدایت ناپیوسته
۱۶۴	۷-۳-۷ فشار الکتریکی دایم
۱۶۵	۸-۳-۷ شرایط روشن شدن
۱۶۶	۹-۳-۷ مشخصه‌ها در کارکرد با هدایت ناپیوسته
۱۶۷	۴-۷ بار اهمی خالص
۱۶۷	۱-۴-۷ کلیات
۱۶۸	۲-۴-۷ فشار الکتریکی دایم

۱۷۱	فصل هشتم ترانسفورماتور برای مبدل‌های جریان
۱۷۱	۸-۱ مقدمه
۱۷۱	۸-۱-۱ کلیات
۱۷۱	۸-۱-۲ روابط بنیادی در ترانسفورماتور سه‌فازه
۱۷۴	۸-۲ ترانسفورماتور ستاره-ستاره تغذیه‌کننده مبدل جریان با اتصال ستاره سه‌فازه
۱۷۴	۸-۲-۱ روابط برای جریان‌ها
۱۷۵	۸-۲-۲ فوران دایم
۱۷۷	۸-۳ ترانسفورماتور مثلث-ستاره‌ای تغذیه‌کننده مبدل جریان با اتصال ستاره سه‌فازه
۱۷۷	۸-۳-۱ روابط برای جریان‌ها
۱۷۹	۸-۳-۲ فوران دایم
۱۸۰	۸-۳-۳ جریان‌های مؤثر و قدرتهای ظاهری
۱۸۲	۸-۴ ترانسفورماتور ستاره-زیگزاگی تغذیه‌کننده مبدل جریان با اتصال ستاره سه‌فازه
۱۸۲	۸-۴-۱ روابط برای جریان‌ها
۱۸۳	۸-۴-۲ فوران دایم
۱۸۴	۸-۴-۳ جریان‌های مؤثر و قدرتهای ظاهری
۱۸۶	۸-۵ ترانسفورماتور تغذیه‌کننده مبدل جریان با اتصال پل سه‌فازه
۱۸۶	۸-۵-۱ فوران دایم
۱۸۶	۸-۵-۲ جریان‌های مؤثر و قدرتهای ظاهری

۱۸۹	فصل نهم عکس‌العمل مبدل‌های جریان بر روی شبکه تغذیه
۱۸۹	۹-۱ مقدمه
۱۹۰	۹-۲ جریان‌های شبکه
	۹-۲-۱ مبدل با اتصال ستاره سه‌فازه تغذیه شده بدوسیله ترانسفورماتور مثلث-ستاره‌ای
۱۹۰	
۱۹۰	۹-۲-۲ بسط به سری فوریه در اتصال ستاره سه‌فازه
۱۹۳	۹-۲-۳ مبدل جریان با اتصال پل سه‌فازه
۱۹۳	۹-۲-۴ بسط بدسری فوریه برای اتصال پل سه‌فازه
۱۹۶	۹-۲-۵ اثر تداخل
۱۹۶	۹-۳ اثر بر فشار الکتریکی تغذیه
۱۹۶	۹-۳-۱ کلیات

صفحه	عنوان
۱۹۶	۲-۳-۹ اعوجاج در فشار الکتریکی
۱۹۹	۳-۳-۹ فیلترهای صاف کننده
۱۹۹	۴-۹ قدرت اکتیو و رئاکتیو
۱۹۹	۱-۴-۹ روابط بنیادی
۲۰۱	۲-۴-۹ اثر زاویه تأخیر آتش
۲۰۲	۳-۴-۹ ضریب قدرت
۲۰۳	۴-۴-۹ اثر کموتاسیون
۲۰۴	۵-۴-۹ اختلاف فاز موج اصلی
۲۰۵	۵-۹ فرمان مرحله ای
۲۰۵	۱-۵-۹ اتصال
۲۰۶	۲-۵-۹ کارکرد ایدئال
۲۰۷	۳-۵-۹ اثر کموتاسیون
۲۰۹	فصل دهم: مبدل‌های جریان دو طرفه
۲۰۹	۱-۱۰ مقدمه
۲۰۹	۱-۱-۱۰ کلیات
۲۰۹	۲-۱-۱۰ فرض‌های بررسی کارکرد
۲۱۰	۲-۱۰ اتصال‌های با جریان گردشی
۲۱۰	۱-۲-۱۰ کلیات
۲۱۰	۲-۲-۱۰ اتصال موازی معکوس
۲۱۲	۳-۲-۱۰ اتصال متقاطع
۲۱۳	۴-۲-۱۰ اتصال به صورت H
۲۱۵	۳-۱۰ جریان گردشی
۲۱۵	۱-۳-۱۰ کلیات
	۲-۳-۱۰ جریان گردشی در اتصال موازی معکوس دو مبدل جریان با اتصال
۲۱۶	ستاره سه فاز
۲۲۴	۳-۳-۱۰ جریان گردشی در اتصال‌های دیگر
۲۲۵	۴-۳-۱۰ مشخصه‌های بار
۲۲۶	۵-۳-۱۰ تنظیم جریان گردشی
۲۲۶	۴-۱۰ اتصال‌های بدون جریان گردشی
۲۲۶	۱-۴-۱۰ کلیات
۲۲۷	۲-۴-۱۰ اتصال‌های موازی معکوس تیربستورها
۲۲۷	۳-۴-۱۰ کنترل اتصال‌های بدون جریان گردشی

صفحه	عنوان
۲۳۱	فصل یازدهم مبدل‌های فرکانس با کموتاسیون طبیعی
۲۳۱	۱-۱۱ مقدمه
۲۳۱	۱-۱۱-۱ کلیات
۲۳۱	۲-۱-۱۱ کاربردهای مبدل‌های فرکانس با کموتاسیون طبیعی
۲۳۳	۳-۱-۱۱ مفروضات مطالعه کارکرد
۲۳۳	۲-۱۱ مبدل‌های فرکانس مستقیم
۲۳۳	۱-۲-۱۱ کلیات
۲۳۳	۲-۲-۱۱ مدار تک‌فاز
۲۳۴	۳-۲-۱۱ مدار سدفازه
۲۳۶	۴-۲-۱۱ کنترل دوزنقه‌ای
۲۳۷	۵-۲-۱۱ کنترل سینوسی
۲۳۹	۳-۱۱ مبدل فرکانس با مدار جریان دایم میانجی
۲۳۹	۱-۳-۱۱ کلیات
۲۳۹	۲-۳-۱۱ مدار
۲۴۱	۳-۳-۱۱ کارکرد
۲۴۴	۴-۳-۱۱ قدرتهای اکتیو و رثاکتیو
۲۴۴	۵-۳-۱۱ ملاحظات در باره کاربرد مبدل‌های جریان با مدار جریان دایم میانجی
۲۴۵	۴-۱۱ مبدل‌های فرکانس با بار نوسانگر
۲۴۵	۱-۴-۱۱ کلیات
۲۴۶	۲-۴-۱۱ مبدل‌های فرکانس با بار نوسانگر موازی
۲۴۶	۳-۴-۱۱ کارکرد
۲۴۸	۴-۴-۱۱ مبدل‌های فرکانس با بار نوسانگر متوالی
۲۴۸	۵-۴-۱۱ کارکرد

۲۵۱	فصل دوازدهم تغییر دهنده (برشگر) های جریان دایم: کارکرد ایدئال
۲۵۱	۱-۱۲ مقدمه
۲۵۱	۱-۱-۱۲ کلیات
۲۵۲	۲-۱-۱۲ کاربردهای تغییردهنده (برشگر) های جریان دایم
۲۵۲	۳-۱-۱۲ فرضهای بررسی کارکرد ایدئال
۲۵۲	۲-۱۲ تغییردهنده (برشگر) های ضربانی جریان دایم
۲۵۲	۱-۲-۱۲ کلیات
۲۵۳	۲-۲-۱۲ مدار
۲۵۵	۳-۲-۱۲ کارکرد

صفحه	عنوان
۲۵۶	۱۲-۲-۴ مشخصه ایدئال
۲۵۷	۱۲-۲-۵ شرایط کار
۲۵۷	۱۲-۳-۳ بازپس گیری در برشگر ضربانی جریان دایم
۲۵۷	۱۲-۳-۱ کلیات
۲۵۷	۱۲-۳-۲ کار کرد
۲۵۹	۱۲-۳-۳ مشخصه ایدئال
۲۵۹	۱۲-۳-۴ شرایط کار
۲۶۰	۱۲-۴-۴ کموتاسیون ضربانی مقاومت
۲۶۰	۱۲-۴-۱ کلیات
۲۶۰	۱۲-۴-۲ اتصال متوالی
۲۶۲	۱۲-۴-۳ مقاومت ظاهری
۲۶۲	۱۲-۴-۴ اتصال موازی
۲۶۴	۱۲-۴-۵ مقاومت ظاهری
۲۶۴	۱۲-۵-۵ خازن حایل (میانگیر)
۲۶۴	۱۲-۵-۱ کلیات
۲۶۵	۱۲-۵-۲ القاگری L_a بینهایت
۲۶۷	۱۲-۵-۳ القاگری L_a مشخص
۲۶۹	۱۲-۶-۶ موج جریان دایم
۲۶۹	۱۲-۶-۱ کلیات
۲۶۹	۱۲-۶-۲ روابط بنیادی
۲۷۱	۱۲-۶-۳ مقدار متوسط جریان دایم
۲۷۲	۱۲-۶-۴ موج
۲۷۴	۱۲-۶-۵ شرط ناپیوستگی
۲۷۴	۱۲-۷-۷ تغییر فشار الکتریکی دایم
۲۷۴	۱۲-۷-۱ کلیات
۲۷۶	۱۲-۷-۲ مدولاسیون زمانی تپها
۲۷۶	۱۲-۷-۳ مدولاسیون فرکانسی تپها
۲۷۷	۱۲-۷-۴ تنظیم جریان دایم

۲۸۱	فصل سیزدهم برشگر جریان دایم، کموتاسیون اجباری
۲۸۱	۱۳-۱ مقدمه
۲۸۱	۱۳-۱-۱ کلیات
۲۸۱	۱۳-۱-۲ فرضهای مطالعه کموتاسیون اجباری

صفحه	عنوان
۲۸۲	۲-۱۳ پدیده کموتاسیون اجباری
۲۸۲	۱-۲-۱۳ طرح وانه معادل
۲۸۳	۲-۲-۱۳ وصل
۲۸۳	۳-۲-۱۳ قطع
۲۸۳	۴-۲-۱۳ بار اولیه خازن خاموش کننده
۲۸۶	۵-۲-۱۳ محاسبه پدیده وصل
۲۸۸	۶-۲-۱۳ محاسبه پدیده قطع
۲۹۳	۷-۲-۱۳ دیود قطع کننده
۲۹۴	۳-۱۳ تعیین ابعاد مدار خاموش کننده
۲۹۴	۱-۳-۱۳ زمان حفاظت
۲۹۵	۲-۳-۱۳ تعیین خازن خاموش کننده
۲۹۶	۳-۳-۱۳ تعیین القاگری L_e
۲۹۷	۴-۱۳ محاسبه دقیق پدیده کموتاسیون اجباری
۲۹۷	۱-۴-۱۳ کلیات
۲۹۸	۲-۴-۱۳ روابط بنیادی
۲۹۹	۳-۴-۱۳ روند تغییرات جریان دایم
۳۰۰	۴-۴-۱۳ روند تغییرات فشار الکتریکی دو سرخازن خاموش کننده
۳۰۲	۵-۴-۱۳ زمان حفاظت و مدت زمان کموتاسیون
۳۰۲	۶-۴-۱۳ روابط ساده شده
۳۰۳	۷-۴-۱۳ بار نهایی خازن خاموش کننده
۳۰۴	۸-۴-۱۳ مثال عددی
۳۰۶	۵-۱۳ اثر کموتاسیون اجباری بر فشار الکتریکی دایم
۳۰۶	۱-۵-۱۳ کلیات
۳۰۷	۲-۵-۱۳ فشار الکتریکی ایدئال
۳۰۷	۳-۵-۱۳ فشار الکتریکی دایم ناشی از کموتاسیون اجباری ($L = \infty$)
۳۰۸	۴-۵-۱۳ فشار الکتریکی دایم ناشی از کموتاسیون اجباری ($L \neq \infty$)

۳۱۳	فصل چهاردهم اندولرهای با کموتاسیون اجباری: کارکرد ایدئال
۳۱۳	۱-۱۴ مقدمه
۳۱۳	۱-۱-۱۴ کلیات
۳۱۴	۲-۱-۱۴ کاربرد اندولرهای با کموتاسیون اجباری
۳۱۵	۳-۱-۱۴ فرضهای بررسی کارکرد ایدئال
۳۱۵	۲-۱۴ نتیجه گیری اتصال به صورت پل

۳۱۵	۱-۲-۱۴ کلیات
۳۱۵	۲-۲-۱۴ صورتهای مختلف برشگر جریان دایم
۳۱۸	۳-۲-۱۴ اتصال به صورت پل
۳۲۰	۳-۱۴ اندولرهای تك فازه
۳۲۰	۱-۳-۱۴ کلیات
۳۲۰	۲-۳-۱۴ حالت‌های هدایت
۳۲۲	۳-۳-۱۴ ترکیب فشار الکتریکی متناوب
۳۲۴	۴-۳-۱۴ تغییر فرکانس
۳۲۴	۵-۳-۱۴ تغییر مستطیلی فشار الکتریکی
۳۲۵	۶-۳-۱۴ تغییر ضربانی فشار الکتریکی
۳۲۷	۷-۳-۱۴ خازن میانگیر
۳۲۸	۴-۱۴ اندولرهای سه فازه با اتصال پل
۳۲۸	۱-۴-۱۴ کلیات
۳۲۸	۲-۴-۱۴ ترکیب سیستم فشار الکتریکی سه فازه
۳۳۱	۳-۴-۱۴ تغییر ضربانی فشار الکتریکی
۳۳۲	۵-۱۴ اندولرهای سه فازه متشکل از سه اندولر تك فازه
۳۳۲	۱-۵-۱۴ کلیات
۳۳۳	۲-۵-۱۴ ترکیب سیستم فشار الکتریکی سه فازه
۳۳۵	۳-۵-۱۴ تغییر مستطیلی فشار الکتریکی
۳۳۶	۶-۱۴ اتصال متوالی اندولرهای سه فازه
۳۳۶	۱-۶-۱۴ کلیات
۳۳۷	۲-۶-۱۴ ترکیب سیستم فشار الکتریکی سه فازه
۳۳۸	۳-۶-۱۴ تغییر مستطیلی فشار الکتریکی

فصل پانزدهم ازولرهای با کموتاسیون اجباری: پدیده کموتاسیون

۳۳۹	۱-۱۵ مقدمه
۳۳۹	۱-۱-۱۵ کلیات
۳۳۹	۲-۱-۱۵ فرضهای بررسی کموتاسیون اجباری
۳۴۰	۲-۱۵ دیگر مدارهای خاموش کننده
۳۴۰	۱-۲-۱۵ کلیات
۳۴۰	۲-۲-۱۵ اتصالهای با مدار نوسانگر
۳۴۱	۳-۲-۱۵ اتصالهای ران و کش (پوش-پول)
۳۴۳	۳-۱۵ خاموش شدن مجرد

صفحه	عنوان
۳۴۳	۱-۳-۱۵ کلیات
۳۴۴	۲-۳-۱۵ کموتاسیون اجباری
۳۴۵	۳-۳-۱۵ محاسبه پدیده گذرا
۳۴۸	۴-۱۵ خاموش شدن فاز به فاز
۳۴۸	۱-۴-۱۵ کلیات
۳۴۹	۲-۴-۱۵ کموتاسیون اجباری
۳۵۱	۳-۴-۱۵ محاسبه پدیده گذرا

۳۵۵	فصل شانزدهم مبدل‌های فرکانس با کموتاسیون اجباری
۳۵۵	۱-۱۶ مقدمه
۳۵۵	۱-۱-۱۶ کلیات
۳۵۵	۲-۱-۱۶ کاربرد مبدل‌های فرکانس با کموتاسیون اجباری
۳۵۶	۲-۱۶ مبدل‌های فرکانس با مدار میانجی با فشار الکتریکی دایم
۳۵۶	۱-۲-۱۶ مدار اساسی
۳۵۷	۲-۲-۱۶ تغذیه مدار میانجی
۳۵۹	۳-۲-۱۶ مدار کامل مبدل فرکانس
۳۵۹	۳-۱۶ مبدل فرکانس با مدار جریان دایم میانجی و اندولر با پل خاموش کننده کمکی
۳۵۹	۱-۳-۱۶ مدار
۳۶۰	۲-۳-۱۶ کموتاسیون اجباری
۳۶۱	۳-۳-۱۶ پدیده گذرا در دوران کموتاسیون اجباری
۳۶۶	۴-۳-۱۶ فشار الکتریکی دایم در مدار میانجی
۳۶۸	۴-۱۶ مبدل‌های فرکانس با مدار جریان دایم میانجی، واندولر با خاموش شدن مرحله‌ای فاز
۳۶۸	۱-۴-۱۶ مدار
۳۶۹	۲-۴-۱۶ کموتاسیون اجباری
۳۷۰	۳-۴-۱۶ پدیده گذرا در طول کموتاسیون اجباری
۳۷۵	۴-۴-۱۶ فشار الکتریکی دایم در مدار میانجی

۳۷۷	واژه نامه انگلیسی به فارسی
-----	----------------------------



بسم الله الرحمن الرحيم

پیشگفتار مترجم

با پیدایش نیمه‌هادیهای قدرت و تولید انبوه آنها برای مصارف صنعتی، الکترونیک صنعتی اهمیت ویژه‌ای یافته است و کار بر آن در صنعت افزایش روزافزونی دارد. در واقع امروزه کمتر کسی است که با کار بردهای صنعتی انرژی الکتریکی آشنا باشد و با مبحث الکترونیک صنعتی سروکار نداشته باشد. از این رو یکی از درسهای اساسی دانشکده‌های مهندسی برق بدین مبحث اختصاص دارد. به علت نبودن مطلب تعداد کتابهای انتشار یافته در این زمینه محدود است و بیشتر انتشارات موجود از دیدگاههای خاص و توسط سازندگان این گونه وسایل به رشته تحریر در آمده‌اند و نمی‌توانند به صورت کتاب درسی مورد استفاده قرار گیرند.

در جستجوی کتابی دانشگاهی در این زمینه به یک مجموعه بیست جلدی تحت عنوان «traité d'électricité» برخورد کردم که از طرف هیئت علمی بخش برق «مدرسه پلی‌تکنیک فدرال لوزان» در سوئیس منتشر شده است و کلیه مطالب درسی مورد نیاز دانشجویان رشته مهندسی برق را در بر می‌گیرد. جلدهای پانزدهم و شانزدهم این مجموعه به مبحث الکترونیک صنعتی اختصاص دارد که به ترتیب «الکترونیک قدرت» و «الکترونیک تنظیم و فرمان» را بررسی می‌کنند.

کتاب حاضر ترجمه جلد پانزدهم این مجموعه است که توسط «Bühler Hansreudi» تألیف شده و چاپ اول آن در سال ۱۹۷۹ به زبان فرانسه انتشار یافته است. این کتاب از طرف ستاد انقلاب فرهنگی به عنوان کتاب مرجع انتخاب شده است.

مترجم تا توانسته کوشیده است امانت در ترجمه را رعایت نماید و از تغییر دادن ترتیب مطالب، افزودن مطالبی تشریحی و حذف کردن موارد خیلی اختصاصی خودداری کند. بنابراین دانشجویانی که برای نخستین بار مطالب الکترونیک قدرت را مطالعه می‌کنند باید با اصول فیزیک نیمه‌هادیها، الکترونیک عمومی، مدارها و ماشینهای الکتریکی آشنایی داشته باشند.

قدیر عزیزی قنادی



مقدمه مؤلف

جایگاه جلد پانزدهم در مجموعه «traité d'électricité»

الکترونیک صنعتی می‌تواند تقریباً به دو زمینه متمایز «الکترونیک قدرت» و «الکترونیک تنظیم و فرمان» تقسیم‌بندی شود. جلد پانزدهم از مجموعه «traité d'électricité» به الکترونیک قدرت اختصاص دارد. مسئله موردنظر در این زمینه ساخت وسایلی است که تبدیل یک سیستم جریان را به سیستمی دیگر امکان‌پذیر سازند. به عنوان مثال می‌توان از تبدیل یک سیستم جریان متناوب به یک سیستم جریان دایم و برعکس نام برد. این وسایل عموماً قادرند کمیت‌های خروجی را در دامنه بسیار وسیعی تغییر دهند. این تغییرات در اثر فرمان‌هایی با قدرت خیلی کم صورت می‌پذیرند، بنابراین این وسایل را می‌توان نوعی تقویت‌کننده قدرت نیز دانست.

در ساخت این گونه وسایل از نیمه هادیها و اگر دقیقتر بگوییم از دیودها، تریستورها و تریاک‌ها استفاده می‌شود. عناصر گوناگون الکترونیک عمومی در جلد هفتم مجموعه یادشده بررسی شده‌اند. در نتیجه پیشرفت‌ها و تحقیقات زیادی که در صنعت انجام شده، مدارهایی از اتصال‌های مختلف این عناصر به دست آمده است. هدف این جلد از مجموعه معرفی، تشریح و بررسی مهم‌ترین اتصال‌هایی است که امروزه به کار می‌روند. برای نیل به این هدف از قوانین بنیادی الکتریسته و به ویژه مدل به کاررفته در نظریه مدارها استفاده می‌شود که پایه‌های آن در جلد چهارم به صورت نظریه شبکه‌های کیرشهف معرفی شده است.

ترتیب کلی مطالب

فصل اول مقدمه‌ای بر الکترونیک صنعتی است که تقسیم‌بندی آن را به الکترونیک

قدرت والكترونيك تنظيم وفرمان بيان مي كند. در ضمن به مهمترين کاربردهاى الكترونيك صنعتى نيز در اين فصل اشاره شده است تا فايده عملى مطالب مندرج در جلدهاى پانزدهم و شانزدهم را روشن سازد. ارتباط موجود بين الكترونيك صنعتى و ديگر مباحث نيز در اين فصل بيان شده است تا لزوم آشنايى با ديگر رشته ها را نشان دهد.

در فصل دوم كه مقدمه اى بر الكترونيك قدرت دارد، پس از يادآورى اجمالى ويژگيهاى عمده عناصر قدرت، اتصالهاى مختلف بر حسب نوع كموتاسيون و چگونگى عمل تبديل تقسيم بندي مى شوند. براى كسانى كه مبحث الكترونيك قدرت را براى بار نخست مطالعه مى كنند ممكن است فهم قسمتهاى ۲-۲ الى ۲-۴ دشوار باشد. در اين صورت توصيه مى شود اين قسمتها پس از مطالعه ديگر فصلها ديده شوند.

در فصل سوم ملاحظات كلي درباره عناصر قدرتى كه به چگونگى اتصال بستگى ندارند يادآورى و مسائلى مانند انتخاب عنصر نيمه هادى، رفتار حرارتى و روش حفاظت آن بررسى مى شوند.

تغيير دهنده هاى جريان متناوب در فصل چهارم معرفى مى شوند. ايسن تغيير دهنده ها اتصالهاى نسبتاً ساده اى هستند كه تغيير فشار الكترىكى و جريان متناوب تك فازه يا سه فازه را امكان پذير مى سازند.

در فصلهاى پنجم تا نهم اتصالهاى سنتى يعنى مبدلهاى جريان معرفى و بررسى مى شوند. اين وسايل تبديل جريان متناوب را به جريان دايم مى سوزمى سازند. در اين كتاب اتصالهاى كه متداولتر هستند بيان مى شوند و به ترتيب كار كرد ايدئال، پديده تداخل، و كار كرد واقعى آنها تشريح مى گردند. بالاخره مسائلى كه در ارتباط با استفاده از ترانسفورماتورها پيش مى آيند و نيز عكس العمل مبدلهاى جريان بر روى شبكه تغذيه تجزيه و تحليل مى شوند.

مبدلهايى كه در اين فصلها بررسى مى شوند تنها مى توانند جريان دايم مثبت توليد كنند. از تركيب مناسب دو مبدل جريان اتصالهايى حاصل مى شوند كه مى توانند جريان دايم مثبت يا منفى فراهم سازند. اين مبدلهاى جريان دو طرفه در فصل دهم بررسى مى شوند. فصل يازدهم به مبدلهاى فرکانس با كموتاسيون طييعى مى پردازد كه بر اساس مبدلهاى جريان سنتى ساخته مى شوند.

بالاخره در فصلهاى دوازدهم تا شانزدهم اتصالهاى نسويناى از الكترونيك قدرت تشريح مى شوند كه با كموتاسيون اجبارى كار مى كنند. طراحى و ساخت اين گونه اتصالها تنها با استفاده از تيرستورهاى خاص امكان پذير است. كار كرد ايدئال و كموتاسيون اجبارى تغيير دهنده هاى جريان دايم در فصلهاى دوازدهم و سيزدهم بررسى مى شوند. تغيير دهنده هاى جريان دايم وسايل هستند كه مى توانند فشار الكترىكى دايم را تغيير دهند. گسترش اين اتصالها به اتصالهايى به نام اندولرهاى با كموتاسيون اجبارى مى انجامد كه يك سيستم جريان دايم را به يك سيستم جريان متناوب تك فازه يا سه فازه با فرکانس متغير تبديل مى كنند. فصلهاى چهاردهم و پانزدهم به ترتيب به تشريح كار كرد ايدئال و پديده كموتاسيون در اندولرهاى با كموتاسيون اجبارى اختصاص دارند. فصل پايانى كتاب يعنى فصل شانزدهم،

مبدل‌های فرکانس با کموتاسیون اجباری را بررسی می‌کند.
در انتها فهرست منابع مورد استفاده در تألیف کتاب، آورده شده است. نظر به اینکه
هدف این کتابها تعمق عمومی در الکترونیک قدرت است از ذکر شماره آنها در متن کتاب
خودداری شده است.





فصل اول

مقدمه ای بر الکترونیک صنعتی

۱-۱ تحول در الکترونیک صنعتی

۱-۱-۱ کلیات

کاربرد الکترونیک، سالیان دراز، تنها به تکنیکهای فرکانس بالا (فرستنده‌ها، گیرنده‌ها، ...) محدود بود. تقریباً از سال ۱۹۵۰، استفاده از الکترونیک در صنعت (در زمینه کنترل، تنظیم و فرمان ماشین ابزارها، ماشینهای نورد و غیره) متداول شد.

در سالهای نخست، به علت پایین بودن «اطمینان بخشی» عناصر الکترونیکی موجود در آن زمان (لامپهای تقویت کننده، یکسوکننده، تیراترونها، مقاومتها و خازنها)، امکانات کاربرد آنها محدود بود. در واقع اطمینان بخشی این عناصر برای پاسخگویی به نیازمندیهای لازم و رو به افزایش کاربردهای جدید، در زمینه صنعتی، کافی نبود. تنها پس از گسترش اجزای الکترونیکی ویژه (با اطمینان بخشی زیادتر و خطای کمتر) بود که برخی از کاربردهای جدید امکان پذیر شد. بدین ترتیب شاخه نوینی از الکترونیک به نام «الکترونیک صنعتی» به وجود آمد.

در پرتو کشف نیمه هادیها (ترانزیستورها، تیریسورها، ...)، عناصری که به طور کامل به نیازمندیهای صنعتی (اطمینان بخشی بالا، ابعاد کوچک، عدم حساسیت در برابر لرزشهای مکانیکی) پاسخ می دهند، الکترونیک صنعتی پیشرفتی بسا ورنه نکردنی یافت. تقریباً پس از سال ۱۹۶۰ استفاده از نیمه هادیها در زمینه الکترونیک صنعتی متداول شد و امکان ساخت دستگاههای پیچیده تر، جهت خودکار نمودن فرایندهای^۱ صنعتی فراهم شد.

1) processus



بعلاوه، کوچک سازی این عناصر به صورت مدارهای مجتمع، که تقریباً از سال ۱۹۷۰ به قلمرو الکترونیک صنعتی وارد شد، امکان داد تا ضمن افزایش اطمینان بخشی و کاهش مصرف انرژی، جاگیری و قیمت دستگاهها کاهش یابد. به کمک مدارهای مجتمع، کامتر بودن و پیچیدگی تنظیمها و فرمانها توانست افزایش پیدا کند. پس از حدود سال ۱۹۷۵، با پیدایش «میکروپروسورها»^۱ (ریزپردازها) در برخی از کاربردهای الکترونیک صنعتی، سمت گیری تازه ای در این زمینه پدید می آید. این عناصر جدید در طرح تنظیمها و فرمانهای صنعتی تحولی بنیادی به وجود می آورند. مدارهایی که برای رفع نیازهای ویژه ساخته می شوند بیش از پیش با مدارهای فراگیرتری جایگزین می شوند و انطباق آنها برای یک کاربرد ویژه به کمک برنامه ریزی^۲ انجام می پذیرد.

۲-۱ تقسیم بندی به الکترونیک قدرت و الکترونیک تنظیم و فرمان

۱-۲-۱ کلیات

چنانکه شکل ۱-۱ نشان می دهد، الکترونیک صنعتی را می توان به دو شاخه الکترونیک قدرت و الکترونیک تنظیم و فرمان تقسیم بندی کرد. در «الکترونیک قدرت»، تقویت قدرت و قدرت خروجی دستگاههای به کار گرفته شده قابل توجه است. قدرت خروجی دستگاهها از حد پایین چند صد وات شروع می شود، به حدود ۱۰ MW گسترش می یابد و در حد نهایی به ۱۰۰۰ MW می رسد. در عوض در «الکترونیک تنظیم و فرمان»، انتقال و تدارک سیگنالها (نشانهها) اهمیت دارد و معمولاً قدرت خیلی کم و ناچیز است. قدرت خروجی این دستگاهها نوعاً بین $10\ \mu W$ و ۱ W تغییر می کند، و گاهی به حد نهایی چند صد وات می رسد.

۱-۲-۲ الکترونیک قدرت

«عناصر قدرت»، اساس و پایه الکترونیک قدرت را تشکیل می دهند. این عناصر را می توان به دو دسته: «عناصر یکسو کننده فرمان ناپذیر» (دیودها) و «عناصر یکسو کننده فرمان پذیر» (تیرستورها و تریاکها) تقسیم بندی کرد. عناصری مانند تیراترونها یا یکسو کننده های بخار جیموه ای را که امروزه بندرت ساخته و به کار برده می شوند، در نظر نمی گیریم. عناصر قدرت همراه با دستگاههای کمکی مخصوص (فرمان چکانها^۳، رادیاتورها، مدارهای حفاظتی RC)، مدولهای^۴ استاندارد را تشکیل می دهند که در ساخت «تجهیزات قدرت»^۵ مانند یکسو کننده ها، مبدل های جریان، مبدل های فرکانس و غیره به کار می روند.

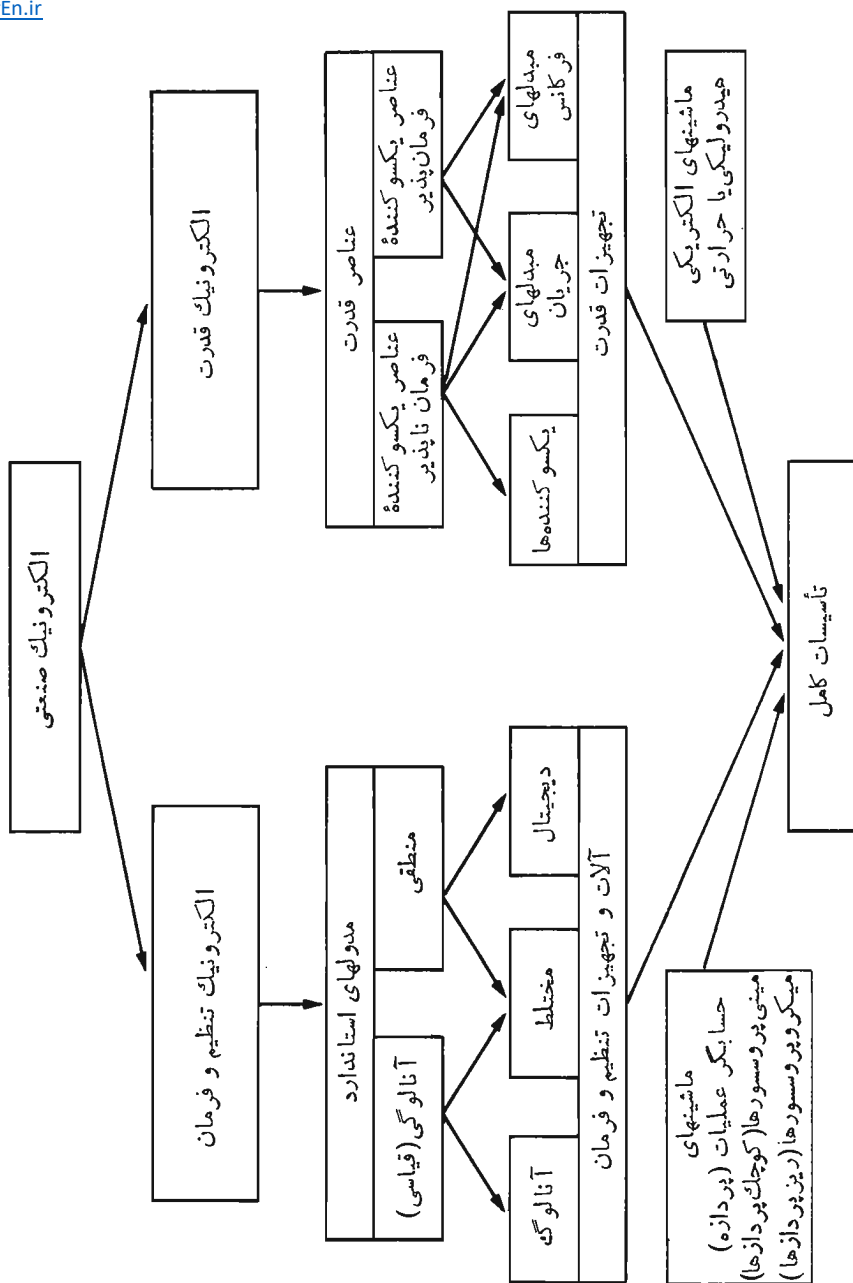
1) microprocesseur

2) programmation

3) gachette

4) module

5) équipements de puissance



شکل ۱-۱ تقسیم‌بندی الکترونیک صنعتی.

۳-۲-۱ الکترونیک تنظیم و فرمان

در زمینه الکترونیک تنظیم و فرمان، سازندگان، تولید «مدولهای استاندارد» را به طور سری توسعه داده اند تا، در ضمن بالابودن کمیت تولید، به کمک آنها ساخت وسایلی جهت انجام عملی بسیار متنوع، آسانتر شود. این مدولها را می توان بر حسب چگونگی کار به دو دسته متمایز تقسیم بندی کرد: مدولهای آنالوگی (قیاسی)^۱ (که به صورت پیوسته بین حدود مشخصی کار می کنند) و مدولهای منطقی^۲ (که به طور ناپیوسته و بین دو حد مشخص کار می کنند). «آلات و تجهیزات تنظیم و فرمان» را می توان از ترکیب این مدولهای استاندارد به دست آورد. این آلات و تجهیزات، یا به صورت تماماً آنالوگی (برای تنظیم) و یا به صورت تماماً دیجیتالی (رقمی) (برای فرمان و تنظیم دیجیتالی) کار می کنند. ممکن است کار این آلات و تجهیزات به صورت دو رگه^۳ (مختلط) نیز باشد، که ترکیبی است از مدولهای منطقی و آنالوگی (قیاسی) (تنظیمهای قابل انطباق، تنظیمهای بهینه).

۴-۲-۱ تأسیسات کامل

«تأسیسات کامل» از ترکیب تجهیزات قدرت و تجهیزات تنظیم و فرمان ساخته و معمولاً به وسیله ماشینهای الکتریکی (موتورها و ژنراتورها) یا گاهی ماشینهای هیدرولیکی یا حرارتی (توربینها، گرم کننده ها و غیره) تکمیل می شوند. در تأسیسات پیچیده تر، که توقعات از تنظیم و فرمان زیاد است، اغلب از «ماشینهای حسابگر فرایندها»^۴ (پردازها)، به ویژه از مینی پروسورها و میکروپروسورها (کوچک و ریز پردازها) استفاده می شود. ماشینهای حسابگر، دستگاههای الکترونیکی هستند که عمل تنظیم و فرمان را به عهده دارند. در این صورت وسایل قیاسی (آنالوگی)، رقمی (دیجیتالی) یا دو رگه (مختلط)، برای انجام اتصالات و تطبیق بین پردازنده و سیستمی که باید تنظیم کرد یا فرمان داد به کار می رود.

۳-۱ کاربردهای الکترونیک صنعتی

۱-۳-۱ کلیات

زمینه کاربردی الکترونیک صنعتی در بسیاری از شاخه های صنعت گسترش می یابد. مهمترین موارد استفاده در شکل ۱-۲ نشان داده شده است که در زیر به اجمال توضیح داده می شود.

-
- 1) analogique 2) logique 3) hybride
 4) calculateur de processus



شکل ۲-۱ مهمترین کاربردهای الکترونیک صنعتی.

۲-۳-۱ تغذیه تنظیم شده

تغذیه تنظیم شده ماشینهای الکتریکی، گسترده ترین زمینه کاربردی الکترونیک صنعتی را تشکیل می دهد. در این زمینه، چه از نقطه نظر ماشینهای الکتریکی مورد استفاده (ماشین جریان دایم، ماشین آسنکرون، و ماشین سنکرون) و چه از نقطه نظر تجهیزات به کار رفته (مبدل جریان و مبدل فرکانس) تنوع زیادی، وجود دارد. علاوه بر یک از شاخه های گوناگون صنعت، که از الکترونیک صنعتی برای تغذیه ماشینهایش استفاده می کند، دارای توقعات ویژه خود در چگونگی تجهیزات تنظیم و فرمان است که به عنوان مثال می توان از ماشین ابزارها، ماشینهای نورد و غیره نام برد.

نظر به اهمیت زیاد تغذیه تنظیم شده، بخشی از جلد دوم این کتاب به این موضوع اختصاص خواهد یافت.

۳-۳-۱ وسایل حمل و نقل (کشند)^۱

استفاده از الکترونیک صنعتی در وسایل حمل و نقل (کشند) نسبتاً جدید است. امکان این استفاده از زمانی به وجود آمد که عناصر نیمه هادی (غیر حساس در برابر لرزش) در الکترونیک صنعتی وارد شدند. موتورهای به کار رفته در حمل و نقل (کشند) را می توان به کمک مبدل های فرکانس و یا جریان، با جریان دایم و یا سه فازه ای که براحتی قابل تنظیم باشد تغذیه کرد. بدین ترتیب می توان وسایل حمل و نقلی (کشندی) ساخت که با سیستم های مختلف جریان (تک فازه با $\frac{16}{3}$ هرتز، ۵۰ هرتز و دایم ۱۵۰۰ ولت، ۳۰۰۰ ولت) تغذیه می شوند.

تجهیزات تنظیم و فرمان باعث آسانتر شدن وظایف مکانسینها می شوند. به عنوان مثال می توان ترتیبی داد تا راه اندازی، تنظیم سرعت، ترمز کردن، جلوگیری از لغزندگی، توقف در مقصد و کار با مصرف می نیمم (کمینه) به طور خودکار انجام پذیرد. از نقطه نظرفنی، حتی می توان قطاری ساخت که به طور اتوماتیک کار کند. مع هذا دلایل اقتصادی، ایمنی، و روانی از انجام چنین پروژه هایی، در سطح وسیع، جلوگیری می کنند.

۴-۳-۱ نیروگاهها و شبکه های الکتریکی

در نیروگاهها از الکترونیک قدرت برای تحریک آلترناتورها به طریق استاتیکی (مبدل های جریان) استفاده می شود. در شبکه های الکتریکی، به هم پیوستگی بین دوشبکه با فرکانسهای متفاوت به کمک مبدل های فرکانس استاتیک (ایستا) انجام می پذیرد. به علاوه انتقال انرژی الکتریکی تحت فشار الکتریکی بالا و جریان دایم با مبدل های استاتیکی (ایستا)، که جریان متناوب را به جریان دایم و بعکس تبدیل می کنند، صورت می گیرد. قدرتهایی که بدین-

1) traction

ترتیب منتقل می شود، خیلی بالا و در حدود ۱۰۰۰ MW است. در ضمن، ساخت جبران کننده های قدرت رثا کتیو به طریق استاتیکی (ایستا) نیز امکان پذیر است. همچنین تنظیم آلترناتورها، توربینها، گرم کننده ها و همین طور تنظیم فرکانس قدرت به طریق الکترونیکی انجام می پذیرد. بالاخره وسایل فرمان (به عنوان مثال: فرمان خودکار مرحله ای برای راه اندازی، مراقبت، و متوقف نمودن گروه های توربو-آلترناتورها) و رله های حفاظتی الکترونیکی نیز ساخته می شوند.

۱-۳-۵ ماشین ابزارها

در مورد ماشین ابزارها، الکترونیک صنعتی علاوه بر تغذیه تنظیم شده که قبلاً بیان شد، هرگونه فرمان مرحله به مرحله یا فرمان عددی این ماشینها را نیز ممکن می سازد. فرمان عددی امکان می دهد تا ساخت خودکار قطعات، از طریق برنامه ریزی قلبی در ماشین حسابگر (پردازه)، انجام پذیرد. برنامه ریزی ماشین حسابگر به وسیله نوارهای سوراخ شده یا نوارهای مغناطیسی صورت می گیرد.

۱-۳-۶ تأسیسات تحقیقات هسته ای

در زمینه تأسیسات تحقیقات هسته ای، الکترونیک صنعتی (به صورت مبدل های جریان) به طور مؤثری در ساخت منابع تغذیه آهنرباها (برای شتاب دهنده و غیره) به کار می رود. همچنین از وسایل تنظیم بسیار دقیق، برای میزان کردن جریان تحریک این آهنرباها استفاده می شود.

۱-۳-۷ فرایندهای شیمیایی و متالورژی

الکترونیک صنعتی همچنین در زمینه فرایندهای شیمیایی و متالورژی وارد شده است. در این زمینه، الکترونیک صنعتی از طرفی، برای تغذیه کوره ها، حمام های الکترولیتی و کوره های با فرکانس متوسط و بالا و از طرف دیگر، برای تنظیم رثا کتورهای شیمیایی و کوره های الکتریکی و همین طور برای اجرای فرمانهای مرحله ای فرایندها به کار می رود. در هر حال الکترونیک صنعتی، با تکنولوژیهای دیگری (وسایل پنوماتیکی-هوایی-و هیدرولیکی) که می توانند جایگزین وسایل الکترونیکی شوند، در رقابت است. استفاده از ماشینهای حسابگر از دیرزمان متداول بوده است.

۴-۱ طرح و اجرای یک تأسیسات

۱-۴-۱ کلیات

شکل ۱-۳ مراحل مختلفی را نشان می دهد که باید در تدارک طرح و اجرای یک تأسیسات

نوین الکترونیک صنعتی تعقیب شود. امکانات موجود برای انجام هر یک از مراحل مختلف در طرف راست شکل بیان شده است.

چنانچه هدف، ساخت تأسیساتی باشد که قبلاً خود یا مشابه آن ساخته شده است، به تعقیب همه مراحل بیان شده در شکل ۱-۳ نیاز نیست. در چنین مواردی، وجود پرونده‌ای روشن و کامل، شامل شمای (طرح‌واره) مدار، توضیحات مشروح، و مشخصات عناصر، خیلی مفید و مهم خواهد بود.

برنامه‌ریزی برای ساخت یک تأسیسات نوین، همراه با اشکالاتی است زیرا، برآورد زمان لازم برای انجام مراحل مختلف، بویژه مرحله توسعه، دشوار است.

۲-۴-۱ تحلیل سیستم تنظیم شونده

در طرح و اجرای هر تأسیسات جدید الکترونیک صنعتی، اولین مرحله، تحلیل سیستم تنظیم شونده است. بدین ترتیب چگونگی رفتار استاتیکی (ایستا) و دینامیکی (پویای) سیستم مشخص می‌شود. در بین ابزارهای تحلیل در دسترس برای این مرحله، می‌توان از نظریه سیستمها، معادلات دیفرانسیل، تبدیل لاپلاس، نظریه سیستمهای منطقی، جبر بول^۱ و غیره نام برد. همچنین در صورت نیاز، آن قوانین فیزیکی که کار ماشینهای الکتریکی، مکانیکی، هیدرولیکی و غیره را توجیه می‌کنند، نیز به کار خواهند رفت.

در مواردی که سیستم مورد مطالعه بسیار پیچیده است یا تشریح آن به کمک قوانین فیزیکی مشکل است (مانند فرایندهای شیمیایی)، گاهی تحلیلی از مشخصات تجربی سیستم لازم می‌شود (اندازه‌گیریها، اطلاعات به دست آمده از منحنیهای مشخصه، تعیین چگونگی سیستم با روشهای آماری و غیره).

تحلیل سیستم همچنین شامل مشخص کردن شرایط تنظیم (مانند هدف تنظیم)، تصریح کیفیتهای خواسته شده، الزاماتی که باید در نظر گرفته شوند و غیره نیز هست.

۳-۴-۱ طرح مدارهای تنظیم و فرمان

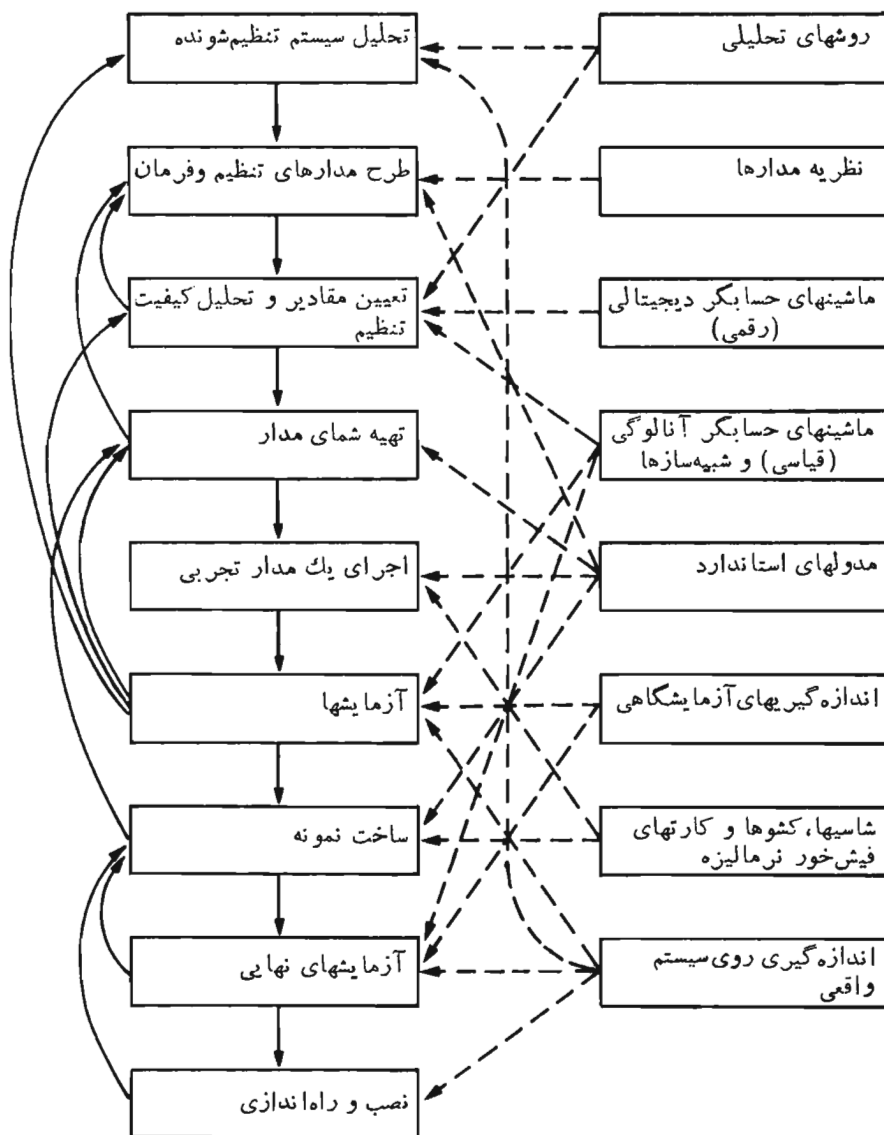
پس از تحلیل سیستم، می‌توان مدارهای تنظیم و فرمان را به صورت «شما-بلوک»^۲ طرح کرد. در این مورد از نظریه مدارها، و تجربیات به دست آمده از تأسیسات مشابه کمک گرفته می‌شود. از این مرحله به بعد لازم است در دسترس بودن مدوله‌ای استاندارد مورد نیاز، در نظر گرفته شود.

۴-۴-۱ تعیین مقادیر و تحلیل کیفیت تنظیم

مرحله بعدی عبارت از تعیین مقادیر عناصر و تحلیل کیفیت تنظیم است.

1) boole

2) schema-bloc



شکل ۳-۱ مراحل طرح و اجرای تأسیسات نوین.



الزاماً باید مجموعه ماشینهای الکتریکی و مکانیکی و وسایل قدرت به صورت یک سیستم واحد در نظر گرفته شود. تعیین مقادیر عناصر باید از طریق مطالعه بر روی سیستم انجام پذیرد تا بهترین رفتار دینامیکی (پویا) برای مجموعه تأسیسات به دست آید. سپس مقادیر «تنظیم کننده‌ها»^۱ چنان تعیین خواهند شد که مدارهای تنظیم، پایدار و کاملاً میرا باشند. بالاخره برای اطمینان از برآورده شدن همه توقعات، لازم است تحلیلی از کیفیت تنظیم به عمل آید.

ابزارهایی که در تحلیل کیفیت تنظیم به کار می‌روند بسیار متنوع‌اند و از روشهای تحلیلی (شرایط حدی نایکست یا بد)^۲ تا «شبه‌سازی»^۳ هایی در روی ماشینهای حسابگر دیجیتالی (رقمی) یا آنالوگی (قیاسی) (که انجام محاسبات بسیار طولانی و پیچیده را ممکن می‌سازند) تغییر می‌کنند.

چنانچه این مطالعات نشان دهند که کیفیت تنظیم مورد نظر به دست نیامده، لازم است یک مرحله به عقب برگشت و در طرح مدارهای تنظیم و فرمان تجدیدنظر کرد.

۱-۴-۵ تهیه شمای مدار

پس از بررسیهای نظری، تهیه شمای (طرح واره) مدارهای مختلف انجام می‌گیرد و در آن باید، تا می‌توان، مدولهای استاندارد را به کار برد.

در این مرحله لازم است به بهره‌برداری، نگهداری، و رفع عیب تأسیسات طرح شده توجه کرد. برای این منظور باید شمای (طرح واره) مدار هرچه روشنتر تهیه شده باشد و همچنین امکان انجام آزمایشهای جزء به جزء برای مشخص کردن محل عیوب احتمالی، موجود باشد.

چنانچه در این مرحله از طرح ملاحظه شود که مدارهای تنظیم و فرمان را به کمک مدولهای استاندارد نمی‌توان ساخت، یا ملاحظه شود که ساخت مدارهای تکمیل کننده خیلی پیچیده است، باید در طرح مدارهای تنظیم و فرمان تجدیدنظر کرد و برای طرح نوین پیشنهادی، به بررسی دوباره کیفیت تنظیم پرداخت.

۱-۴-۶ ساخت مدار تجربی

روش ساخت مدار تجربی به تعداد مدولهای استاندارد موجود و تعداد مدارهای تکمیلی که باید ساخته شود بستگی زیادی دارد. در مورد مدارهای تکمیلی بهتر است ابتدا مداری موقتی ساخته شود و پس از انجام آزمایشهای اولیه، ساخت نهایی، به صورت مدارهای چاپی، انجام گیرد. استفاده از شاسیها، کشوها، کارتهای فیش خور^۴ نرمالیزه جهت مدار تجربی

1) regulateur

2) nyquist ou Bode

3) simulation

4) cartes enfichables

۷-۴-۱ آزمایشها

پس از ساخت مدار تجربی، آزمایشهایی صورت می‌گیرد تا اولاً کار مطلوب عناصر مختلف تشکیل دهنده تجهیزات تنظیم و فرمان و سپس کار این تجهیزات همراه با سیستم تنظیم شونده، بررسی شود. انجام این آزمایشها، به طریق اصولی (مرحله به مرحله)، جهت برطرف کردن عیوب مدار و نیز درک و فهم آن بسیار اهمیت دارد.

در آزمایش مدارهای تنظیم، استفاده از شبیه‌سازی (در آزمایشگاه) سیستم تنظیم-شونده بسیار سودمند است. این شبیه‌سازی را می‌توان یا به کمک ماشین‌حسابگر آنالوگ (قیاسی) یا مختلط و یا به کمک تقویت‌کننده‌های عملیاتی^۱، ضرب‌کننده‌ها و مدولهای منطقی، انجام داد. بدین ترتیب در آزمایشگاه و بدون نیاز به در اختیار داشتن سیستم تنظیم‌شونده واقعی، می‌توان کار مدارهای تنظیم را در شرایطی مشابه شرایط کار نهایی بررسی کرد. بدین‌سان زمان لازم برای اجرای تأسیسات نوین به‌میزان زیادی کاهش می‌یابد. البته انجام آزمایش روی سیستم واقعی، بویژه برای بررسی اثر پارازیت‌های احتمالی، الزامی است. مع‌هذا، به‌واسطه آزمایشهای مقدماتی به کمک شبیه‌سازی، این اطمینان پدید می‌آید که تأسیسات طرح شده اصولاً به‌طور مطلوب کار خواهد کرد.

اغلب در این مرحله لازم است، برای تجدیدنظر در چگونگی مدارها یا برای بهتر و دقیقتر نمودن تحلیل کیفیت تنظیم، مراحل به عقب بازگشت. بویژه اگر آزمایش روی سیستم واقعی نتایج غیرمطلوب بدهد، باید تحلیل سیستم تنظیم‌شونده دوباره انجام گیرد و پارامترهایی که در تقریب اولیه صرف‌نظر شده‌اند (و اثر آنها در روی نتایج می‌تواند مهم باشد) در نظر گرفته شوند. بدیهی است که در چنین حالتی باید در تمام مراحل انجام شده طرح تجدیدنظر کرد.

۸-۴-۱ ساخت نمونه

پس از اینکه کار مدار تجربی رضایت‌بخش تشخیص داده شد، می‌توان به ساخت نمونه اقدام کرد. در این مرحله از مدولهای استاندارد، شاسیها، کسوها، و کارتهای نرم‌لایزه استفاده خواهد شد. اگر تنها یک واحد تأسیسات مورد نیاز باشد، این نمونه همان تأسیساتی خواهد بود که تحویل مشتری می‌شود.

در صورتی که تولید تأسیسات به‌طور سری مورد نظر باشد، باید در این مرحله به تغییراتی احتمالی، که بتواند منجر به کاهش قیمت تمام شده و یا تسهیل در امر نگهداری تأسیسات درضمن کار شود، اندیشید.

۹-۴-۱ آزمایشهای نهایی

آزمایشهای نهایی تنها باید موجب تغییرات بسیار جزئی در نمونه ساخته شده بشود. معمولاً این آزمایشها در روی سیستم واقعی انجام می گیرند. ولی گاهی بویژه در مواقعی که میزان کردن اجزای تنظیم کننده مورد نظر است، استفاده از شبیه سازی می تواند مفید باشد. وجود ناپایداری ممکن است، در ضمن آزمایش بر روی سیستم واقعی، موجب خرابیهای جبران-ناپذیری شود.

۱۰-۴-۱ نصب و راه اندازی

نصب و راه اندازی تأسیسات درمحل، آخرین مرحله طرح است. بسته به ابعاد تأسیسات، زمان لازم برای نصب و تلاش مورد انتظار از پرسنل می تواند قابل ملاحظه باشد. حتی گاهی لازم می آید ضمن اولین نصب و راه اندازی، تغییراتی در نمونه ساخته شده ایجاد شود.

۱۱-۴-۱ ساخت به صورت سری

در مواقعی که ساخت دستگاهی به صورت سری مورد نظر است، معمولاً ترجیح داده می شود تا در وهله اول يك سری ابتدایی تولید شود. بدین ترتیب اشکالات اساسی ساخت مشخص و از بین برده می شوند (روشها و امکاناتی که در ساخت نمونه به کار می رود معمولاً با روشها و امکانات ساخت به صورت سری یکسان نیست). سری ابتدایی باید بدقت، و حتی با آزمایشهای زماندار، مورد آزمایش قرار گیرد. در ساخت به صورت سری اغلب لازم است وسایل خاصی تدارك دید تا انجام تولید و آزمایشهای روالی به طور مطمئن امکان پذیر شود.

۵-۱ ارتباط الکترونیک صنعتی با سایر رشته ها

مطالب بیان شده در بندهای ۱-۳ و ۱-۴ نشان می دهند که دامنه کاربردی الکترونیک صنعتی بسیار گسترده است. از طرف دیگر در تدارك و اجرای تأسیسات تنظیم و فرمان پذیر، از رشته های تخصصی زیر نیز استفاده می شود:

- الکترونیک عمومی: برای فهم کار مدولهای استاندارد و ساخت وسایل جدید.
- تکنیک اندازه گیری: برای انتخاب و گسترش وسایل اندازه گیری در مدارهای تنظیم و فرمان، همچنین جهت انجام اندازه گیریهای لازم در آزمایشها.

- تأسیسات الکتریکی: برای اجرا و حفاظت صحیح تأسیسات و سیم کشیها.
- ماشینهای الکتریکی: برای فهم کار استاتیکی (ایستا) و دینامیکی (پویای) آنها در مدارهای تنظیم.
- ماشینهای مکانیکی برای فهم کار استاتیکی (ایستا) و دینامیکی (پویای) آنها (مانند ماشینهای حمل و نقل تنظیم یا فرمان پذیر).
- نظریه سیستمها: برای تحلیل نظری و تشریح ریاضی سیستم تنظیم شونده.
- نظریه تنظیم خودکار: برای طرح مدارهای تنظیم، تحلیل پایداری و کیفیت تنظیم.
- نظریه سیستمهای منطقی: برای تحلیل و ترکیب نظری سیستمهای فرمان.
- ماشینهای حسابگر دیجیتال (رقمی): برای برنامه نویسی محاسبات عددی، و همچنین برای فهم چگونگی کار برنامه نویسی در ماشینهای حسابگر فرایندها (پردازها).

۹-۱ تخصص یابی مهندسانی که در زمینه الکترونیک صنعتی کار می کنند

۹-۶-۱ کلیات

کاربردهای بسیار گسترده الکترونیک صنعتی در شاخه های مختلف صنعت و همچنین فعالیتهای بسیار متنوع هنگام تدارکات فنی و اجرای هر تأسیسات، وجود تخصصهایسی را حتی در محدوده الکترونیک صنعتی مطرح می سازد. این تخصصها ممکن است بر حسب زمینه کاربردی یا بر حسب نوع فعالیت دسته بندی شوند. در زیر به یک رشته از این تخصصها بر حسب نوع فعالیت اشاره خواهد شد. در مؤسسات تولیدی بزرگ معمولاً بخشهای مختلفی موجودند که هر یک تنها فعالیت ویژه ای را به عهده دارند. برعکس در مؤسسات کوچکتر مهندس اغلب باید در چند زمینه یا در همه زمینه های تخصصی فعالیت کند. بنابراین لازم است دارای اطلاعات وسیع و توانایی زیادی باشد.

فهرست زیر، زمینه های مختلف تخصصی را بر حسب نوع فعالیت و ترتیب مراحل اجرای هر تأسیسات نوین (که دخالت کلیه شاخه های تخصصی را ایجاب می کند) ارائه می دهد.

۹-۶-۲ فروش

وظیفه مهندس فروش گسترش عرضه و اجرای سفارشات است. بدین ترتیب که باید مسایل فنی و مالی را با مشتریها مطرح سازد و بین فعالیتهای مختلف، درحین اجرای تأسیسات نوین، هماهنگیهای لازم را به وجود آورد. همچنین باید احتیاجات جدید بازار را احساس

و انجام مطالعات جدیدی را برای بخشهای مربوط پیشنهاد کند.

۱-۶-۳ توسعه

دامنه توسعه خیلی گسترده است و به اطلاعات وسیعی نیاز دارد که لزوم به وجود آمدن شاخه‌های تخصصی متفاوتی را در این زمینه موجب می‌شود. از جمله شاخه‌های تخصصی موجود در این زمینه می‌توان به چند نمونه زیر اشاره کرد:

– توسعه تکنیک سیستمها، یعنی توسعه مدارهای تنظیم و فرمان جدید برای کاربردهای ویژه.

– توسعه مبدل‌های جریان و فرکانس با تکمیل نمودن مدارهای موجود و ابداع مدارهای جدید.

– توسعه مدولها و آلات استاندارد و وسایل ویژه.

۱-۶-۴ طرح

وظیفه متخصص طراح، طرح کردن تأسیسات کامل و تدارك و تشریح همه جزئیات فنی آن است. در مورد تأسیسات جدید، این متخصص، در رابطه با متخصصان توسعه فعالیت دارد، در صورتی که برای تأسیسات متداول، باید تطبیق آنها را به حالت خاص بررسی کند. بر حسب زمینه‌های کاربردی نامبرده در بند ۱-۳ (به شکل ۱-۲ مراجعه شود)، معمولاً تخصصهای گوناگونی در زمینه طرح وجود دارد.

۱-۶-۵ ساخت

در زمینه ساخت می‌توان به طور کلی دو شاخه متفاوت از هم تمیز داد:

– ساخت مدولها و آلات استاندارد، همچنین تدارك و انطباق آنها به تولید به صورت سری.

– ساخت تأسیسات کامل (به کمک قفسه‌ها، شاسیها و کسوه‌های نرمالیزه) و تهیه شما (طرح‌واژه)های کلیه اتصالات.

۱-۶-۶ تولید

مهندس متخصص در زمینه تولید باید روشهای تولید به صورت سری مانند سیستمهای سیم‌کشی، مدارهای چاپی، عناصر نیمه هادی، مدارهای مجتمع و غیره را توسعه دهد.

۱-۶-۷ آزمایش

متخصص آزمایشها در آزمایشگاه یا در مراکز دیگر کار می‌کند و باید معایب را بیابد و

از بین ببرد و کارکرد درست تأسیسات را بیازماید.

۸-۶-۱ نصب و راه‌اندازی

مهندسی که در زمینه نصب و راه‌اندازی کار می‌کند باید در نصب تأسیسات در محل نظارت کند، تأسیسات را راه بیندازد و تحویل مشتری بدهد.



فصل دوم

مقدمه‌ای بر الکترونیک قدرت

۱-۲ عناصر قدرت

۱-۱-۲ کلیات

«عناصر قدرت» که ساخت «تجهیزات قدرت»، یعنی «مبدل‌های استاتیکی (ایستا)» (یکسو-کننده‌ها، مبدل‌های جریان و فرکانس) را ممکن می‌سازند، به‌طور طرح‌وار همراه با مشخصه‌های حقیقی و ایدئال‌شان در شکل ۱-۲ نشان داده شده‌اند. این عناصر بر دو نوع اند: – «عناصر یکسوکننده فرمان‌ناپذیر» (دیودها).

– «عناصر یکسوکننده فرمان‌پذیر» (تیریسورها، تریاک‌ها).

در بررسی چگونگی کار مدارهای مبدل‌های استاتیکی (ایستا) استفاده از مشخصه ایدئال عناصر یکسوکننده قابل قبول است. در عوض در محاسبات گرم شدن ناشی از تلفات در عناصر یکسوکننده، باید مشخصه‌های واقعی را به کار برد.

برای هر عنصر، از طرف سازندگان ورقه‌های کارشناختی^۱ شامل کلیه داده‌ها و مشخصه‌ها عرضه می‌شود. مقادیر مشخصه مختلف و همچنین چگونگی انتخاب عناصر یکسوکننده در بند ۳-۲ بیان خواهند شد. برای مطالعه رفتار فیزیکی، توصیه می‌شود به فصل ششم از جلد VII این مجموعه مراجعه شود.

۲-۱-۲ دیودها

دیود عنصر یکسوکننده‌ای فرمان ناپذیر است (به شماره ۱ در شکل ۱-۲ مراجعه شود). این عنصر می‌تواند جریان الکتریکی را فقط در جهت آند به کاتد (A-C) هدایت کند، و در آن، جهت عکس یعنی جهت کاتد به آند (C-A)، برای عبور جریان قطع است. بنا بر مشخصه ایدئال این عنصر می‌توان فرض کرد که: در حالت هدایت، افت فشار الکتریکی بین آند و کاتد صفر است ($U_{AC} = 0$) و در حالت قطع (جهت کاتد به آند) هم جریان جاری در آن صفر است ($I = 0$).

۳-۱-۲ تیریسورها

تیریسور متداولترین عنصر یکسوکننده فرمان‌پذیر است (به شماره ۲ در شکل ۱-۲ مراجعه شود). این عنصر، جریان الکتریکی را در جهت آند به کاتد (A-C) تنها هنگامی هدایت می‌کند که «پالس (تپ) روشن‌کننده»^۱ ای بر چکاننده (G) آن اعمال شود*. جهت کاتد به آند (C-A) برای این عنصر نیز مسدود است و عبور جریان در این جهت امکان‌پذیر نیست.

روشن شدن تیریسور با اعمال پالس (تپ) مثبتی بین چکاننده و کاتد (G-C) در صورتی امکان‌پذیر است که فشار الکتریکی آند به کاتد مثبت باشد ($U_{AC} > 0$) [پس از روشن شدن تیریسور، وجود پالس (تپ) بین «چکاننده» و «کاتد» برای ادامه هدایت، الزامی نخواهد بود]. برای اینکه تیریسور هادی (روشن) بتواند خاموش (قطع) شود لازم است: اولاً جریان آن به صفر برسد، و ثانیاً بلافاصله پس از صفر شدن جریان، برای مدت زمان مشخصی (بسته به نوع تیریسور، بین ۱۰ تا ۲۰۰ میکروثانیه)، فشار الکتریکی بین آند و کاتد منفی بماند ($U_{AC} < 0$).

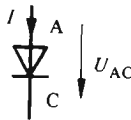
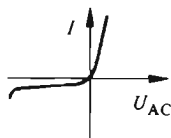
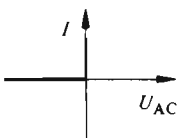

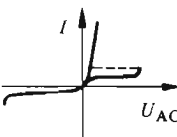
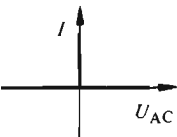
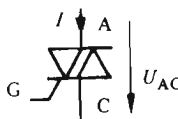
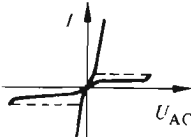

در مشخصه ایدئال تیریسور (شکل ۱-۲)، فرض بر این است که در حالت هدایت، افت فشار الکتریکی بین آند و کاتد صفر است ($U_{AC} = 0$). در حالت قطع هم جریان آن صفر است ($I = 0$).

۴-۱-۲ تیریسورهای قابل قطع از طریق چکاننده

تیریسورهای ساخته شده اند که هدایتشان را می‌توان با اعمال پالسی (تپی) منفی بین چکاننده و کاتد، قطع کرد. تیریسورهای قابل قطع از طریق چکاننده، امروزه فقط برای جریانه‌ها و فشارهای الکتریکی پایین ساخته می‌شوند. از این رو زمینه کاربردی آنها در الکترونیک

1) impulsion d'allumage

* منظور از پالس (تپ) روشن‌کننده سیگنالی (نشانه‌ای) است که معمولاً حالت پالس (تپش) دارد ولی می‌تواند به صورت فشار الکتریکی دایم یا متناوب نیز باشد (مترجم).

نوع اتصال	نشانه عنصر	اسم عنصر	مشخصه عنصر		
			واقعی	ایدهآل (آرمانی)	
فرمان ناپذیر	۱	دیود			
	۲	تیرستور			
	۳	تریاک			

شکل ۱-۲ عناصر قدرت.

قدرت قابل ملاحظه نیست و در شکل ۱-۲ آورده نشده‌اند.

۱-۲-۵ تریاکها

چنانکه در شماره ۳ از شکل ۱-۲ نشان داده شده، تریاک اصولاً متناظر با دو تیرستور موازی-معکوس^۱ است. مزیت اساسی آن نسبت به دو تیرستور موازی - معکوس، در وجود چکاننده واحدی برای فرمان است. برخلاف تیرستور منفرد، تریاک می‌تواند در هر دو جهت (آند به کاتد و کاتد به آند) هادی جریان باشد. برای اینکه تریاک از حالت قطع به حالت وصل (هدایت) درآید، کافی است بین چکاننده و کاتد آن پالسی (تپی) (مثبت یا منفی) اعمال شود.

1) antiparallèle



در مشخصه ایدئال این عنصر نیز، در حالت هدایت، از افت فشار الکتريکی-یین آند و کاتد صرف نظر می شود ($U_{AC} = 0$)، و در حالت قطع، جریان آن بنا به فرض صفر است ($I = 0$).
ترياک قدرت قابل کنترل نسبتاً محدودی دارد و به اندازه تيریستور توسعه نیافته است.

۲-۲ تقسیم بندی بر حسب نوع کموتاسیون

۲-۲-۱ کلیات

تجهیزات قدرت از تيریستورها و دیودهایی که جهت ایجاد مبدل های استاتیکی (ایستا)، به طریق خاصی به هم اتصال می یابند، تشکیل می شوند. بار در اغلب موارد، اهمی-القایی است (روتور یا گردانه و استاتور یا ایستانه ماشین الکتريکی، سیم پیچ آهنربا، ترانسفورماتور و غیره). چنانکه قبلاً در بند ۲-۱-۳ بیان شد، تيریستورها در اثر اعمال پالسی (تپی) مثبت بین چکانده و کاتد می توانند روشن شوند، ولی خاموش شدن یا قطع جریان تيریستور تنها به کمک عاملی خارجی، که باعث عبور جریان از صفر می شود، صورت می گیرد. دیودها نیز رفتار مشابهی دارند، با این تفاوت که روشن شدن آنها، به محض مثبت شدن فشار الکتريکی آند به کاتد، و بدون احتیاج به پالس (تپ) روشن کننده رخ می دهد.
در مبدل استاتیکی (ایستا)، معمولاً خاموش شدن یا قطع هدایت عنصر یکسو کننده، در اثر کموتاسیون^۱ یا تبادل جریان از عنصر یکسو کننده مورد نظر به عنصری دیگر صورت می پذیرد. تجهیزات قدرت را می توان، بر حسب چگونگی قطع پیش بینی شده برای عناصر یا «نوع کموتاسیون» به ترتیب زیر تقسیم بندی کرد:

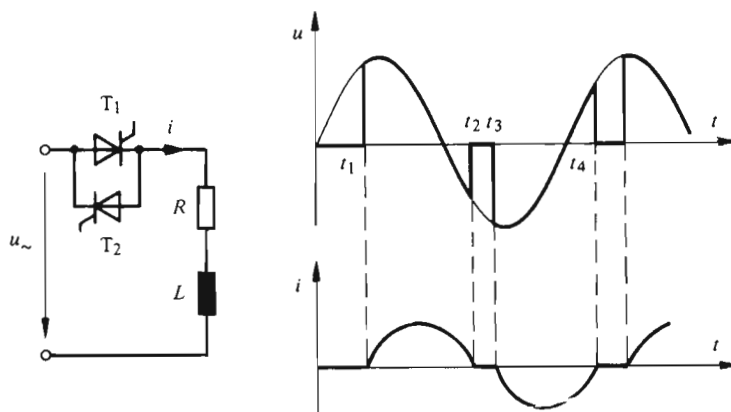
- بدون کموتاسیون
 - با کموتاسیون طبیعی
 - با کموتاسیون اجباری
- در زیر از اصول روشهای گوناگون کموتاسیون گفتگو خواهد شد.

۲-۲-۲ کارکرد بدون کموتاسیون

مشخصه اساسی «مبدل های استاتیکی (ایستای) بدون کموتاسیون» این است که: جریان گذرنده از بار، همزمان با جریان جاری در عنصر یکسو کننده (بویژه در تيریستور) صفر می شود.

ساده ترین مداری که می تواند برای بررسی کارکرد بدون کموتاسیون مبدل های استاتیکی (ایستا) در نظر گرفته شود، در شکل ۲-۲ نشان داده شده است.
این مدار از دو تيریستور T_1 و T_2 ، که به صورت موازی-معکوس متصل اند، و یک بار اهمی-القایی R و L (شامل اندوکتانس-القایی و مقاومت) تشکیل شده است. در نمایش

1) commutation



شکل ۲-۲ اصول کارکرد بدون کموتاسیون.

بار اهمی-القایی، مقاومت R با مستطیلی توخالی و اندوکتانس (الفاگر) با مستطیلی توپر نشان داده می‌شود.

در لحظه t_1 (به علت اینکه فشار الکتریکی بین آند و کاتد تیریس‌تور T_1 مثبت است) یک پالس (تپ) روشن‌کننده بین چکاننده و کاتد تیریس‌تور T_1 ، باعث روشن شدن آن می‌شود، این تیریس‌تور شروع به هدایت می‌کند و جریانی مانند i از این طریق در بار اهمی-القایی جاری می‌شود. از آنجایی که فشار الکتریکی اعمال شده به مدار متناوب است، جریان i افزایش می‌یابد و پس از رسیدن به مقدار ماکزیمم کاهش پیدا می‌کند و در لحظه t_2 به صفر می‌رسد. با صفر شدن جریان i ، تیریس‌تور T_1 قطع می‌شود و چون فشار الکتریکی آند به کاتد آن منفی است، به صورت قطع باقی می‌ماند.

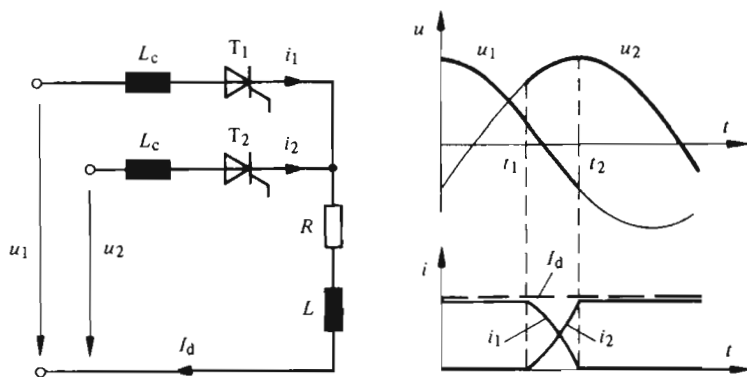
در لحظه t_3 (نیم‌دوره منفی u)، فرمانی بر چکاننده تیریس‌تور T_2 باعث روشن شدن این تیریس‌تور خواهد شد. در نتیجه جریان i در جهتی مخالف جهت قبلی و از طریق تیریس‌تور T_2 در بار جاری می‌شود. این جریان نیز از نظر مقدار افزایش می‌یابد و پس از گذشتن از یک ماکزیمم (بیشینه) در لحظه t_4 صفر می‌شود. با صفر شدن جریان، تیریس‌تور T_2 خاموش می‌شود و مدار برای تکرار کار خود و دریافت فرمانهای بعدی آماده است. چنانکه از توضیحات فوق برمی‌آید، تبادل جریان بین عناصر قدرت (T_1 و T_2) مستقیماً انجام نمی‌پذیرد، بلکه برای یک مدت زمان مشخصی جریان i صفر است. از این رو این کارکرد را بدون کموتاسیون می‌نامند. در فصل چهارم کتاب، وسایلی از این قبیل، بررسی خواهند شد.

۳-۲-۳ کموتاسیون طبیعی

در مبداهای ایستای (استاتیکی) با «کموتاسیون طبیعی»، انتقال جریان از یک عنصر به عنصر دیگر به کمک فشارهای متناوب اعمال شده به مدار صورت می‌پذیرد. این فشارهای الکتریکی در کارکرد عادی مدار نیز به کار می‌روند.

اساس کموتاسیون طبیعی را می‌توان با استفاده از شکل ۳-۲ تشریح کرد. مدار مورد نظر در این شکل از دو تیرستور T_1 و T_2 ، که هر کدام با یک اندوکتانس (القاگر) L_c متوالی است، تشکیل شده. کاتدهای این تیرستورها به هم و به بار اهمی-القایی (R و L) متصل‌اند. دو فشار الکتریکی متناوب u_1 و u_2 که نسبت به هم اختلاف فاز دارند، مدار را تغذیه می‌کنند.

فرض کنیم که تیرستور T_1 روشن است، جریان i_1 که از آن می‌گذرد، با جریان بار (I_d) برابر است. چون معمولاً بار دارای اندوکتانس (القاکری) خیلی زیادی است، به شرط اینکه کموتاسیون به طور تناوبی صورت پذیرد، جریان I_d را می‌توان عملاً ثابت فرض کرد.



شکل ۳-۲ اساس کموتاسیون طبیعی.

در لحظه t_1 مقدار لحظهای u_1 بزرگتر از u_2 است، یک پالس (تپ) مثبت بین چکانده و کاتد تیرستور T_1 ، آن را روشن می‌سازد. هدایت همزمان T_1 و T_2 ارتباطی میان u_1 و u_2 (از طریق L_c ، T_1 ، T_2 ، L_c) برقرار می‌کند که امکان افزایش جریان i_1 را به وجود می‌آورد. سرعت افزایش i_1 به اختلاف بین u_1 و u_2 و همچنین به مقدار L_c بستگی دارد.

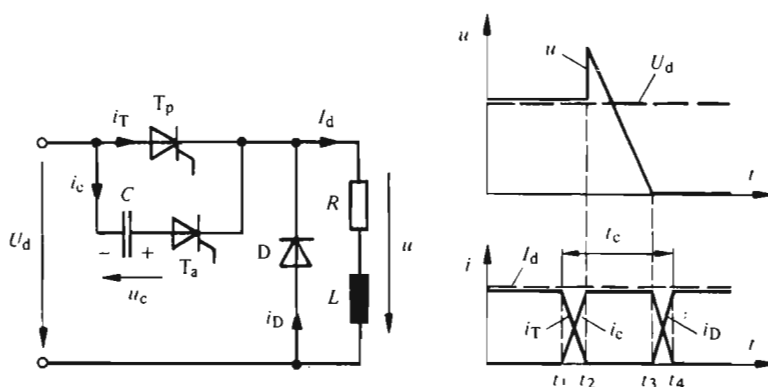
چون I_d ثابت و برابر $i_1 + i_2$ است، افزایش i_1 به کاهش i_2 می‌انجامد و در لحظه t_2 جریان i_2 به صفر می‌رسد. در نتیجه تیرستور T_2 خاموش می‌شود و مسدود می‌ماند ($U_{AC} < 0$). بدین ترتیب جریان بار (I_d) به طور طبیعی از تیرستور T_1 به تیرستور

T_p منتقل شده است. بدیهی است، برای اینکه این نوع کموتاسیون بتواند انجام پذیرد، اجباراً باید فشارهای الکتریکی اعمال شده به مدار، متغیر (مخصوصاً متناوب و با اختلاف فاز) باشند.

فصلهای ۵ تا ۱۱ به تشریح مبدل‌های استاتیکی (ایستای) با کموتاسیون طبیعی اختصاص دارند.

۴-۲-۲ کموتاسیون اجباری

در مبدل‌های استاتیکی (ایستای) با «کموتاسیون اجباری» عمل تبادل جریان بین دو عنصر یکسوکننده در اثر تخلیه خازنی، که قسمتی از کل مبدل استاتیکی است، انجام می‌گیرد. برای بررسی اساس کموتاسیون اجباری، از شکل ۴-۲ استفاده می‌شود. مدار نمایش داده شده، شامل یک تیرستور اصلی T_p ، یک تیرستور کمکی T_a ، یک خازن C و یک دیود D (موازی با بار L و R) است. فشار الکتریکی دایم U_d هم‌مدار را تغذیه می‌کند.



شکل ۴-۲ اساس کموتاسیون اجباری.

فرض کنیم تیرستور اصلی T_p روشن و تیرستور کمکی T_a قطع باشد. جریان i_T که از تیرستور اصلی می‌گذرد، برابر جریان I_d بار است. فشار الکتریکی u دو سر بار هم برابر فشار الکتریکی تغذیه U_d مدار است. در نتیجه، دیود D قطع و جریان i_D صفر است. فرض می‌کنیم که خازن C با فشار u_c (با علامت نشان داده شده در شکل) بار شده باشد.

در لحظه t_1 یک پالس (تپ) روشن‌کننده مثبت بین چکانده و کاتد تیرستور کمکی T_a ، آن را روشن می‌سازد [فشار الکتریکی بین آنده کاتد T_a مثبت و برابر u_c است]. با



روشن شدن T_a خازن C از طریق T_p و T_a تخلیه می‌شود. چون مجموع جریانهای i_c و i_T برابر I_h و I_h به علت اندوکتانس (القائری) زیاد بار (L) عملاً ثابت است، i_c سرعت افزایش و i_T کاهش می‌یابد. سرعت تغییرات این دو جریان به مقدار فشار الکتریکی u_c و اندوکتانس (القائری) ناشی از اتصالات مدار متشکل از C ، T_p و T_a بستگی دارد. چون اندوکتانس (القائری) ناشی از این مدار (که در شکل نشان داده نشده) بسیار کوچک است جریان i_T در تیرستور اصلی، به سرعت کاهش می‌یابد و در لحظه t_p صفر می‌شود. در موقع صفر شدن i_T ، چون فشار الکتریکی میان آنند و کاتد T_p منفی است (u_c)، این تیرستور خاموش می‌شود و پس از آن قطع می‌ماند.

در لحظه خاموش شدن تیرستور اصلی T_p فشار الکتریکی دو سر بار (u) از مقدار U_h به مقدار $U_h + u_c$ جهش پیدا می‌کند. از این لحظه به بعد، جریان I_h از طریق خازن C و تیرستور کمکی T_a عبور می‌کند. عبور جریان $I_h = i_c$ (که به جهت وجود اندوکتانس - القائری - بزرگ L در بار، عملاً دارای مقداری ثابت است) باعث تغییر بار الکتریکی خازن می‌شود. فشار الکتریکی دو سر خازن (u_c) کاهش می‌یابد و پس از صفر شدن جهش عوض می‌شود. فشار الکتریکی دو سر بار (u) نیز شبیه u_c تغییر می‌کند و با توجه به اینکه $u = U_h + u_c$ است، در لحظه t_p که $u_c = -U_h$ است، $u = 0$ می‌شود. ادامه کاهش برای u امکان ندارد، زیرا در این لحظه دیود D هادی می‌شود و فشار الکتریکی دو سر بار را صفر می‌کند (با در نظر گرفتن مشخصه ایدئال برای دیود).

از این لحظه جریان i_D به سرعت افزایش می‌یابد و سرعت افزایش آن را القائریهای ناشی از اتصالات مدار متشکل از C ، T_a و D (این القائریها در شکل نشان داده نشده‌اند) محدود می‌کنند. چون $i_c + i_D = I_h$ است، افزایش جریان i_D باعث کاهش سریع جریان i_c می‌شود. در لحظه t_p جریان i_c به صفر می‌رسد که در نتیجه تیرستور T_a قطع می‌شود. در این لحظه کموتاسیون اجباری پایان یافته است، هیچ جریانی از U_h به طرف بار عبور نمی‌کند، و مسیر جریان بار I_h از طریق دیود D بسته می‌شود. جریان i_T تیرستور اصلی ابتدا به تیرستور کمکی T_a و سپس به دیود D منتقل شده و زمان کموتاسیون t_c تقریباً حدود ۵۰ تا ۲۰۰ میکروثانیه است.

در مدار شکل ۲-۴ خاموش شدن تیرستور اصلی T_p فقط برای یک بار امکان پذیر است. برای تکرار این پدیده، باید مدار ساده فوق با وسایلی اضافی تکمیل شود تا امکان بار شدن مجدد خازن (با علامت مناسب) برای خاموش کردن مجدد تیرستور T_p وجود داشته باشد. مدارهای تکمیل‌تر مبدل‌های استاتیکی (ایستاتیک) کموتاسیون اجباری، همچنین چگونگی کار آنها در فصل‌های ۱۲ تا ۱۶ کتاب مشروحتر بررسی خواهند شد. مشخصه اصلی این مدارها این است که، تخلیه بار الکتریکی خازن، تیرستور را مجبور به خاموش شدن می‌کند.

۳-۲ تقسیم‌بندی بر حسب چگونگی عمل تبدیل

۱-۳-۲ کلیات

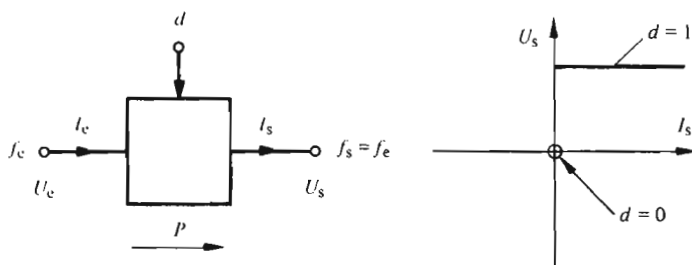
می‌توان تقسیم‌بندی دیگری برای تجهیزات قدرت در نظر گرفت که مستقل از نوع کموتاسیون است و فقط بستگی به چگونگی عمل تبدیل دارد. در اینجا، ابتدا فهرست این تقسیم‌بندی و سپس توضیح کوتاهی درباره اصول کار تک تک آنها آورده می‌شود:

- کنتاکتور جریان^۱
- تغییر دهنده (برشگر) جریان^۲
- یکسو کننده^۳
- اندولر^۴
- مبدل جریان^۵
- مبدل جریان دوطرفه^۶
- مبدل مستقیم فرکانس^۷
- مبدل فرکانس با مدار میانجی^۸

۲-۳-۲ کنتاکتور جریان

«کنتاکتور جریان»: وسیله ایستایی است که قطع و وصل بار متصل به خروجی خود را به کمک يك سيگنال (نشانه) فرمان (d)، با طبیعت منطقی ممکن می‌سازد (به طرح‌واره شکل ۲-۵ کنتاکتور جریان مراجعه شود). مشخصه اساسی کنتاکتور جریان این است که در آن فرکانس خروجی f_s با فرکانس ورودی f برابر است. در مورد کنتاکتور جریان دایم، $f_s = f = 0$ خواهد بود. هنگامی که کنتاکتور جریان وصل است ($d = 1$)، فشار الکتریکی خروجی U_s با فشار الکتریکی ورودی U برابر است و جریان خروجی I_s به مقدار بار بستگی دارد. برعکس، در حالت قطع کنتاکتور ($d = 0$)، جریان خروجی I_s صفر است. فشار الکتریکی خروجی (U_s) نیز عموماً صفر است. جهت عبور (انتقال) قدرت اکتیو، از ورودی به طرف خروجی است. نقطه کار کنتاکتور جریان در ربع اول صفحه مختصات I_s, U_s و در دو وضعیت کاملاً مشخص است.

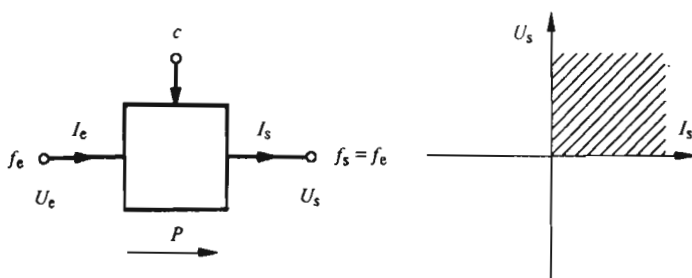
-
- | | |
|--|-----------------------------|
| 1) contacteur de courant | 2) variateur de courant |
| 3) redresseur | 4) onduleur |
| | 5) convertisseur de courant |
| 6) convertisseur de courant bidirectionnel | |
| 7) convertisseur de fréquence direct | |
| 8) convertisseur de fréquence a' circuit intermédiaire | |



شکل ۲-۵ طرح وارۀ کنتاكتور جريان.

۳-۳-۲ تغییر دهنده (برشگر) جريان

کار تغییر دهنده جريان (شکل ۲-۶) شبیه کنتاكتور جريان است، با این تفاوت که در این حالت سیگنال (نشانه) فرمان (c) طبیعت آنالوگی (قیاسی) دارد. با تغییر پیوسته c ، فشار الکتریکی خروجی U_s را می‌توان از صفر تا فشار الکتریکی ورودی U_e تغییر داد. تغییر-دهنده (برشگر) جريان اساساً کنتاكتور جريانی است که عمل قطع و وصل را به طور تکراری انجام می‌دهد به نحوی که فشار الکتریکی ورودی بریده بریده می‌شود و بدین-ترتیب مقدار متوسط و مقدار مؤثر فشار الکتریکی خروجی U_s تغییر می‌کند.

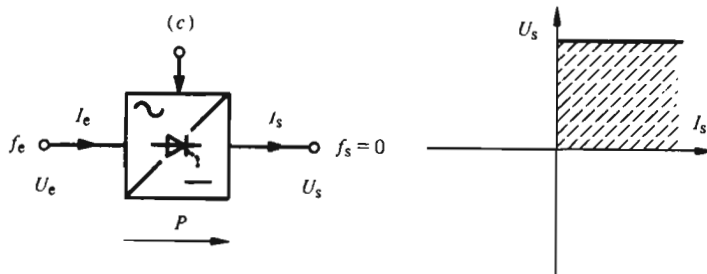


شکل ۲-۶ طرح وارۀ تغییر دهنده جريان.

۴-۳-۲ یکسو کننده

«یکسو کننده» وسیله‌ای است که فشار الکتریکی متناوب ورودی U_e را به فشار الکتریکی دایم خروجی U_s تبدیل می‌کند (شکل ۲-۷). معمولاً فشار الکتریکی خروجی ثابت است ولی گاهی به کمک يك سیگنال آنالوگی (نشانه قیاسی) فرمان (c) می‌توان مقدار آن را به

طور پیوسته تغییر داد. بدین ترتیب، یکسوکننده فرمان‌پذیر به دست می‌آید. فشار الکتریکی و جریان خروجی فقط می‌توانند مثبت باشند. قدرت اکتیو از ورودی به طرف خروجی منتقل می‌شود.

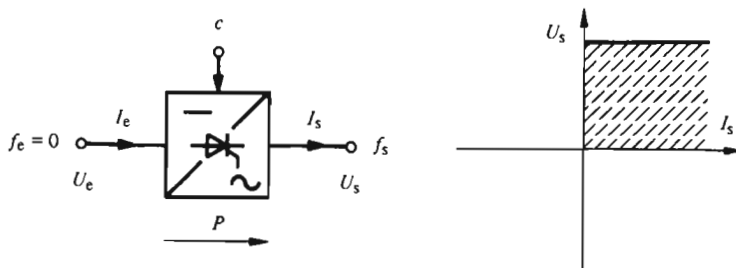


شکل ۲-۷ طرح وارده یکسوکننده.

از اصطلاح «یکسوکننده» قبلاً برای عناصر یکسوکننده (دیودها، تیرستورها) استفاده می‌شد ولی امروزه این اصطلاح را فقط در مورد دستگاه کامل به کار می‌برند.

۲-۳-۵ اندولر

«اندولر» وسیله‌ای است که فشار الکتریکی دایم ورودی U_e را به فشار الکتریکی متناوب خروجی U_s تبدیل می‌کند (شکل ۲-۸). سیگنال قیاسی فرمان c برای تعیین چگونگی کار اندولر به کار می‌رود. به عبارت دیگر، به وسیله این سیگنال (نشانه) می‌توان از فشار الکتریکی ورودی متغیر، فشار الکتریکی خروجی ثابت و یا بعکس به دست آورد. قدرت اکتیو P از ورودی به طرف خروجی یعنی از طرف دایم به طرف متناوب، می‌گذرد.



شکل ۲-۸ طرح وارده اندولر.

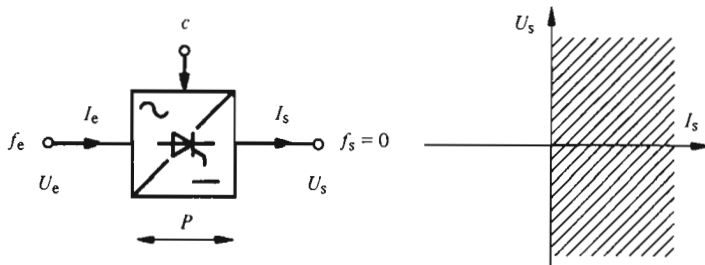
۲-۳-۶ مبدل جریان

«مبدل جریان» می‌تواند یا به صورت یکسوکننده فرمان‌پذیر ($U_s > 0$) و یا به صورت



PowerEn.ir

اندولر ($U_s < 0$) کار بکند (شکل ۲-۹). ورودی متناوب ولی خروجی دایم است. ورودی و خروجی دستگاه برای حالت کار معمولی (به صورت یکسوکننده فرمان پذیر) تعریف می شود. به علت وجود عناصر یکسوکننده، جریان خروجی I_s (جریان دایم) فقط در يك جهت مشخص می تواند جاری شود. برای اینکه مدار بتواند به صورت اندولر کار کند، باید فشار الکتریکی خروجی U_s منفی باشد و خروجی دستگاه به باری منفی متصل شود. منظور از بار منفی باری است که بتواند قدرت $U_s I_s$ را تولید و جریان خروجی مثبت I_s را جذب بکند. در این حالت حاصل ضرب $U_s I_s$ منفی است و قدرت اکتیو P در جهت خروجی به ورودی جاری می شود. بدین ترتیب، نقطه کار این مبدل در دو ربع طرف راست صفحه مختصات U_s ، I_s قرار می گیرد. سیگنال آنالوگی (نشانه قیاسی) فرمان (c) امکان می دهد تا فشار الکتریکی خروجی U_s بین دو حد مشخص مثبت و منفی و به طور پیوسته تغییر کند. بنا براین، عبور مستقیم از حالت کار به صورت یکسوکننده به حالت کار به صورت اندولر ممکن خواهد بود.



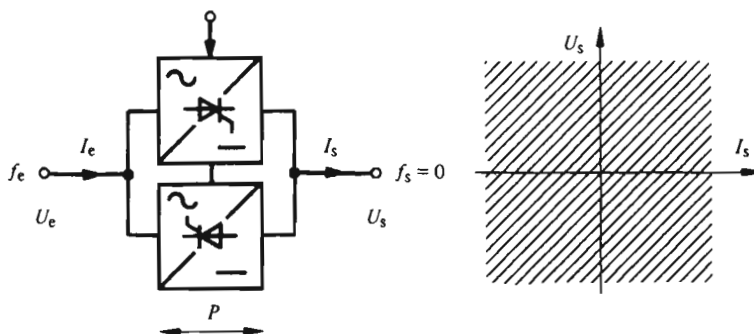
شکل ۲-۹ طرحواره مبدل جریان.

۲-۳-۷ مبدل جریان دوطرفه

«مبدل جریان دوطرفه» اساساً از دو مبدل جریان تشکیل می شود که عناصر یکسوکننده آنها در دو جهت متفاوت قرار گرفته اند (شکل ۲-۱۰). جریان I_s می تواند در هر دو جهت (از ورودی به خروجی و از خروجی به ورودی) عبور کند. مقدار و جهت این جریان، همچنین علامت فشار الکتریکی دایم U_s را می توان به کمک سیگنال آنالوگی (نشانه قیاسی) فرمان (c) تغییر داد. نقطه کار مبدل جریان دوطرفه در تمامی (چهار ربع) صفحه مختصات U_s ، I_s قرار می گیرد. بر حسب اینکه علامت حاصل ضرب $U_s I_s$ مثبت یا منفی باشد، قدرت اکتیو P نیز مثبت یا منفی خواهد بود.

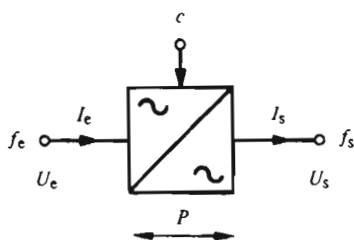
۲-۳-۸ مبدل مستقیم فرکانس

«مبدل مستقیم فرکانس» يك سیستم متناوب ورودی با فرکانس f_e را به يك سیستم متناوب



شکل ۲-۱۰ طرح‌واره مبدل جریان دوطرفه.

خروجی با فرکانس f_s ، به طور مستقیم یعنی بدون احتیاج به تبدیل میانجی، تبدیل می‌کند (شکل ۲-۱۱). در ساده‌ترین حالت، این مبدل از یک مبدل جریان دوطرفه تشکیل می‌شود. به کمک سیگنال آنالوژی (نشانک قیاسی) مناسبی (c) می‌توان در خروجی دستگاه یک فشار الکتریکی متناوب U_s با فرکانس f_s به دست آورد. قدرت اکتیو می‌تواند از ورودی به طرف خروجی یا بعکس جاری شود.



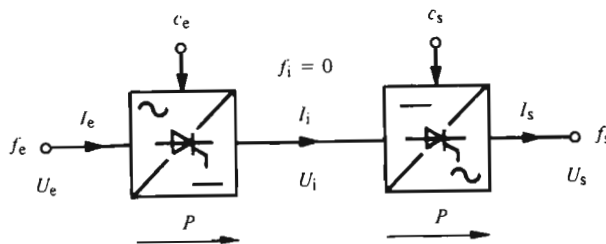
شکل ۲-۱۱ طرح‌واره مبدل مستقیم فرکانس.

۲-۳-۹ مبدل فرکانس با مدار میانجی

«مبدل فرکانس با مدار میانجی» تبدیل فرکانس ورودی f_e را به فرکانس خروجی f_s به صورت غیرمستقیم انجام می‌دهد. این مبدل از یک یکسوکننده در ورودی و یک اندولر

در خروجی تشکیل می‌شود (شکل ۲-۱۲).

فشار الکتریکی متناوب ورودی U_e با فرکانس f_e یکسو می‌شود تا فشار الکتریکی دایم مدار میانجی U_i با $f_i = 0$ به دست آید. فشار الکتریکی دایم U_i هم به وسیله یک اندولر به فشار الکتریکی متناوب خروجی U_s با فرکانس f_s (معمولاً $f_e \neq f_s$ است) تبدیل می‌شود. یکسوکننده و اندولر باید به طریقی مناسب به توسط سیگنالهای آنالوگی (نشانکهای قیاسی) C_e و C_s فرمان داده شوند. در ساده‌ترین حالت، فشار الکتریکی U_i مثبت است و جریان I_i (در مدار میانجی) فقط می‌تواند در جهت نشان داده شده در شکل جاری شود. در نتیجه قدرت اکتیو P فقط می‌تواند از طرف ورودی به طرف خروجی عبور کند. برای معکوس کردن قدرت P لازم است به جای یکسوکننده از مبدل جریان استفاده شود. بدین ترتیب فشار الکتریکی U_i می‌تواند تغییر علامت دهد. راه‌حل دیگر، استفاده از مبدل جریان دوطرفه است که جاری شدن جریان مدار میانجی (I_i) را در هر دو جهت ممکن می‌سازد. در این موارد از اصطلاحات: «مدار میانجی با جریان دایم» (جریان I_i تغییر علامت نمی‌دهد) یا «مدار میانجی با فشار الکتریکی دایم» (فشار الکتریکی U_i تغییر علامت نمی‌دهد) استفاده می‌شود.



شکل ۲-۱۲ طرح‌واره مبدل فرکانس با مدار میانجی.

۴-۲ تقسیم‌بندی بر حسب نوع کموتاسیون و چگونگی عمل تبدیل

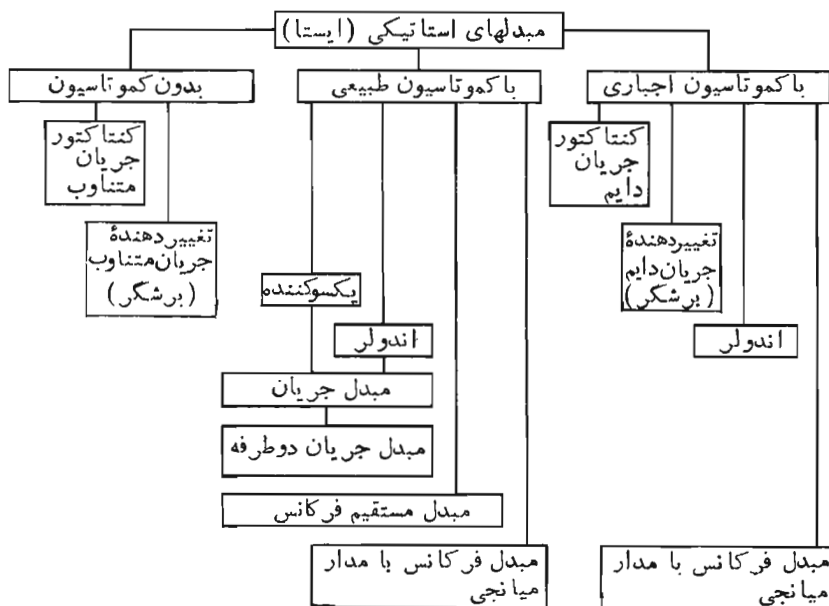
تقسیم‌بندیهای بیان شده در بندهای ۲-۲ و ۳-۲ مستقل از یکدیگر انجام گرفته‌اند. برای مدارهای اصلی مبدل‌های استاتیکی (ایستا) می‌توان یک تقسیم‌بندی کلی، بر حسب نوع کموتاسیون و چگونگی عمل تبدیل، انجام داد. این تقسیم‌بندی در شکل ۲-۱۳ نشان داده شده است.

مبدل استاتیکی (ایستای) بدون کموتاسیون می‌تواند به صورت کنتاکتور یا تغییر-دهنده جریان (برشگر) متناوب کار کند.

از لحاظ عمل تبدیل، مبدل‌های استاتیکی (ایستای) با کموتاسیون طبیعی متنوع‌ترین

مبدل‌های ایستا هستند. در این زمینه می‌توان از یکسوکننده‌ها، اندولرها، مبدل‌های جریان، مبدل‌های جریان دوطرفه و بالاخره مبدل‌های مستقیم فرکانس و مبدل‌های فرکانس با مدار میانجی نام برد.

مبدل‌های استاتیکی (ایستای) با کموتاسیون اجباری شامل کنتاکتورها و تغییردهنده‌های جریان دایم، اندولرها و مبدل‌های فرکانس با مدار میانجی‌اند.



شکل ۲-۱۳ تقسیم‌بندی مبدل‌های ایستا برحسب نوع کموتاسیون و چگونگی عمل تبدیل.





ملاحظات کلی در مورد عناصر قدرت

۱-۳ مقدمه

بدون توجه به چگونگی مدار و طرز کار مبدل‌های استاتیکی (ایستا)، می‌توان ملاحظات کلی دربارهٔ عناصر قدرت گوشزد کرد. این ملاحظات که در اینجا بررسی می‌شوند، هم برای تیریسورها و هم برای دیودها معتبرند و بنابراین در این فصل تنها اصطلاح عنصر یکسوکننده به کار خواهد رفت.

این ملاحظات از یک طرف به انتخاب و از طرف دیگر به حفاظت عنصر یکسوکننده مربوط می‌شوند. انتخاب عنصر یکسوکننده باید طوری صورت پذیرد که عنصر بتواند محدودیتهای ذاتی وابسته به کارکرد عادی را بی‌آنکه آسیب ببیند تحمل کند. در موقع انتخاب عنصر یکسوکننده باید رفتار حرارتی و مسئله خنک کردن آن مورد مطالعه قرار گیرد. در مواردی لازم است دو یا چند عنصر یکسوکننده با هم متوالی یا موازی بسته شوند. بندهای ۲-۳ تا ۴-۳ به بررسی این موضوع اختصاص دارند. عناصر یکسوکننده باید در مقابل اختلالات خطرناک (مانند اضافه جریان و اضافه فشار الکتریکی) حفاظت بشوند. این مسائل در بندهای ۵-۳ و ۶-۳ بررسی خواهند شد.

۲-۳ انتخاب عنصر یکسوکننده

۱-۲-۳ مقادیر مشخصه

برای عناصر یکسوکننده تعدادی «مقدار حد» از طرف سازندگان مشخص می‌شود و در



اختیار مصرف کنندگان قرار می گیرد که هیچگاه نباید از آنها تجاوز بشود. مقادیر مشخصه یا مقادیر حد بتفصیل در بند (VII-۶-۲) آورده و تفسیر شده اند، در اینجا تنها از مهمترین آنها نام برده می شود.

مقادیر حد برای فشار الکتریکی:

— «ماگزیم (بیشینه) فشار الکتریکی معکوس سرویس» U_{RWM}

— «ماگزیم (بیشینه) فشار الکتریکی معکوس غیر تکراری» U_{RSM}

— «ماگزیم (بیشینه) فشار الکتریکی مستقیم غیر تکراری» U_{DSM} .

مقادیر حد برای جریان:

— «جریان متوسط اسمی» $I_{T(AV)}$ (که برای پاره ای از شرایط خنک کردن و شکل جریان اعتبار دارد).

مقادیر حد حرارتی:

— «دمای حد پیوند گاه» θ_{JM} .

مقادیر حد دیگر:

— «سرعت بحرانی افزایش فشار الکتریکی» $(du/dt)_{crit}$

— «سرعت بحرانی افزایش جریان» $(di_T/dt)_{crit}$

— «زمان لازم برای خاموش شدن» t_q

— «مقادیر حد برای مدار چکانده».

۳-۲-۲ انتخاب عنصر یکسوکننده

اولین مرحله در انتخاب عنصر یکسوکننده، برای اینکه بتواند در مبدل استاتیکی (ایستا) مورد استفاده قرار گیرد، انتخاب انواعی است که «ماگزیم فشار الکتریکی معکوس سرویس» آنها (U_{RWM}) برابر یا بیشتر از فشار الکتریکی معکوسی (U_{Tmax}) باشد، که امکان دارد در کار عادی مبدل پیش آید (به عنوان مثال به بند ۶-۴ مراجعه شود). معمولاً ماگزیم (بیشینه) فشار الکتریکی معکوس سرویس (U_{RWM}) که توسط سازنده داده می شود، تقریباً $2/3$ ماگزیم فشار الکتریکی مستقیم یا معکوس غیر تکراری (U_{DSM}, U_{RSM}) متناوب را در نظر می گیرد. چنانچه امکان وجود «جهشهای فشار الکتریکی^۲»، به مقداری بیشتر از ماگزیم (بیشینه) فشار الکتریکی غیر تکراری (U_{RSM}, U_{DSM}) عنصر انتخاب شده، متصور باشد، باید عنصری با ماگزیم فشار الکتریکی سرویس بالاتر انتخاب شود. اغلب بین فشار الکتریکی غیر تکراری (U_{RSM}, U_{DSM}) و فشار الکتریکی معکوس (U_{Tmax}) ضریب اطمینانی از ۲ تا ۲٫۵ در نظر گرفته می شود.

در مرحله دوم انتخاب، چنان عنصر یکسوکننده ای انتخاب می شود که جریان متوسط اسمی $I_{T(AV)}$ آن برابر یا بیشتر از مقدار متوسط جریان جاری در عنصر (I_{Tmed}) باشد

(به عنوان مثال به بند ۴-۶ مراجعه شود). برای تعیین جریان I_{Tmed} ، باید ما گزیم (بیشینه) باری را که ممکن است در کار عادی مبدل پیش آید در نظر گرفت.

از آنجایی که دمای پیوندگاه نباید از مقدار حد θ_{JM} بالاتر رود، و تجاوز از این مقدار (حتی برای مدتی بسیار کوتاه) باعث خرابی عنصر یکسوکننده می شود، کنترل آن اجباری است (محاسبات حرارتی در بند ۳-۳ دقیقاً بررسی خواهد شد). چنانکه نشان داده خواهد شد، برای محاسبه دمای پیوندگاه نیمه هادی (θ_{JM})، باید تلفات مؤثر پدید آمده در عنصر یکسوکننده، شرایط خنک سازی، و اضافه بار احتمالی در مدت زمان مشخص (به عنوان مثال جریان در موقع راه اندازی موتور جریان دایم) در نظر گرفته شوند. چنانچه دمای محاسبه شده برای پیوندگاه نیمه هادی θ_J از مقدار حد θ_{JM} بیشتر باشد، باید یا عنصر یکسوکننده با جریان متوسط اسمی ($I_{T(AV)}$) بیشتری برگزید و یا شرایط خنک سازی را بهتر ساخت. در عوض هرگاه θ_J از θ_{JM} بسیار کمتر باشد، می توان شرایط خنک سازی را ساده تر کرد یا عنصر یکسوکننده با جریان متوسط اسمی کمتری برگزید.

۳-۲-۳ رعایت مقادیر حد دیگر

برای جلوگیری از تجاوز از دیگر مقادیر حد داده شده در بند ۳-۲-۱، چنانکه در اینجا با اختصار بیان خواهد شد، معمولاً لازم می شود عناصر تکمیل کننده ای به عنصر یکسوکننده اضافه شوند.

برای محدود کردن سرعت افزایش فشار الکتریکی بین آند و کاتد، به مقداری کمتر از مقدار بحرانی آن $(du/dt)_{crit}$ ، می توان از یک مدار متوالی RC، که موازی بین آند و کاتد قرار می گیرد، استفاده کرد. در بند ۳-۶ ملاحظه خواهد شد که این مدار RC برای حفاظت عنصر یکسوکننده نیز به کار می آید.

سرعت افزایش جریان، در موقع روشن شدن عنصر یکسوکننده باید به مقداری کمتر از مقدار بحرانی $(di_T/dt)_{crit}$ محدود شود. وجود یک القاگر متوالی با عنصر یکسوکننده، سرعت افزایش جریان را محدود می سازد. در مبدل های استاتیکی (ایستای) با کموتاسیون طبیعی، معمولاً القاگری مدار کموتاسیون برای محدود کردن di/dt کافی است. اما در مبدل های استاتیکی (ایستای) با کموتاسیون اجباری القاگری که در موقع کموتاسیون ظاهر می شود تنها القاگری نشتی اتصالات است که معمولاً مقدارش خیلی کوچک است و برای محدود کردن di/dt به مقداری قابل قبول، کافی نیست. لذا، در این حالت لازم است القاگرهای کوچکی با عنصر یکسوکننده متوالی بست.

چنانکه گفته شد برای خاموش شدن عنصر یکسوکننده، فشار الکتریکی بین آند و کاتد باید پس از صفر شدن جریان، برای مدت زمانی بیشتر از t_q منفی بماند. در مبدل های ایستای با کموتاسیون طبیعی، عدم حصول این شرط فقط ممکن است در حالت کار به صورت اندولر پیش آید. بنابراین، باید رعایت شود که زاویه خاموش شدن γ از مقدار



بحرانی تجاوز نکند (به بند ۵-۵ مراجعه شود). در مورد مبدل‌های ایستای با کموتاسیون اجباری، برای حصول این شرط، ظرفیت خازن کموتاسیون (خازن خاموش کننده) باید با رعایت زمان لازم برای خاموش شدن t_q تعیین شود (به بند ۱۳-۳ مراجعه کنید). تیرستورها را معمولاً به دو دسته تقسیم بندی می کنند: «تیرستورهای کند» با t_q بین ۱۰۰ تا ۲۰۰ میکروثانیه (که در مبدل‌های ایستای با کموتاسیون طبیعی به کار می روند) و «تیرستورهای سریع» با t_q بین ۵ تا ۵۰ میکروثانیه (که در مبدل‌های ایستای با کموتاسیون اجباری به کار می روند).

مقادیر حد برای مدار چکاننده، با تعیین مقادیر مناسب برای وسایل فرمان (خصوصاً ابعاد ترانسفورماتور پالس یا تپ) رعایت می شوند. از جمله مقادیر حد برای مدار چکاننده، مقادیر می نیمم (کمینه) فشار الکتریکی و جریان آن هستند که روشن شدن تیرستور را تضمین می کنند. این مقادیر به توسط سازندگان تعیین می شوند و در اختیار مصرف کنندگان قرار می گیرند. تجاوز از این مقادیر می نیمم (کمینه) مادامی که از نظر تلفات در مدار چکاننده ایجاد اشکال نکند ایراد ندارد. بالاخره، برای اطمینان از روشن شدن تیرستور، عرض پالس (تپ) روشن کننده باید از مقدار می نیممی (کمینه ای) بیشتر باشد تا در این مدت جریان تیرستور بتواند به مقداری بیش از I_H به نام «جریان نگهدارنده» برسد (بند VII-۶-۲ ملاحظه شود). [جریان نگهدارنده جریانی است که با آن، ادامه هدایت در تیرستور حتی بدون وجود پالس (تپ) روشن کننده امکان خواهد داشت.] برای مبدل‌های ایستای با کموتاسیون طبیعی، عرض پالسها (تپها) روشن کننده تقریباً بین ۳۰۰ تا ۴۰۰ میکروثانیه است.

۳-۳ رفتار حرارتی و خنک سازی

۳-۳-۱ کلیات

معمولاً نیمه هادیها در مقابل افزایش زیاد دمای درونی بسیار حساس اند. بویژه در تجهیزات قدرت، محاسبه دقیق دمای پیوندگاه نیمه هادی (T_j) ضرورت دارد. افزایش دما در عنصر یکسو کننده به تلفات عنصر، رفتار حرارتی و شرایط خنک کردن آن بستگی دارد. به کمک طرح واره معادل حرارتی می توان (با روشهایی شبیه به روشهای به کار رفته در مدارهای الکتریکی) افزایش دما را، حتی در حالت گذرا، تعیین کرد. در زیر، مهمترین نکات مربوط بررسی خواهند شد.

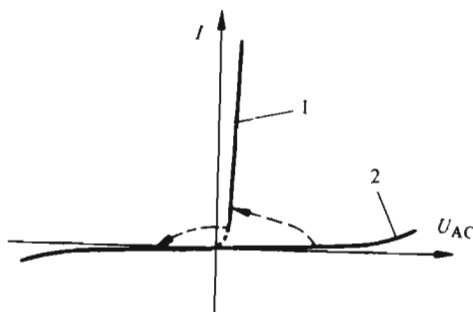
اغلب برای خنک کردن، از هوای محیط استفاده می شود که ضمن گردش در اطراف خنک کننده ها، حرارت پدید آمده به توسط عنصر یکسو کننده را جذب و منتقل می کند. برای قدرت های بالا اغلب از آب یا روغن به عنوان عامل خنک کننده استفاده می شود. در

حالت اول، آب مستقیماً در داخل خنک کننده جریان می یابد. در حالت دوم، همانند ترانسفورماتورها، عنصر یکسو کننده در داخل مخزنی پر از روغن غوطه ور است. این عوامل خنک کننده بمراتب از هوا مؤثرترند و ساخت مبدل‌های ایستای کم حجم‌تری را امکان پذیر می سازند. در عوض نسبت به روش خنک کردن با هوا، به تجهیزات اضافی و پیچیده تری نیاز دارند. بدین علت است که استفاده از این دو روش جز در قدرتهای خیلی بالا اقتصادی نخواهد بود. در بررسی رفتار حرارتی در اینجا فقط به مطالعه متداولترین حالت یعنی روش خنک کردن به وسیله هوا اکتفا خواهد شد.

۳-۳-۲ تلفات در عنصر یکسو کننده

تلفات در عنصر یکسو کننده، از نوع الکتریکی اند و از افت فشار الکتریکی بین آند و کاتد و جریان جاری در عنصر ناشی می شوند. این تلفات، به طور کلی به منحنی مشخصه عنصر یکسو کننده (شکل ۱-۳) بستگی دارند. بر حسب شیوه کارکرد، تلفات عنصر را می توان به ترتیب زیر تقسیم بندی کرد:

- تلفاتی که هنگام «هدایت مستقیم» (که فشار الکتریکی بین آند و کاتد مثبت و جریان در جهت مستقیم یعنی از آند به کاتد است. منحنی ۱ در شکل ۱-۳) پدید می آیند.
- تلفاتی که هنگام «قطع» (وقتی فشار الکتریکی بین آند و کاتد مثبت و یا منفی و جریان قطع است. منحنی ۲ در شکل ۱-۳) پدید می آیند.
- تلفات مربوط به کموتاسیون از حالت قطع به حالت هدایت یا بعکس (فشار الکتریکی بین آند و کاتد و جریان در حین کموتاسیون در عبور از منحنی ۲ به منحنی ۱ یا به عکس: شکل ۱-۳).
- تلفات در پیوندگاه چکانده-کاتد (فشار الکتریکی و جریان در مدار چکانده).



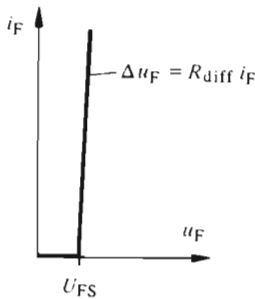
شکل ۱-۳ منحنی مشخصه عنصر یکسو کننده.

معمولاً از میان تلفات نامبرده، تنها تلفات در حالت هدایت مستقیم (منحنی ۱ در شکل ۱-۳) اهمیت دارد و می توان از تلفات دیگر صرف نظر کرد. تلفات مربوط به

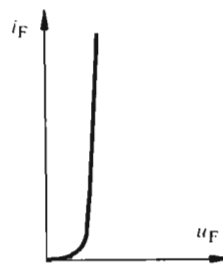


کمو تاسیون از حالت قطع به حالت هدایت و بعکس، فقط در مبدل‌های ایستایی با کمو تاسیون اجباری و هنگامی که فرکانس قطع و وصل از چند صد هرتز تجاوز کند، در نظر گرفته می‌شود. برای محاسبه این تلفات، به کار بردن مشخصه‌های گذرای کمو تاسیون، که توسط سازندگان عرضه می‌شوند ضرورت دارد.

تلفات به هنگام هدایت مستقیم را می‌توان با استفاده از «مشخصه مستقیم» عنصر یکسو کننده (شکل ۳-۲)، که تغییرات افت فشار الکتریکی بین آنند و کاتد را بر حسب جریان در هنگام هدایت مستقیم مشخص می‌سازد، محاسبه کرد. در این شکل u_F فشار الکتریکی مستقیم و i_F جریان مستقیم در عنصر یکسو کننده است (زیر نویس F از کلمه انگلیسی forward گرفته شده).



شکل ۳-۲ مشخصه مستقیم تقریبی.



شکل ۳-۲ مشخصه مستقیم حقیقی.

برای سهولت در محاسبات، می‌توان بد جای مشخصه مستقیم حقیقی (شکل ۳-۲) «مشخصه مستقیم تقریبی» (شکل ۳-۳) را به کار برد. در این مشخصه از «فشار الکتریکی استاندارد» U_{FS} و «مقاومت دیفرانسیلی» R_{diff} استفاده شده است، و می‌توان نوشت:

$$u_F = U_{FS} + R_{diff} i_F \quad (۱-۳)$$

برای هر عنصر یکسو کننده مقادیر عددی U_{FS} و R_{diff} به همراه سایر مشخصات توسط سازندگان مشخص می‌شود و در اختیار مصرف کنندگان قرار می‌گیرد. اغلب، جریان جاری در عنصر یکسو کننده جریانی تناوبی با زمان تناوب (دوره) T است. بنابراین، تلفات متوسط از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$\begin{aligned} P_F &= \frac{1}{T} \int_0^T u_F i_F dt = \frac{1}{T} \int_0^T (U_{FS} + R_{diff} i_F) i_F dt = \\ &= U_{FS} I_{Tmed} + R_{diff} I_{Teff}^2 \end{aligned} \quad (۲-۳)$$

که در آن، I_{Tmed} «جریان متوسط» و I_{Teff} «جریان مؤثر» در عنصر یکسوکننده است. برای مبدل‌های ایستای با کموتاسیون طبیعی این مقادیر در بند ۴-۶ محاسبه خواهند شد.

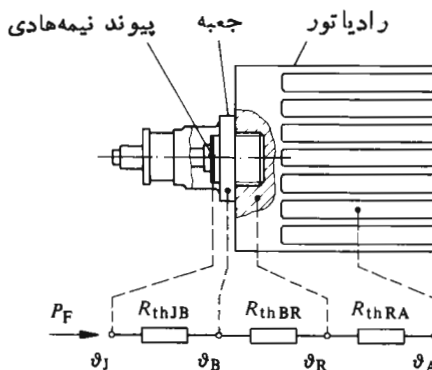
۳-۳-۳ طرح‌واره معادل حرارتی

در عنصر یکسوکننده، تلفات در پیوندگاه آند و کاتد رخ می‌دهد و ایجاد حرارت می‌کند. حرارت تولید شده باید به هوای محیط منتقل شود. چنانکه در شکل ۳-۴ نشان داده شده است، «مقاومت‌های حرارتی» در مقابل عبور این حرارت مقاومت می‌کنند. در مورد عناصر یکسوکننده واقع بر رادیاتور (تابشگر)، می‌توان مقاومت‌های حرارتی زیر را از هم تمیز داد:

R_{thJB} مقاومت حرارتی بین پیوندگاه نیمه‌هادی و جعبه

R_{thBR} مقاومت حرارتی بین جعبه و رادیاتور (تابشگر)

R_{thRA} مقاومت حرارتی بین رادیاتور (تابشگر) و هوای محیط.



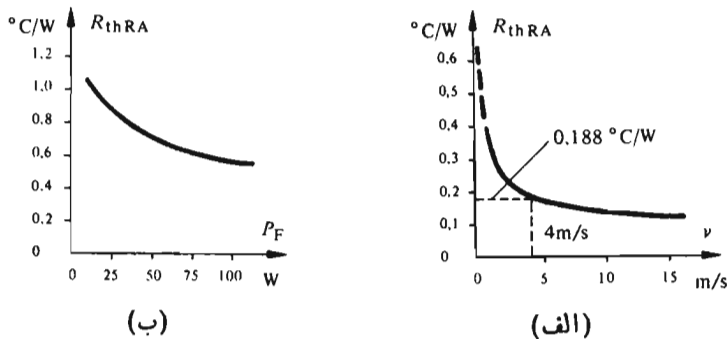
شکل ۳-۴ طرح‌واره معادل حرارتی در عنصر یکسوکننده با رادیاتور (تابشگر).

مقاومت حرارتی R_{thJB} به نوع عنصر یکسوکننده بستگی دارد. اطلاعات مربوط به آن را می‌توان از ورقه‌های کار شناخت عنصر یکسوکننده که توسط سازندگان منتشر می‌شود به دست آورد.

مقاومت حرارتی R_{thBR} به چگونگی قرار گرفتن عنصر یکسوکننده بر روی رادیاتور (تابشگر) بستگی دارد. در صورتی که مقاومت حرارتی R_{thRA} به نوع رادیاتور و مخصوصاً سرعت عبور هوا در اطراف آن مربوط است. مقادیر این دو مقاومت از ورقه‌های کار شناخت رادیاتور (تابشگر) ها قابل استخراج است.

شکل ۳-۵ مثالی را برای مقاومت حرارتی R_{thRA} نشان می‌دهد. ملاحظه می‌شود که در حالت خنک کردن اجباری به وسیله پنکه (تهویه)، سرعت هوای خنک‌ساز اثر قابل-

توجهی بر مقاومت حرارتی R_{thRA} دارد (شکل ۵-۳ الف). در حالتی که عمل خنک کردن بدون تهویه و به صورت «جابجایی طبیعی» انجام می‌پذیرد، مقاومت حرارتی تابعی است از قدرت تلف شده P_F (شکل ۵-۳ ب). این بستگی بدین علت است که، هوای اطراف رادیاتور (تابشگر) گرم می‌شود و آرامی حرکت می‌کند و سرعت این حرکت با افزایش قدرت تلف شده و در نتیجه گرمای حاصل افزایش می‌یابد. مقاومت حرارتی R_{thRA} در حالت جابجایی طبیعی بمراتب بیشتر از مقاومت حرارتی در حالت تهویه است. معمولاً، جز در قدرتهای خیلی کم، عمل خنک کردن به صورت تهویه به کمک پنکه صورت می‌پذیرد.



شکل ۵-۳ مقاومت حرارتی R_{thRA} بین رادیاتور (تابشگر) و هوای محیط؛ الف) خنک کردن به صورت تهویه اجباری؛ ب) خنک کردن به صورت جابجایی طبیعی.

۴-۳-۴ محاسبه حرارتی

به کمک طرح‌واره معادل حرارتی می‌توان افزایش دمای $\Delta\vartheta$ را محاسبه کرد. معمولاً رابطه زیر، که معادل قانون اهم برای سیستم الکتریکی است، برقرار است

$$\Delta\vartheta = R_{th} P \quad (۳-۳)$$

برای حالت خاص نشان داده شده در شکل ۴-۳، دمای پیوندگاه نیمه‌هادی از رابطه زیر به دست می‌آید

$$\vartheta_J = \vartheta_A + R_{th\ tot} P_F \quad (۴-۳)$$

که در آن ϑ_A دمای هوای محیط و $R_{th\ tot}$ مقاومت حرارتی کل بین پیوندگاه نیمه‌هادی و هوای محیط است و می‌توان نوشت:

$$R_{th\ tot} = R_{thJB} + R_{thBR} + R_{thRA} \quad (۵-۳)$$

مقادیر معلوم، در محاسبه حرارتی، معمولاً عبارتند از: دمای ماکزیمم قابل تحمل در پیوندگاه نیمه‌هادی (ϑ_{JM})، دمای محیط (ϑ_A) و تلفات P_F . بعلاوه، مقادیر مقاومت‌های حرارتی R_{thJB} ، R_{thBR} و R_{thRA} نیز معلوم‌اند. در محاسبه حرارتی باید چگونگی عمل خنک کردن را به وسیله تهویه یا به صورت جابجایی طبیعی مشخص کرد تا دمای پیوندگاه نیمه‌هادی از مقدار ϑ_{JM} بالاتر نرود. مثال ساده زیر چگونگی محاسبه را تشریح می‌کند.

۵-۳-۳ مثال برای محاسبه حرارتی

برای تیرستور و رادیاتور (تابشگر) مفروضی مقادیر زیر داده شده‌اند:
 $P_F = 160^\circ W$ ، $R_{thBR} = 0.04^\circ C/W$ ، $R_{thJB} = 0.24^\circ C/W$ ، $\vartheta_{JM} = 115^\circ C$
 و $\vartheta_A = 40^\circ C$ ، مقاومت حرارتی R_{thRA} هم مطابق شکل ۵-۳ است. چگونگی عمل خنک کردن را تعیین کنید.

مقاومت حرارتی کل باید چنین باشد

$$R_{th\ tot} \leq \frac{\vartheta_J - \vartheta_A}{P_F} = \frac{115 - 40}{160} = 0.468^\circ C/W \quad (۶-۳)$$

از این رابطه نتیجه می‌شود

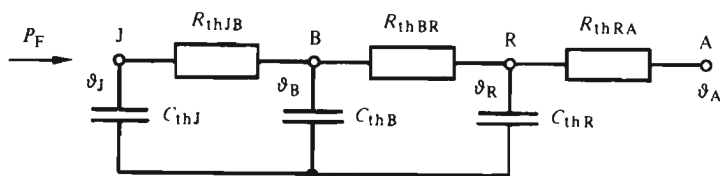
$$R_{thRA} \leq R_{th\ tot} - (R_{thJB} + R_{thBR}) = 0.468 - (0.24 + 0.04) = 0.188^\circ C/W \quad (۷-۳)$$

توجه به شکل ۵-۳ نشان می‌دهد که عمل خنک کردن باید با تهویه صورت پذیرد و سرعت هوا در اطراف رادیاتور (تابشگر) $\vartheta \geq 4\text{ m/s}$ باشد.
 در استفاده از عنصر یکسوکننده، دمای محیط اثر قابل توجهی دارد. چنانچه در مثال فوق $\vartheta_A = 60^\circ C$ باشد، مقاومت حرارتی کل $R_{th\ tot}$ باید برابر یا کمتر از $0.344^\circ C/W$ و R_{thRA} برابر یا کمتر از $0.064^\circ C/W$ شود. با توجه به مشخصه شکل ۵-۳ (الف) ملاحظه می‌شود که رسیدن به این مقدار حتی با سرعت‌های خیلی زیاد هوا نیز امکان‌پذیر نیست و لازم است تیرستور و رادیاتور (تابشگر) بزرگتری انتخاب شود.

معمولاً در ورقه‌های کار شناخت که توسط سازندگان انتشار می‌یابد یک رشته منحنی جهت تعیین R_{thRA} ، بر حسب P_F و ϑ_A داده می‌شوند.

۳-۶ طرح‌واره معادل حرارتی برای پدیده‌های گذرا

طرح‌واره معادل حرارتی که در شکل ۳-۴ نشان داده شده فقط برای کار در حالت پایا معتبر است. باید دانست که وقتی پدیده گذرای، مانند اضافه بار ناگهانی و موقتی پیش می‌آید، پیوندگاه نیمه‌هادی، جعبه و رادیاتور (تابشگر)، تا رسیدن به دمای نهایی مقداری انرژی حرارتی در خود ذخیره می‌کنند. این ذخیره انرژی را می‌توان، مطابق شکل ۳-۶، به وسیله خازنهای C_{thJ} ، C_{thB} و C_{thR} ، در طرح‌واره معادل حرارتی منظور کرد.



شکل ۳-۶. طرح‌واره معادل حرارتی مربوط به پیوندگاه نیمه‌هادی، جعبه و رادیاتور (تابشگر) به هنگام پدیده‌های گذرا.

خازنهای فوق که «خازنهای حرارتی» نامیده می‌شوند، مقادیر متفاوتی دارند. و مقدار هر یک به ثابت زمانی که تحت آن، هر جزء، دمای خود را نسبت به جزء مجاور افزایش می‌دهد بستگی دارد. به طور تقریبی، می‌توان برای اجزای مختلف، ثابتهای زمانی زیر را در نظر گرفت

$T_J \cong 2 \text{ ms}$ — پیوندگاه نیمه‌هادی

$T_B \cong 2 \text{ s}$ — جعبه

$T_R \cong 4 \text{ min}$ (تهویه اجباری) — رادیاتور (تابشگر)

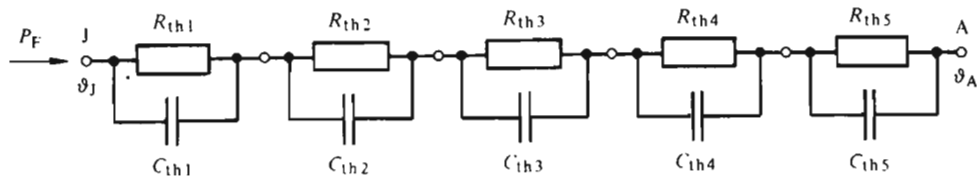
۱۵ min (جابجایی طبیعی)

محاسبه مقادیر عددی مقاومتها و خازنهای حرارتی، از روی شکل ظاهری عنصر یکسوکننده و تابشگر عملاً غیر ممکن است و بویژه در نظر گرفتن مقاومتها و حرارتی اتصالات و نقاط جوش امکان‌پذیر نیست. بنابراین، در مواردی که این مقادیر به توسط سازندگان مشخص نشده باشند، لازم خواهد بود آنها را به کمک تطبیق تجربی با عناصر و تابشگرهای دیگر به دست آورد.

در طرح‌واره حرارتی نشان داده شده در شکل ۳-۶ فقط سه جزء «پیوندگاه نیمه‌هادی، جعبه و تابشگر» در نظر گرفته شده‌اند. برای مطالعه دقیقتر رفتار گذرا باید طرح‌واره معادل حرارتی کاملتری، شامل ۵ تا ۷ مدار RC ، استفاده شود. چنانکه در شکل ۳-۷ نشان داده شده است، برای سهولت در محاسبات، می‌توان به جای مدارهای RC زنجیره‌ای^۱

1) cascade

مدارهای RC متوالی در نظر گرفت. در این حالت (شکل ۳-۷) مقاومتها و خازنهای حرارتی، $R_{th1} \dots R_{th5}$ و $C_{th1} \dots C_{th5}$ مقادیر واقعی نشان داده شده در شکل ۳-۶ نیستند و فقط یک مدل (الگوی) ریاضی اند.



شکل ۳-۷ طرحواره معادل حرارتی کلی برای پدیده‌های گذرا.

بدین ترتیب، می‌توان «تابع تبدیلی» به صورت زیر تعریف کرد

$$G_{th}(s) = \frac{\Delta \theta_J}{\Delta P_F} = \sum_{k=1}^n \frac{R_{thk}}{1 + sT_{thk}} \quad (۸-۳)$$

در این رابطه، n تعداد مدارهای RC متوالی و T_{thk} ثابت زمانی حرارتی برای مدار شماره k است

$$T_{thk} = R_{thk} \cdot C_{thk} \quad (۹-۳)$$

به ازای $s=0$ ، رابطه‌ای به دست می‌آید که در حالت پایا معتبر است، یعنی

$$\sum_{k=1}^n R_{thk} = R_{th \text{ tot}} \quad (۱۰-۳)$$

$R_{th \text{ tot}}$ مقاومت حرارتی کل بین پیوندگاه نیمه‌هادی و هوای محیط است که در رابطه (۳-۵) نیز داده شده است.

۳-۷ محاسبه حرارتی برای پدیده‌های گذرا

در محاسبه حرارتی برای پدیده‌های گذرا، لازم است تا طرحواره معادل حرارتی مطابق شکل ۳-۷ استفاده شود. به عنوان مثال برای پدیده‌های گذرا، می‌توان از کار در فرکانس

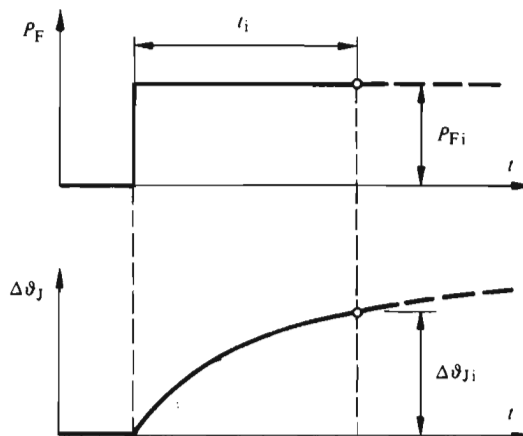
کم، اضافه بار موقتی که به کار دایمی افزوده می شود و بار حاصل از تپهای کوتاه مدت نام برد.

با داشتن تغییرات زمانی تلفات P_F ، تغییرات دمای پیوندگاه نیمه هادی (ϑ_j) را می توان به کمک تابع تبدیل (معادله ۳-۸)، و استفاده از روشهای تبدیل لاپلاس محاسبه کرد. محاسبه عددی مربوط معمولاً طولانی است و باید از ماشینهای حسابگر استفاده بشود. برای ساده تر کردن محاسبه، می توان به جای روند واقعی تغییرات تلفات، یک منحنی مستطیلی قرار داد. بدین ترتیب روند تغییرات دما، به طریق ترسیمی و با استفاده از قانون جمع پذیری (برهم نهی^۱) امکان پذیر خواهد بود.

اغلب در ورقه های کار شناخت عناصر یکسو کننده، «مقاومت حرارتی گذرا» به توسط منحنی هایی داده می شود. مقاومت حرارتی گذرا، مقاومتی است فرضی، که برای تپ مستطیلی جریان با مدت زمان مشخصی، محاسبه افزایش دمای پیوندگاه نیمه هادی را به طریق ساده ای امکان پذیر می سازد.

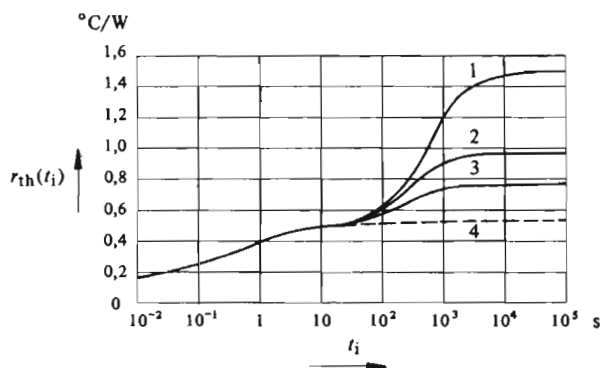
مقاومت حرارتی گذرا را می توان با استفاده از شکل ۳-۸ چنین تعریف کرد: چنانچه تلفات P_{Fi} در مدت زمان t_i اثر کند و افزایش دمای پیوندگاه نیمه هادی $\Delta\vartheta_{ji}$ به طور تجربی یا از طریق محاسبه مشخص شود، مقاومت حرارتی گذرا عبارت خواهد بود از

$$r_{th}(t_i) = \frac{\Delta\vartheta_{ji}}{P_{Fi}} \quad (۳-۱۱)$$



شکل ۳-۸ چگونگی تعریف مقاومت حرارتی گذرا.

مقاومت حرارتی گذرای $r_{th}(t_i)$ ، تابعی است از زمان t_i و به مشخصه‌های یکسو-کننده، تابشگر و چگونگی خنک کردن بستگی دارد. شکل ۳-۹ مثالی را در این باره نشان می‌دهد. ملاحظه می‌شود که روش خنک کردن تنها برای زمانهای t_i بیشتر از ۲۰ تا ۵۰ ثانیه مؤثر است و حالت پایا عملاً پس از ۱۰۴ یا ۱۶۷ دقیقه یا ۲۸ ساعت به دست می‌آید.



شکل ۳-۹ مقاومت حرارتی گذرا: (۱) جابجایی طبیعی؛ (۲) تهویه اجباری با سرعت ۱ متر در ثانیه؛ (۳) تهویه اجباری با سرعت ۳ متر در ثانیه؛ و (۴) تهویه اجباری با سرعت بی نهایت ($R_{thRA} = 0$).

۳-۴ اتصال موازی یا متوالی عناصر یکسو کننده

۳-۴-۱ کلیات

چنانچه جریان متوسط اسمی $I_{T(AV)}$ برای قویترین عنصر یکسو کننده در دسترس، کمتر از جریان I_{Tmed} باشد، لازم خواهد بود دو یا چند عنصر یکسو کننده به طور موازی بسته شوند. در عوض هرگاه فشار الکتریکی معکوس U_{Tmax} از ماگزیم فشار الکتریکی معکوس سرویس U_{RWM} تجاوز کند، باید دو یا چند عنصر یکسو کننده به طور متوالی قرار داده شوند. در صورت لزوم می‌توان از اتصال مختلط متوالی و موازی نیز استفاده کرد.

۳-۴-۲ اتصال موازی

در مواردی که دو یا چند عنصر یکسو کننده موازی بسته می‌شوند، باید دقت شود که توزیع جریان در آنها یکنواخت باشد. مع‌هذا به علت تفاوت مشخصه‌های مستقیم $i_F(u_F)$ عناصر یکسو کننده، توزیع یکنواخت جریان امکان پذیر نیست.

در شکل ۳-۱۰، از مشخصه‌های مستقیم n عنصر یکسو کننده موازی یکدیگر، بدترین



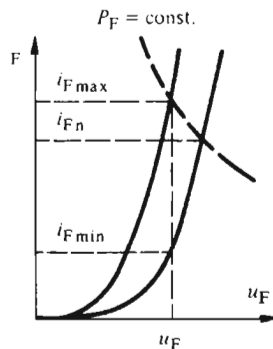
و بهترین مشخصه یعنی مشخصه‌های حد نشان داده شده‌اند، به طوری که مشخصه‌های عناصر دیگر بین این دو حد قرار می‌گیرند. با توجه به اتصال موازی، فشار الکتریکی کلیه عناصر (u_F)، یکسان است. بنابر مشخصه‌های حد جریانهای عناصر می‌توانند بین دو مقدار i_{Fmin} و i_{Fmax} باشند. جریان i_{Fmax} به تلفات $P_F = Cte$ مربوط می‌شود. این تلفات (که برای تمامی عناصر ثابت فرض می‌شود) از روی جریان i_{Fn} و برای عنصر با بدترین مشخصه مستقیم به دست می‌آید. بدین ترتیب، پیداست عنصری که مشخصه مستقیم بهتری دارد، جریانی بیشتر از جریان اسمی از خود عبور می‌دهد.

چنانچه از n عنصر یکسوکننده موازی یکدیگر فقط یک عنصر دارای مشخصه مربوط به i_{Fmax} و بقیه $n-1$ عنصر دارای مشخصه مربوط به i_{Fmin} باشند، جریان کل عبارت خواهد بود از

$$i_{tot} = i_{Fmax} + (n-1)i_{Fmin} \quad (۱۲-۳)$$

در عمل چنین حالتی بندرت پیش می‌آید. اگر فرض شود که مشخصه‌های مستقیم عناصر به طور یکنواخت بین دو مشخصه حد توزیع شده‌اند جریان کل را می‌توان از روی مقدار متوسط $(i_{Fmax} + i_{Fmin})/2$ به دست آورد

$$i_{tot} = n \frac{i_{Fmax} + i_{Fmin}}{2} \quad (۱۳-۳)$$



شکل ۱۰-۳ مشخصه‌های مستقیم-مشخصه‌های حد.

برای سرعت محاسبه، جریان کل را می‌توان با وارد کردن ضریبی به نام «ضریب اتصال موازی» (c_p)، از روی جریان اسمی i_{Fn} تعیین کرد

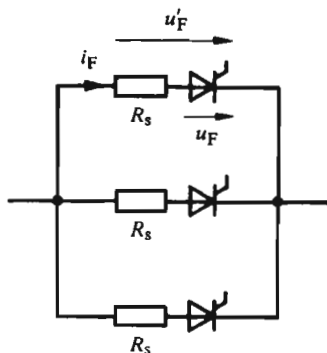
$$i_{tot} = c_p n i_{Fn} \quad (۱۴-۳)$$

مقایسه روابط (۱۳-۳) و (۱۴-۳) ضریب c_p را به دست می‌دهد

$$c_p = \frac{i_{Fmax} + i_{Fmin}}{2i_{Fn}} \quad (15-3)$$

برای اینکه اتصال موازی چند عنصر یکسوکننده بتواند به طور مؤثر کار کند، ضریب c_p نباید از ۸۰۰ کمتر باشد. ولی به خاطر عدم یکنواختی متداول بین مشخصه‌های مستقیم عناصر، معمولاً این ضریب از ۸۰۰ کمتر است. در این صورت لازم خواهد بود تا مطابق شکل ۱۱-۳، هر عنصر یکسوکننده با یک مقاومت اهمی R_s متوالی شود. اثر این مقاومت اهمی افزایش فشار الکتریکی مستقیم عنصر است، به طوری که می‌توان نوشت

$$u'_F = u_F + R_s i_F \quad (16-3)$$

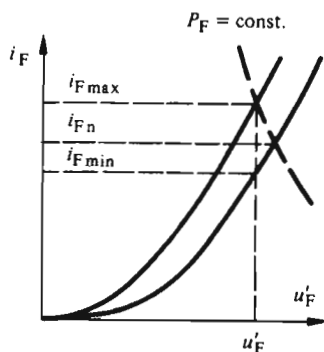


شکل ۱۱-۳ اتصال موازی چند شاخه متشکل از یک مقاومت R_s و یک عنصر یکسوکننده متوالی.

چنانکه در شکل ۱۲-۳ نشان داده شده است، در اثر افزایش فشار الکتریکی مستقیم، عدم یکنواختی بین مشخصه‌ها کاهش می‌یابد و ضریب c_p می‌تواند برابر ۸۰۰ یا بیشتر از آن بشود. ولی، این روش، تلفاتی اضافی در مقاومت‌های R_s پدید می‌آورد. وظیفه این مقاومت‌های متوالی، اغلب به عهده فیوز (گداپذیر)هایی است که برای حفاظت با هر عنصر متوالی می‌شوند.

برای اینکه توزیع جریان حتی در موقع روشن شدن تیرستورها نیز یکنواخت باشد، لازم است که تپ روشن‌کننده همزمان به چکاننده کلیه تیرستورهای موازی شده داده شود. جهت تضمین روشن شدن تیرستورها، تپ روشن‌کننده باید دارای قدرتی به اندازه کافی و پیشانی با شیب تند^۱ باشد.

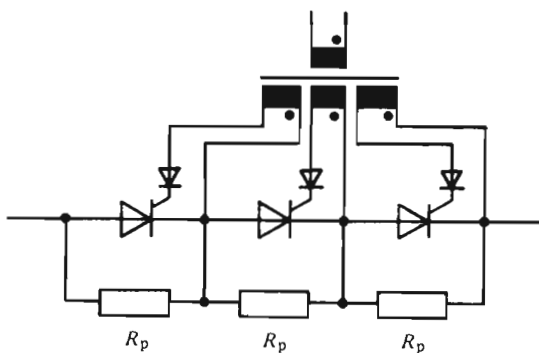
1) flanc montant



شکل ۳-۱۲ مشخصه‌های مستقیم با مقاومت متوالی-مشخصه‌های حد.

۳-۴-۳ اتصال متوالی

در حالتی که دو یا چند عنصر یکسوکننده متوالی بسته می‌شوند، یکسان بودن فشار الکتریکی بین آن‌د و کاتد، در حالت قطع عنصر، حایز اهمیت است. ولی به علت تفاوت در مشخصه‌های قطع عناصر، فشارهای الکتریکی بین آن‌د و کاتد (در حالت قطع) اصولاً نمی‌توانند یکسان باشند. برای از بین بردن عدم یکسواختی فشار الکتریکی لازم است تا به هر عنصر یکسوکننده، یک مقاومت اهمی R_p موازی افزوده شود (شکل ۳-۱۳).



شکل ۳-۱۳ اتصال متوالی چند عنصر یکسوکننده.

مقدار مقاومت R_p را باید طوری انتخاب کرد که، در حالت قطع عنصر، جریانی جاری در این مقاومت تقریباً ده برابر جریان قطع (جریان معکوس) عنصر یکسوکننده باشد. بدین ترتیب، مقاومت‌های R_p ، توزیع یکسواخت فشار الکتریکی را بین آن‌د و کاتد

عناصر تضمین می‌کنند، ولی باعث پدید آمدن تلفات اضافی در مقاومتهای R_p ، هنگام قطع عناصر، می‌شوند.

هر گاه عناصر یکسو کننده تیرستور باشند، لازم است تا مطابق شکل ۳-۱۳ تپهای روشن کننده از طریق یک ترانسفورماتور تپ و به وسیله سیم پیچهایی که از همدیگر مجزا هستند، اعمال شوند. باید دقت کرد که تپ روشن کننده در حین قطع عنصر اعمال نشود، زیرا، در این صورت جریان معکوس شدیداً افزایش می‌یابد و یکنواختی حاصل از مقاومتهای R_p را برهم می‌زند.

۳-۵ حفاظت در مقابل اضافه جریان*

۳-۵-۱ علت‌های اضافه جریان

عناصر یکسو کننده در مقابل اضافه جریان بسیار حساس‌اند. تلفاتی که در اثر جریانهای زیاد به وجود می‌آیند، دمای پیوندگاه نیمه‌هادی را چنان بالا می‌برند که می‌تواند به خرابی عنصر یکسو کننده بینجامد (به بند ۳-۳ مراجعه شود). بنابراین پیش‌بینی حفاظت مناسبی در این مورد ضرورت دارد.

اضافه جریان ممکن است در اثر اتصال کوتاه در دو سر خروجی یا در یکی از شاخه‌های مبدل ایستا به وجود آید. همچنین، اضافه شدن بار خروجی مبدل ایستا نیز باعث اضافه جریان در عناصر آن می‌شود. بدین علت است که گاهی به جای اصطلاح اضافه جریان، اصطلاح «اضافه بار» به کار می‌رود.

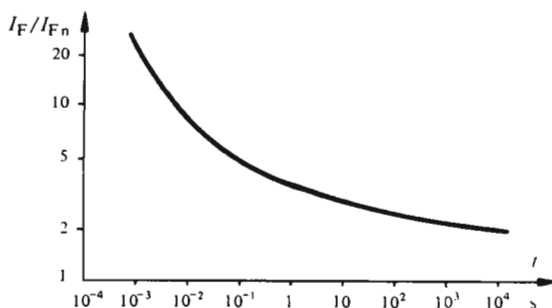
عناصر یکسو کننده، اضافه جریان را فقط برای مدت زمان مشخصی که تابع مقدار جریان است می‌توانند تحمل کنند. ارتباط بین مقدار اضافه جریان و مدت زمان تحمل می‌تواند از مقاومت حرارتی گذرای عنصر یکسو کننده به دست آید (به شکل ۳-۹ مراجعه شود). برای عنصر یکسو کننده، نسبت جریان I_F به جریان اسمی I_{Fn} بر حسب زمان تحمل t در شکل ۳-۱۴ نشان داده شده است و «مشخصه حد اضافه جریان» یا «مشخصه حد اضافه بار» نامیده می‌شود.

حفاظت پیش‌بینی شده برای عنصر یکسو کننده باید بتواند، قبل از گذشت زمان تحمل، اضافه جریان را قطع کند. عمل حفاظت می‌تواند به وسیله فیوز (گداز پذیر) یا دیژنکتور^۱ (کشاینده) سریع انجام پذیرد. معمولاً ترکیبی از این دو وسیله به کار می‌رود.

۳-۵-۲ حفاظت به وسیله فیوز (گداز پذیر)

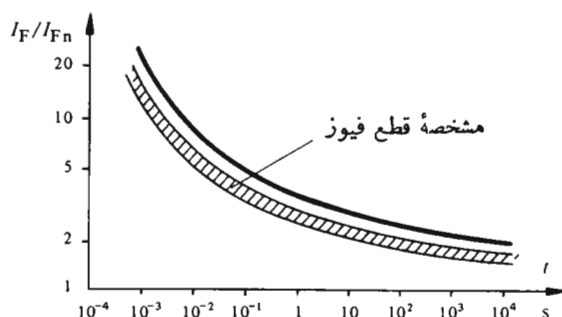
«مشخصه قطع» فیوزی (گداز پذیری) که بتواند حفاظت عنصر یکسو کننده را در برابر هر

* منظور از اضافه جریان، جریانی است بیشتر از جریان اسمی عنصر یکسو کننده که ممکن است از آن عبور نماید. (مترجم)



شکل ۳-۱۴ مشخصه حد اضافه بار برای عنصر یکسو کننده.

اضافه جریان احتمالی تضمین کند، باید مطابق شکل ۳-۱۵، با مشخصه حد اضافه بار عنصر یکسو کننده سازگار باشد. ولسی تهیه و ساخت فیوز (گدازپذیر) با چنین مشخصه قطعی، بسیار دشوار است و خیلی گران تمام می شود.



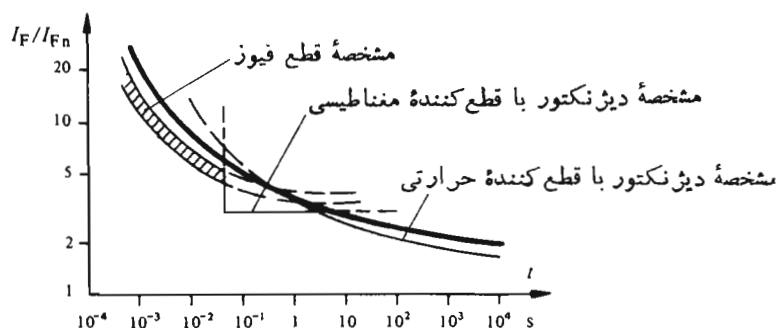
شکل ۳-۱۵ حفاظت به وسیله فیوز (گدازپذیر) - انطباق کامل بین فیوز (گدازپذیر) و عنصر یکسو کننده.

۳-۵-۳ حفاظت به وسیله فیوز (گدازپذیر) و دیژنکتور (گشاینده) سریع

معمولاً در حفاظت عناصر یکسو کننده، از ترکیب فیوز (گدازپذیر) با دیژنکتور (گشاینده) سریع استفاده می شود. مشخصه های مربوط در شکل ۳-۱۶ نشان داده شده اند. حفاظت عنصر فقط در اضافه جریانهای خیلی بالا به توسط فیوز (گدازپذیر) انجام می پذیرد که قطع جریان را به طور خیلی سریع تضمین می کند.

در اضافه جریانهای متوسط و برای زمانهای قطع بیشتر از حدود ۵۵۰۰۰ ثانیه، از

دیژنکتور (گشاینده) با قطع کننده مغناطیسی استفاده می‌شود. در اضافه جریان‌هایی که جریان بین ۱ تا ۵ برابر I_{Fn} است، عمل حفاظت به وسیله دیژنکتور (گشاینده) با قطع کننده حرارتی صورت می‌گیرد.



شکل ۳-۱۶ حفاظت به وسیله فیوز و دیژنکتور، انطباق مرحله‌ای بین فیوز، دیژنکتور و عنصر یکسو کننده.

فیوزها مستقیماً متوالی با عنصر یکسو کننده بسته می‌شوند، در حالی که دیژنکتور (گشاینده)‌های سریع در مدار بار مبدل ایستا به کار می‌روند. قطع جریان در عنصر یکسو کننده، همواره با اضافه فشار الکتریکی همراه است. قطع جریان به وسیله فیوز (گذازدن) یا دیژنکتور (گشاینده) باید به اندازه کافی سریع باشد تا عنصر در مقابل اضافه جریان حفاظت شود. ولی سرعت آن نباید به اندازه‌ای باشد که اضافه فشارهای الکتریکی ایجاد شده به عنصر یکسو کننده آسیب برسانند (به بند ۳-۶ مراجعه شود).

۳-۶ حفاظت در مقابل اضافه فشار الکتریکی

۳-۶-۱ علت‌های اضافه فشار الکتریکی

عناصر یکسو کننده در برابر «اضافه فشارهای الکتریکی»^{*}، که ممکن است در حالت قطع عنصر، بین آن‌د و کاتد ظاهر شوند، نیز بسیار حساس‌اند. بنابراین، حفاظت عناصر یکسو-

* اضافه فشار الکتریکی عبارت است از فشار الکتریکی بیشتر از فشارهای الکتریکی پیش-بینی شده برای عنصر یکسو کننده. (مترجم)

کننده در مقابل این اضافه فشارهای الکتریکی الزامی است.
اضافه فشار الکتریکی اساساً دو منشأ دارد:

– اضافه فشار الکتریکی داخلی ناشی از انباشته شدن ناقله‌های بار الکتریکی^۱ در عنصر یکسو کننده.

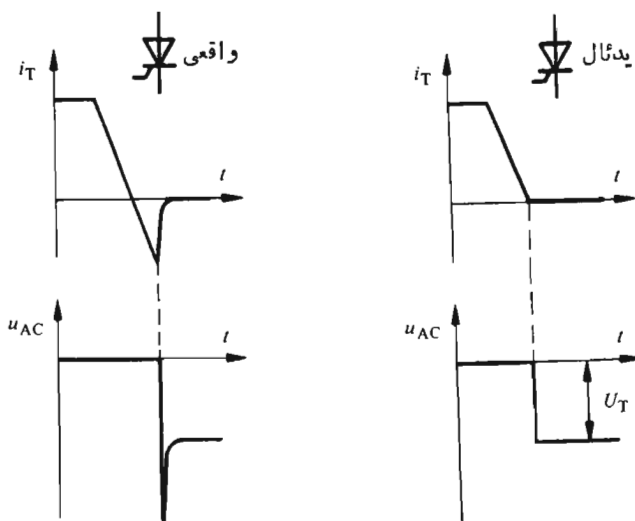
– اضافه فشار الکتریکی خارجی ناشی از پدیده‌های جوی یا قطع و وصل (مخصوصاً قطع و وصل ترانسفورماتورها در حالت بی باری و از جمله ترانسفورماتور تغذیه کننده مبدل ایستا).

برای حفاظت عناصر یکسو کننده، در مقابل اضافه فشارهای الکتریکی، اغلب از مدارهای RC استفاده می‌شود. اخیراً نیمه هادی‌هایی نیز ساخته شده‌اند که می‌توانند به عنوان محدود کننده فشار الکتریکی به کار روند.

۳-۶-۲ حفاظت به وسیله مدارهای RC در مقابل اضافه فشارهای الکتریکی داخلی

پدیده‌ای که هنگام قطع جریان در عنصر یکسو کننده اتفاق می‌افتد به توسط شکل‌های ۱۷-۳ تا ۱۹-۳ نشان داده شده است.

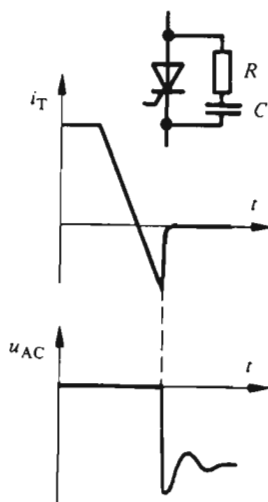
در عنصر یکسو کننده ایدئال، جریان i_T در موقع عبور از صفر، قطع می‌شود و فشار الکتریکی بین آنند و کاتد (u_{AC}) به مقدار منفی U_T جهش پیدا می‌کند (شکل ۱۷-۳).



شکل ۱۷-۳ جریان i_T و فشار الکتریکی u_{AC} هنگام قطع در عنصر یکسو کننده ایدئال.
شکل ۱۸-۳ جریان i_T و فشار الکتریکی u_{AC} هنگام قطع در عنصر یکسو کننده واقعی.

ولی، به لحاظ انباشته شدن ناقله‌های بار الکتریکی، جریان عنصر یکسو کننده واقعی نمی‌تواند به طور لحظه‌ای قطع شود. چنانکه شکل ۳-۱۸ نشان می‌دهد، جریان پس از گذشتن از صفر در فاصله زمانی بسیار کوتاهی منفی می‌شود و سپس سرعت به صفر برمی‌گردد (بدین VII ۳-۶ مراجعه شود). این تغییر سریع جریان، فشار الکتریکی خیلی بالایی (در زمانی خیلی کوتاه) در القاگرهای خطوط ورودی القای می‌کند. در نتیجه بین آند و کاتد عنصر یکسو کننده، اضافه فشارهای الکتریکی خیلی بالایی پدید می‌آیند که ممکن است باعث خرابی عنصر یکسو کننده بشوند.

به وسیله یک مدار RC موازی با عنصر یکسو کننده، اضافه فشارهای حاصل را می‌توان به میزان قابل توجهی کاهش داد (شکل ۳-۱۹). بدین ترتیب دیگر خطری از طرف اضافه فشار الکتریکی متوجه عنصر یکسو کننده نخواهد بود.



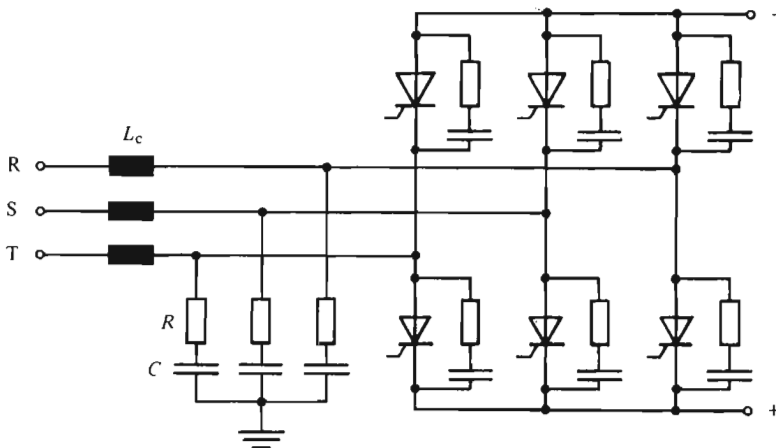
شکل ۳-۱۹ جریان i_T و فشار الکتریکی u_{AC} هنگام قطع در عنصر یکسو کننده واقعی با مدار حفاظتی RC موازی.

این مدار RC باعث محدود شدن سرعت افزایش فشار الکتریکی (du/dt) در دوسر عنصر یکسو کننده نیز می‌شود. در واقع، اگر در تیرستور du/dt مثبت و خیلی زیاد و فشار الکتریکی بین آند و کاتد مثبت باشد، یک جریان خازنی بین آند و چکاننده باعث روشن شدن آن می‌شود. این روشن شدن که موضعی است و در سراسر پیوند نیمه هادی نشر نمی‌یابد به احتمال زیاد تیرستور را خراب می‌کند.



۳-۶-۳ حفاظت به وسیله مدارهای RC در مقابل اضافه فشارهای الکتریکی خارجی

برای حفاظت در مقابل اضافه فشارهای الکتریکی خارجی، یعنی ناشی از شبکه تغذیه، باید بین هر فاز و زمین یک مدار RC قرار داده شود. شکل ۳-۲۵، این مدارهای RC را برای یک مبدل جریان سه فازه نشان می‌دهد. ظرفیت مدار RC را باید چنان انتخاب کرد که فرکانس تشدید برای مدار نوسانی متشکل از L_c و C در حدود ۱۰۰۰ هرتز بشود. این شکل، مدارهای RC موازی با عناصر یکسو کننده را که نقش آنها در بند پیش بیان شد نیز نشان می‌دهد.



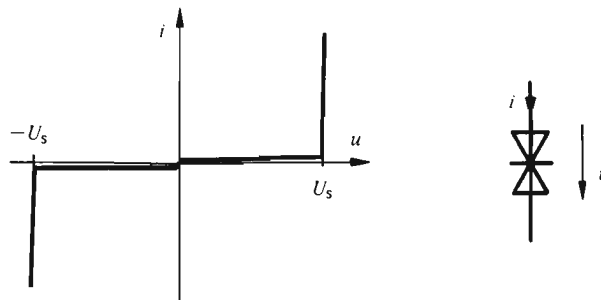
شکل ۳-۲۵ حفاظت در مقابل اضافه فشارهای الکتریکی خارجی با مدار RC در ورودی مبدل جریان.

۳-۶-۳ حفاظت به وسیله نیمه هادیها در مقابل اضافه فشارهای الکتریکی

حفاظت عناصر یکسو کننده، در مقابل اضافه فشارهای الکتریکی داخلی و خارجی، به وسیله نیمه هادیهایی که اخیراً توسعه یافته‌اند نیز امکان پذیر است. این نیمه هادیها که از اکسید فلزی هستند «وارستور»^۱ نامیده می‌شوند. نشانه و مشخصه وارستورها را شکل ۳-۲۱ نمایش می‌دهد.

برای فشارهای الکتریکی u کمتر از فشار الکتریکی آستانه U_s ، جریان i خیلی کوچک (نزدیک به جریان حالت قطع عنصر یکسو کننده) است. به محض اینکه فشار الکتریکی u از فشار الکتریکی آستانه U_s تجاوز کند، جریان به شدت افزایش می‌یابد. مشخصه

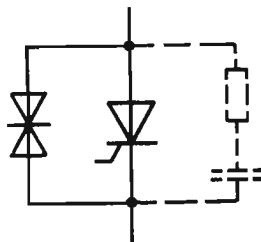
1) varistor



شکل ۳-۲۱ نشانه و مشخصه وارستور.

وارستور برای فشارهای مثبت و منفی قرینه است. کار وارستور مشابه کار دو دیود زنری^۱ است که به طور معکوس با هم متوالی شده باشند. ولی فشار الکتریکی آستانه U_s در وارستورها بمراتب بالاتر از دیودهای زنر است و بسته به نوع وارستور تا چند صد ولت می‌رسد.

شکل ۳-۲۲، حفاظت یک عنصر یکسوکننده را به توسط یک وارستور موازی با آن نشان می‌دهد. فشار الکتریکی آستانه U_s باید کمی کمتر از ماکزیمم (بیشینه) فشار الکتریکی مستقیم یا معکوس غیر تکراری عنصر یکسوکننده باشد. بدین ترتیب اضافه فشارهای ظاهر شده در دوسر عنصر یکسوکننده، دقیقاً، به مقدار U_s ای محدود می‌شوند که از مقدار خطرناک برای آن کمترند. وارستور همچنین می‌تواند اضافه فشارهای تناوبی را نیز تحمل نماید. در این صورت باید برایش سیستم خنک‌کننده مناسبی پیش‌بینی کرد.



شکل ۳-۲۲ حفاظت عنصر یکسوکننده به وسیله وارستور و در صورت لزوم به وسیله مدار RC.

در اغلب موارد همراه با وارستور از مدار RC نیز استفاده می‌شود. در این حالت،

1) zener

مدار RC چنانکه در بند ۳-۶-۲ بیان شد، محدود کردن du/dt را عهده‌دار خواهد بود.

۲-۳ جزئیات مکمل

عناصر یکسوکننده، برای کارکرد مطلوب خود، احتیاج به جزءهای کمکی مانند تابشگر، فیوز (گدازپذیر) و مدارهای RC دارند. تیرستورها علاوه بر آن به ترانسفورماتور تسپ برای فرمان چکاننده نیز نیاز دارند. همه این جزءها باید با مشخصه‌های عنصر یکسوکننده هماهنگ باشند.

معمولاً سازندگان، مدولهای تکمیل‌شده‌ای عرضه می‌کنند، که در آنها تمامی جزءهای کمکی نامبرده همراه عنصر یکسوکننده در روی یک شاسی سوار شده‌اند. این مدولها دارای اتصالات الکتریکی مناسبی هستند تا بتوانند جریانهای نسبتاً زیادی را عبور دهند. برای جریانهای خیلی زیاد، این اتصالات به کمک پیچ و مهره انجام می‌شوند.

ساخت مدولهای ایستای نرمالیزه به کمک این مدولهای استاندارد امکان‌پذیر خواهد بود. برای این منظور، مدولها در راکها^۱ یا قفسه‌های خاصی نصب و یا پیچ می‌شوند. معمولاً این راکها و قفسه‌ها مجهز به پنکه هستند که می‌تواند عناصر یکسوکننده را خنک سازد. هوا از طریق کانالهایی به طرف تابشگرها هدایت می‌شود. قدرت پنکه‌ها باید برای تضمین سرعت هوایی که در محاسبه حرارتی (به بند ۳-۳ مراجعه شود) تعیین شده، کافی باشد.

اتصالات الکتریکی مدولها باید با دقت انجام گیرد تا از به وجود آمدن حلقه‌هایی که ممکن است باعث القای فشارهای الکتریکی پارازیت در مدارهای فرمان بشوند، جلوگیری شود. در مواردی که دویا چند عنصر یکسوکننده موازی‌اند، باید دقت شود که کلیه اتصالات الکتریکی طولهای مساوی و بنابراین مقاومتهای اهمی یکسان داشته باشند. اتصالات الکتریکی ترانسفورماتورهای تپ باید تاییده یا محافظت شده باشند، تا از به وجود آمدن تپهای پارازیت که می‌توانند باعث روشن شدن بی‌موقع تیرستورها بشوند جلوگیری به عمل آید.

1) rack

فصل چهارم

تغییر دهنده (برشگر) های جریان متناوب

۱-۴ مقدمه

۱-۱-۴ کلیات

ویژگی تغییر دهنده (برشگر) های جریان متناوب در کار بدون کموتاسیون آنهاست. جریان بار همان جریان عنصر یکسو کننده فرمان پذیر است. فشار الکتریکی اعمال شده متناوب است و جریان در بار و عنصر یکسو کننده فرمان پذیر به تناوب صفر می شود (به بند ۲-۲ مراجعه شود).

چنانکه در شکل ۱۳-۲ بیان شده است، مبدل های ایستای بدون کموتاسیون علاوه بر تغییر دهنده (برشگر) های جریان متناوب شامل کنتاکتورهای جریان متناوب نیز هستند. مدار این دو نوع مبدل ایستا یکسان اند و فقط از لحاظ فرمان، با یکدیگر تفاوت دارند. کنتاکتور جریان متناوب را می توان حالت خاصی از تغییر دهنده (برشگر) جریان متناوب فرض کرد که پیوسته در حالت قطع یا وصل است. برای حالتی که کنتاکتور به صورت قطع عمل می کند کافی است که تپهای روشن کننده از چکاننده های عناصر یکسو کننده حذف شوند. در اینجا فقط به بررسی چگونگی کار تغییر دهنده های جریان متناوب در حالت پایا می پردازیم. بر حسب بار تغذیه شده، تغییر دهنده ها را می توان تک فازه یا سه فازه ساخت. مدار و طرز کار آنها در بندهای ۲-۴ و ۳-۴ بررسی خواهند شد.

۲-۱-۴ اتصال موازی معکوس تیرستورها- تریاک

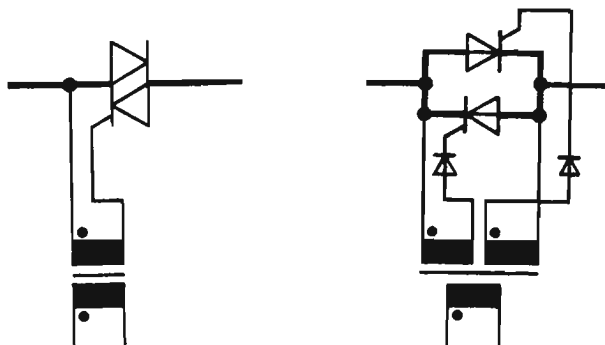
در تغییر دهنده (برشگر) های جریان متناوب، لازم است تا جریان در هر دو جهت عبور کند.



بنابراین باید از اتصال موازی معکوس دو تیرستور [دو تیرستور که به صورت عکس یکدیگر به هم متصل شده‌اند] یا از تریاک استفاده شود. این دو راه حل کارکرد یکسان دارند و تنها از لحاظ فرمان چکاننده متفاوت‌اند.

در «اتصال موازی معکوس» دو تیرستور، مطابق شکل ۴-۱، کاتد یکی از تیرستورها به آند تیرستور دیگر وصل شده است. این ترکیب را اغلب اتصال «سر به ته» نیز می‌نامند. چون تریاکها با قدرت زیاد ساخته نمی‌شوند، اتصال موازی معکوس دو تیرستور بیشتر در مواردی که قدرت نسبتاً زیاد است به کار می‌رود. فرمان اتصال موازی معکوس دو تیرستور اندکی پیچیده‌تر از تریاک است. زیرا در اولی به دو تب روشن کننده و در دومی تنها به یک تب نیاز هست. تپهای روشن کننده دو تیرستور باید از نظر الکتریکی از هم مجزا باشند. لذا استفاده از ترانسفورماتور تپی که دارای دو سیم پیچ مجزا در ثانویه است، اجباری خواهد بود (شکل ۴-۱). دیودهایی که در این شکل نشان داده شده‌اند، تپهای منفی را حذف می‌کنند.

تریاک تنها با یک تب روشن کننده فرمان داده می‌شود (شکل ۴-۲).



شکل ۴-۲ تریاک، با مدار روشن کننده چکاننده.

شکل ۴-۱ اتصال موازی معکوس دو تیرستور با مدار روشن کننده چکاننده‌ها.

۴-۱-۳ کاربردهای تغییردهنده (برشگر)های جریان متناوب

برای تغییر نور لامپهای روشنایی در قدرتهای بین ۱۰۰ W تا ۱۰ kW همچنین برای تنظیم جریان در دستگاههای تک فاز مانند اجاقهای برقی، وسایل گرم کننده الکتریکی و غیره از تغییردهنده (برشگر)های جریان متناوب تک فاز استفاده می‌شود.

در کاربردهای نامبرده، چنانچه قدرت زیاد باشد، می‌توان از تغییردهنده‌های جریان متناوب سه فاز استفاده کرد. بعلاوه تغذیه استاتور (ایستانه) موتورهای آسنکرون، از طریق

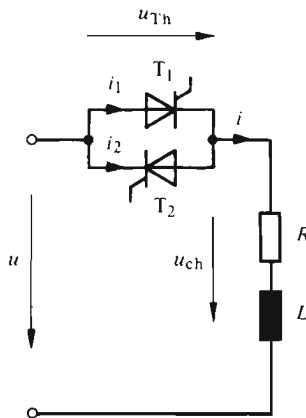
تغییردهنده (برشگر) های جریان متناوب، تغییر سرعت این موتورها را امکان پذیر می سازد.

کاربرد جالب دیگر تغییردهنده (برشگر) های جریان متناوب سه فازه، در تنظیم قدرت رثا کتیو شبکه های الکتریکی، جهت تثبیت فشار الکتریکی شبکه بین حدود قابل قبول است. برای این منظور، شبکه الکتریکی یک تغییردهنده جریان متناوب و دسته خازن ثابتی را به طور موازی تغذیه می کند. بار تغییردهنده، سه فازه و القایی است و می توان قدرت رثا کتیو جذب شده به توسط آن را تنظیم کرد. بدین ترتیب، تنظیم قدرت رثا کتیو کل به طور پیوسته از کارکرد خازنی تا کارکرد القایی ممکن می شود و در نتیجه می توان هنگام تغییرات قدرت رثا کتیو بار (مثلاً در اثر کوره های الکتریکی یا تغذیه ناگهانی آهنرباها) فشار الکتریکی شبکه را بین حدود قابل قبول نگه داشت.

۲-۴ تغییردهنده (برشگر) جریان متناوب تک فازه

۱-۲-۴ مدار

شکل ۳-۴ مدار «تغییردهنده جریان متناوب تک فازه» را نشان می دهد. دو تیرستور T_1 و T_2 با اتصال معکوس (یا یک تریاک)، باری را که معمولاً اهمی و القایی است، تغذیه می کنند. L القاگری کل و R مقاومت کل بار است.

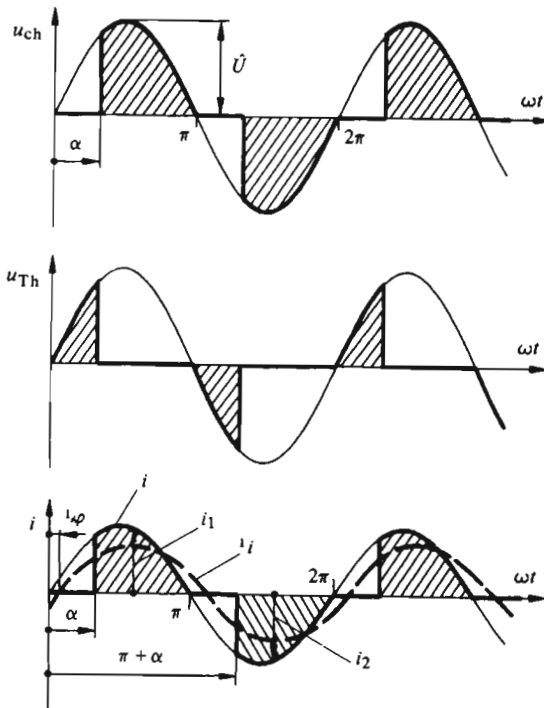


شکل ۳-۴ مدار تغییر دهنده جریان تک فازه.

طرز کار این مدار را برای بارهای اهمی، القایی، و اهمی القایی بررسی خواهیم کرد. در عمل تغییردهنده های جریان، برای تغذیه بارهای خازنی، که در لحظه وصل تیرستورها، جهشهای جریان شدیدی را موجب می شوند، به کار نمی روند.

۴-۳-۴ بار اهمی

روند تغییرات فشار الکتریکی دو سر بار u_{ch} ، فشار الکتریکی دو سر تیرستورها u_{Th} و جریان i که از بار عبور می‌کند، در شکل ۴-۴ نشان داده شده‌اند. چنانچه یکی از تیرستورها هدایت بکند، قسمتی از نیم دوره مثبت یا منفی فشار الکتریکی متناوب تغذیه u در دو سر بار ظاهر می‌شود (فشار الکتریکی u_{ch}). هنگامی که هر دو تیرستور قطع باشند، فشار الکتریکی دو سر بار صفر است و قسمت دیگر فشار الکتریکی متناوب تغذیه در دوسر تیرستورها ظاهر می‌شود (فشار الکتریکی u_{Th}).



شکل ۴-۴ روند تغییرات فشار الکتریکی و جریان در مدار تغییر دهنده (برشگر) جریان متناوب تک فازه با بار اهمی.

لحظه روشن شدن تیرستورها را با «زاویه تأخیر آتش»^۱ α ، که در مورد تغییر دهنده‌های

1) angle de retard d' allumage

جریان متناوب، نسبت به لحظه عبور از صفر فشار الکتریکی تغذیه u اندازه گیری می شود، مشخص می کنند.

پس از روشن شدن تیرستور جریان i عبارت است از

$$i = \frac{\hat{U} \sin \omega t}{R} \quad \begin{matrix} \alpha \leq \omega t \leq \pi \\ \pi + \alpha \leq \omega t \leq 2\pi \end{matrix} \quad (1-4)$$

در این رابطه، \hat{U} ماگزیم مقدار فشار الکتریکی تغذیه و ω ضربان ($2\pi f$) آن است. جریان i را که از تکه های سینوسی تشکیل شده است، بتناوب تیرستورهای T_1 و T_2 (جریانهای i_1 و i_2) تأمین می کنند. در لحظه $\omega t = \pi$ جریان i_1 صفر و تیرستور T_1 قطع می شود. تیرستور T_2 هم در لحظه $\omega t = \pi + \alpha$ روشن و در لحظه $\omega t = 2\pi$ قطع می شود. در فاصله زمانی α/ω ، فشار الکتریکی دو سر تیرستوری که تازه خاموش شده، منفی است و در نتیجه حالت قطع مطمئن آن تضمین می شود.

جریان الکتریکی i که از بار می گذرد کاملاً سینوسی نیست، ولی می توان آن را به یک «موج اصلی» (هارمونیک اول) و یک رشته هارمونیکهای از درجه بالاتر تجزیه کرد. ملاحظه می شود که موج اصلی i_1 به اندازه زاویه φ نسبت به فشار الکتریکی تغذیه u اختلاف فاز دارد. بنابراین، حتی برای بار اهمی خالص، شبکه تغذیه کننده باید مقداری قدرت رثاکتیو بدهد. چنانکه در بند ۲-۴-۶ اثبات خواهد شد، اختلاف فاز φ به زاویه تأخیر آتش α بستگی دارد.

کنتاکتور جریان تک فازه باید در هر نیم دوره، با زاویه تأخیر آتش $\alpha = 0$ ، روشن بشود. در این صورت جریان i سینوسی کامل و با فشار الکتریکی تغذیه همفاز است.

۲-۴-۳ بار القایی

روند تغییرات فشار الکتریکی دو سر بار u_{ch} و فشار الکتریکی دو سر تیرستورها u_{Th} و همچنین جریان i برای بار القایی خالص در شکل ۵-۴ نشان داده شده اند. در این حالت نیز قسمتی از فشار الکتریکی تغذیه u در دو سر بار ظاهر می شود که بستگی به زاویه تأخیر آتش α دارد.

پس از روشن شدن تیرستور، جریان i در معادله دیفرانسیل زیر صدق می کند

$$L \frac{di}{dt} = \hat{U} \sin \omega t \quad (2-4)$$

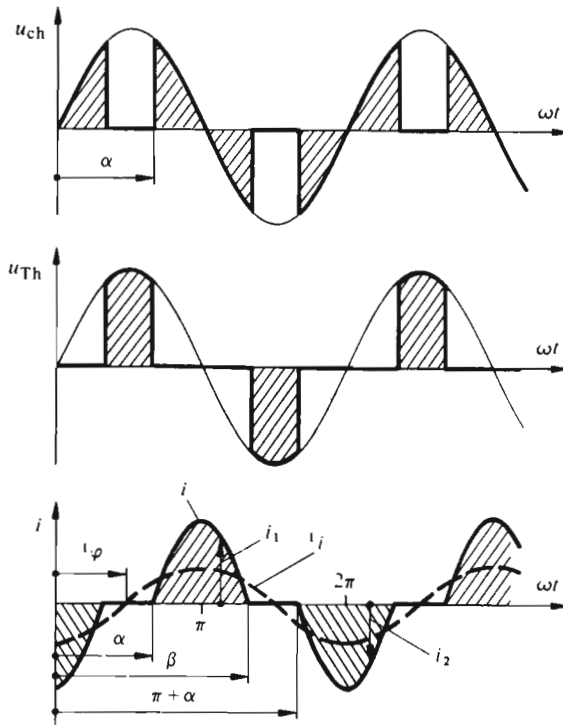
پس از انتگرال گیری داریم

$$i = -\frac{\hat{U}}{\omega L} \cos \omega t + I_0 \quad (3-4)$$



ثابت انتگرال گیری I_o را می توان از این شرط که در لحظه روشن شدن تیرستور $(\omega t = \alpha) T_1$ ، جریان i صفر است، به دست آورد

$$I_o = \frac{\hat{U}}{\omega L} \cos \alpha \quad (4-4)$$



شکل ۴-۵ روند تغییرات جریان و فشار الکتریکی در مدار تغییر دهنده جریان تک فازه با بار القایی خالص.

بالاخره برای جریان i رابطه زیر به دست می آید

$$i = \frac{\hat{U}}{\omega L} (\cos \alpha - \cos \omega t) \quad (5-4)$$

در $\omega t = \beta$ جریان i صفر و تیرستور T_1 قطع می شود (به شکل ۴-۵ مراجعه شود).

با قرار دادن $i = 0$ و $\omega t = \beta$ در رابطه (۵-۴) می توان نوشت $\cos \beta = \cos \alpha$.
کنار گذاشتن جواب $\beta = \alpha$ ، جواب قابل قبول β عبارت خواهد بود از:

$$\beta = 2\pi - \alpha \quad (۶-۴)$$

در نیم دوره منفی، تیرستور T_p را در لحظه $\omega t = \pi + \alpha$ روشن می کنند. چنانچه در رابطه (۵-۴) $\pi + \alpha$ جایگزین α شود، این رابطه برای $\omega t \geq \pi + \alpha$ صادق خواهد بود. تیرستور T_p در لحظه $\omega t = 3\pi - \alpha$ خاموش می شود.

برای اینکه مدار با بار القایی خالص بتواند درست کار کند، باید $\beta \leq \pi + \alpha$ باشد. برای برقراری این شرط، لازم است تا زاویه تأخیر آتش α بین دو مقدار $\pi/2$ و π باشد: $\pi/2 \leq \alpha \leq \pi$. در شرایط $0 < \alpha < \pi/2$ ، چنانکه در بند بعد توضیح داده می شود، تیرستور T_p روشن نخواهد شد.

جریان i بتناوب از قله های سینوسی و قسمتهای صفر تشکیل می شود. این جریان سینوسی کامل نیست و موج اصلی آن i همواره به اندازه 90° نسبت به فشار الکتریکی تغذیه u اختلاف فاز دارد. این اختلاف فاز مستقل از زاویه α است و قدرت، رثاکیو خالص است.

برای اینکه مدار به صورت یک کنتاکتور جریان تک فازه کار کند، باید تیرستورها در هر نیم دوره و با $\alpha = 90^\circ$ روشن شوند. در این حالت جریان i سینوسی کامل خواهد بود.

۴-۲-۴ بار اهمی و القایی

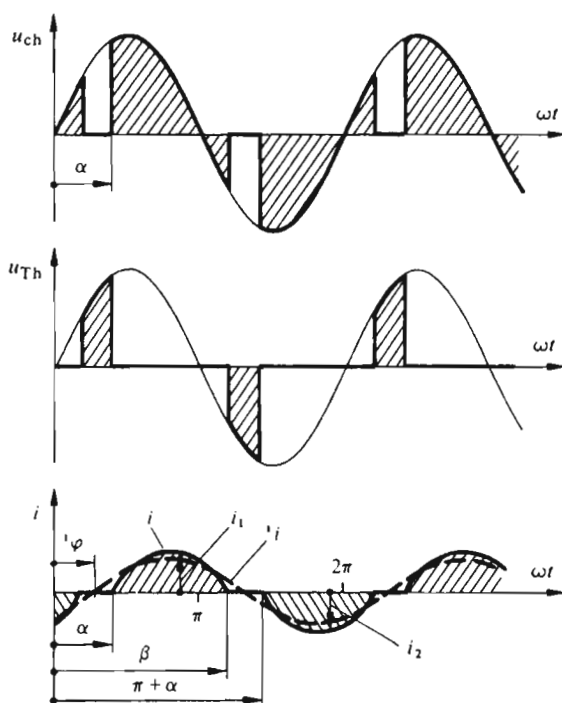
در حالت کلی که بار از القاگر و مقاومت تشکیل می شود (بار اهمی و القایی)، روند تغییرات فشارهای الکتریکی u_{ch} و u_{Th} و جریان i مطابق شکل ۴-۶ است.

در موقع روشن شدن یکی از تیرستورها، معادله دیفرانسیل زیر برقرار است

$$L \frac{di}{dt} + Ri = \hat{U} \sin \omega t \quad (۷-۴)$$

پاسخ این معادله از «مؤلفه پایا» (جواب پایا) و «مؤلفه گذرا» (جواب گذرا) تشکیل می شود. مؤلفه پایای جریان می تواند به راحتی به دست آید:

$$i_p = \frac{\hat{U}}{\sqrt{R^2 + (\omega L)^2}} \sin (\omega t - \psi) \quad (۸-۴)$$



شکل ۶-۴ روند تغییرات فشارهای الکتریکی و جریان درممدار تغییردهنده (برشگر) جریان تک فازه با بار اهمی و القایی.

در این رابطه، ψ اختلاف فاز حاصل از بار اهمی و القایی برای هر پدیده متناوب پایاست

$$\psi = \arctan \frac{\omega L}{R} \quad (۹-۴)$$

مؤلفه گذرای جریان i_t ، با عبارت نمایی نزولی بدصورت زیر نشان داده می شود

$$i_t = I_{t0} e^{-t/T} \quad (۱۰-۴)$$

در این رابطه، T ثابت زمانی بار اهمی و القایی است

$$T = L/R \quad (۱۱-۴)$$

ضریب I_{t0} را می توان با در نظر گرفتن این شرط به دست آورد که در لحظه روشن شدن تیرستور T_4 یعنی در $\omega t = \alpha$ ، جریان کل $i = i_p + i_t$ باید برابر صفر باشد در نتیجه داریم

$$I_{t0} = \frac{-\hat{U}}{\sqrt{R^2 + (\omega L)^2}} \sin(\alpha - \psi) e^{\alpha R / \omega L} \quad (12-4)$$

با استفاده از روابط (۸-۴) و (۱۰-۴) و (۱۲-۴) جریان کل i به دست می آید

$$i = \frac{\hat{U}}{\sqrt{R^2 + (\omega L)^2}} [\sin(\omega t - \psi) - e^{-(\omega t - \alpha)R / \omega L} \sin(\alpha - \psi)] \quad (13-4)$$

این رابطه تا لحظه ای که جریان دوباره صفر می شود، یعنی تا $\omega t = \beta$ معتبر است (به شکل ۴-۶ مراجعه شود). برای به دست آوردن زاویه β ، کافی است تا در رابطه (۱۳-۴)، $i = 0$ و $\omega t = \beta$ قرار داده شود. در نتیجه داریم

$$\sin(\beta - \psi) - e^{-(\beta - \alpha)R / \omega L} \sin(\alpha - \psi) = 0 \quad (14-4)$$

تیرستور T_4 در لحظه $\omega t = \pi + \alpha$ روشن می شود و جریان، برای $\omega t \geq \pi + \alpha$ با قرار دادن $\pi + \alpha$ به جای α ، در رابطه (۱۳-۴)، به دست می آید که جریانی است منفی. خاموش شدن تیرستور T_4 باید قبل از اثر تب روشن کننده تیرستور T_4 (در لحظه $\omega t = \pi + \alpha$) صورت پذیرد، وگرنه تیرستور T_4 روشن نخواهد شد. برای برقراری این شرط

$$\beta \leq \pi + \alpha \quad (15-4)$$

باید

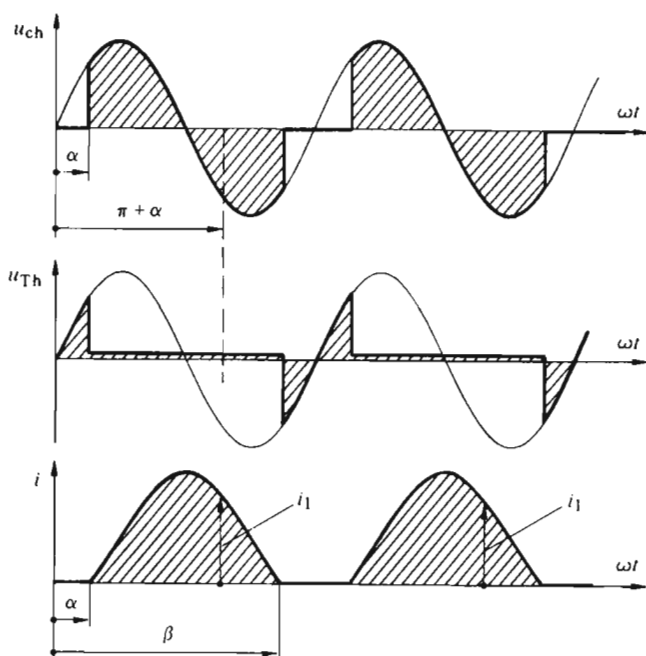
$$\alpha \geq \psi \quad (16-4)$$

در حالت عکس یعنی برای $\psi < \alpha$ ، بنا به رابطه (۱۴-۴) می توان نوشت $\sin(\beta - \psi) < 0$ یا $\beta - \psi \geq \pi$ و بنابراین: $\beta + \alpha - \psi \geq \pi + \alpha$ یا $\beta > \pi + \alpha$. این نتیجه با شرط (۱۵-۴) در تضاد است. بنابراین زاویه تأخیر آتش α باید مساوی یا بزرگتر از زاویه اختلاف فاز ψ بار برای رژیم سینوسی باشد.

چنانچه شرط (۱۶-۴) برقرار نباشد، پدیده ای به وجود می آید که در شکل ۴-۷ نشان داده شده است. در $\omega t = \alpha$ تیرستور T_4 روشن می شود و جریان i_1 از بار می گذرد.



در لحظه $\omega t = \pi + \alpha$ یک تپ بر چکاننده تیریس‌تور T_p اعمال می‌شود، ولی از آنجا که فشار الکتریکی بین آند و کاتد این تیریس‌تور هنوز منفی است (به اندازه فشار الکتریکی مستقیم تیریس‌تور T_p)، این تیریس‌تور نمی‌تواند روشن شود. جریان i_p در لحظه $\omega t = \beta > \pi + \alpha$ ، صفر و تیریس‌تور T_p خاموش می‌شود و چون پس از این لحظه (تا روشن شدن مجدد تیریس‌تور T_p) تپ روشن‌کننده‌ای بر تیریس‌تور T_p اثر نمی‌کند، این تیریس‌تور همواره خاموش می‌ماند. این پدیده در دوره‌های بعدی نیز تکرار می‌شود و بدین ترتیب فقط تیریس‌تور T_p هدایت می‌کند و از بار، جریانی یکسو شده (منقطع و در یک جهت) می‌گذرد. این جریان یکسوسده که به توسط بار از شبکه تغذیه و از طریق مبدل ایستاجذب می‌شود، مؤلفه دایمی دارد که مطلوب شبکه متناوب نیست.



شکل ۴-۷ روند تغییرات فشارهای الکتریکی و جریان در مدار تغییردهنده جریان تک‌فاز برای بار اهمی و القایی در حالتی که شرط $\alpha \geq \psi$ برقرار نیست.

اختلاف فاز بین موج اصلی جریان i و فشار الکتریکی متناوب u که با ϕ نشان داده می‌شود (به شکل ۴-۶ مراجعه شود)، به زاویه تأخیر آتش α و پارامتر ψ بار بستگی دارد.

در حالتی که این مبدل ایستا به صورت کنتاکتور جریان تک‌فاز کار می‌کند، تیریس‌تورها

باید بتناوب و با زاویه تأخیر آتش α برابر با ψ روشن بشوند. بدین ترتیب جریان سینوسی کامل خواهد بود و چنانکه از رابطه (۱۲-۴) مشخص است (به ازای $\alpha = \psi$)، حتی برای شروع کار (اولین دوره) نیز، مؤلفه گذرا وجود ندارد.

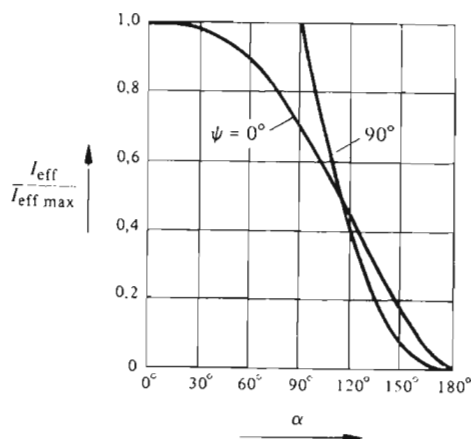
۵-۳-۴ مشخصه های فرمان

برای کارکرد تغییر دهنده جریان تک فازه، بهتر است رابطه بین جریان مؤثر جاری در بار I_{eff} و زاویه تأخیر آتش α مشخص باشد. برای بار اهمی خالص، از رابطه (۱-۴) نتیجه می شود

$$I_{eff} = \sqrt{\frac{1}{\pi} \int_{\alpha}^{\pi} i^2 d\omega t} = \frac{\hat{U}}{R} \sqrt{\frac{1}{\pi} \int_{\alpha}^{\pi} \sin^2 \omega t d\omega t} =$$

$$= \frac{\hat{U}}{R} \sqrt{\frac{2(\pi - \alpha) + \sin 2\alpha}{4\pi}} = \frac{\hat{U}}{\sqrt{2}R} \sqrt{\frac{\pi - \alpha + (\sin 2\alpha)/2}{\pi}} \quad (۱۷-۴)$$

تغییرات نسبت I_{eff} به ماگزیم مقدار آن برحسب زاویه α ، که می تواند از 0° تا 180° تغییر کند، در شکل ۸-۴ نشان داده شده است (منحنی نظیر $\psi = 0^\circ$ برای حالت بار اهمی خالص).



شکل ۸-۴ مشخصه های فرمان تغییر دهنده جریان تک فازه برای بار اهمی ($\psi = 0^\circ$) و بار القایی ($\psi = 90^\circ$).

در این حالت (بار اهمی خالص) جریان I_{eff} به ازای $\alpha = 0^\circ$ ماگزیمم و برابر مقدار زیر است

$$I_{effmax} = \frac{\hat{U}}{\sqrt{2}R} \quad (18-4)$$

روند تغییرات جریان i ، در حالت بار القایی خالص را رابطه (۵-۴) مشخص می‌سازد. با توجه به شرایط تقارن، مقدار مؤثر این جریان چنین به دست می‌آید

$$I_{eff} = \sqrt{\frac{1}{\pi} \int_{\alpha}^{2\pi-\alpha} i^2 d\omega t} = \frac{\hat{U}}{\omega L} \sqrt{\frac{1}{\pi} \int_{\alpha}^{2\pi-\alpha} (\cos \alpha - \cos \omega t)^2 d\omega t} =$$

$$= \frac{\hat{U}}{\sqrt{2}\omega L} \sqrt{\frac{2(\pi-\alpha)(2+\cos 2\alpha) + 3\sin 2\alpha}{\pi}} \quad (19-4)$$

در این حالت، مقدار ماگزیمم I_{eff} به ازای $\alpha = 90^\circ$ حاصل می‌شود

$$I_{effmax} = \frac{\hat{U}}{\sqrt{2}\omega L} \quad (20-4)$$

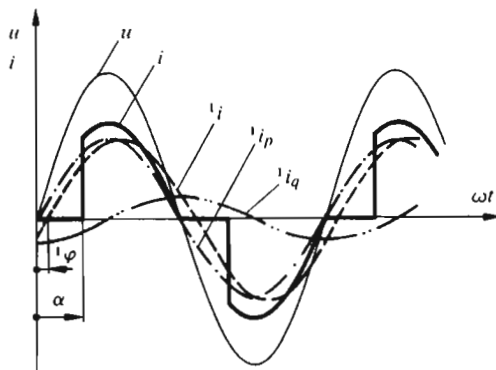
زاویه تأخیر آتش α فقط می‌تواند بین دو مقدار 90° و 180° تغییر کند. تغییرات نسبت I_{eff}/I_{effmax} برحسب زاویه α در شکل ۸-۴ (منحنی نظیر $\psi = 90^\circ$) نشان داده شده است.

برای بار اهمی و القایی، باید روابط بند ۴-۲-۴ را به کار برد که به عبارت جریان مؤثر نسبتاً پیچیده‌ای می‌انجامد و به این علت، در اینجا از بسط آن خودداری می‌شود. چون مقدار مؤثر جریان I_{eff} به زاویه تأخیر آتش α یعنی کمیت فرمان تغییردهنده جریان تک‌فاز، بستگی دارد، منحنیهای نشان داده شده در شکل ۸-۴ «مشخصه‌های فرمان» نامیده می‌شوند.

۶-۲-۴ قدرت اکتیو و رئاکتیو

چنانکه در بند ۲-۲-۴ نیز گفته شد، حتی در حالت بار اهمی خالص، شبکه تغذیه باید مقداری قدرت رئاکتیو بدهد. مسئله را در این حالت خاص دقیقتر بررسی خواهیم کرد. روند تغییرات فشار الکتریکی تغذیه u و جریان جاری در بار اهمی خالص i در

شکل ۹-۴ نشان داده شده‌اند. موج اصلی جریان i را می‌توان به دو مؤلفه i_p و i_q تجزیه کرد. i_p همفاز با فشار الکتریکی تغذیه است و i_q به اندازه 90° با آن اختلاف فاز دارد.



شکل ۹-۴ فشار الکتریکی تغذیه u ، جریان بار i و موجهای اصلی آن: i_p ، i_q همفاز با فشار الکتریکی و i_q با اختلاف فاز 90° نسبت به فشار الکتریکی، برای بار اهمی خالص.

با استفاده از بسط به رشته فوریه، دامنه مؤلفه جریان همفاز با فشار الکتریکی و تعیین کننده قدرت اکتیو، چنین به دست می‌آید

$$\begin{aligned} I_p &= \frac{2}{\pi} \int_0^{\pi} i \sin \omega t \, d\omega t = \frac{2}{\pi} \frac{\hat{U}}{R} \int_{\alpha}^{\pi} \sin^2 \omega t \, d\omega t = \\ &= \frac{\hat{U}}{R} \frac{\pi - \alpha + (\sin 2\alpha)/2}{\pi} \end{aligned} \quad (21-4)$$

دامنه مؤلفه دیگر که 90° با فشار الکتریکی تغذیه اختلاف فاز دارد و تعیین کننده قدرت رثاکتیو است، عبارت است از

$$\begin{aligned} I_q &= \frac{2}{\pi} \int_0^{\pi} i \cos \omega t \, d\omega t = \frac{2}{\pi} \frac{\hat{U}}{R} \int_{\alpha}^{\pi} \sin \omega t \cos \omega t \, d\omega t = \\ &= - \frac{\hat{U}}{R} \frac{1 - \cos 2\alpha}{2\pi} \end{aligned} \quad (22-4)$$

قدرت اکتیو داده شده به توسط شبکه تغذیه با استفاده از مؤلفه I_p به دست می‌آید.

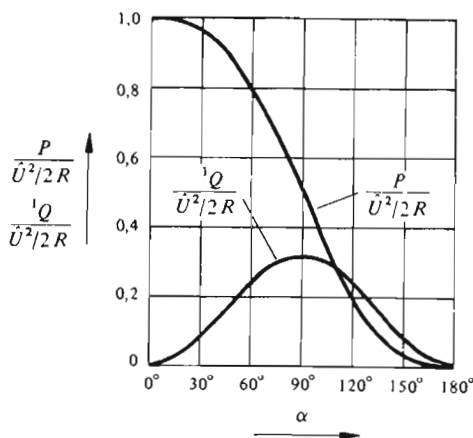
$$P = \frac{\hat{U} \hat{I}_p}{2} = \frac{\hat{U}^2}{2R} \frac{\pi - \alpha + \frac{1}{2} \sin 2\alpha}{\pi} \quad (23-4)$$

که برابر قدرت $I_{eff}^2 R$ از رابطه (۱۷-۴) قرار داده شود) تلف شده در بار اهمی است.

قدرت رثا کتیو موج اصلی (\hat{Q}) با استفاده از مؤلفه \hat{I}_q به دست می آید. قدرت رثا کتیو برای بار القایی مثبت فرض می شود (قدرت رثا کتیو داده شده از شبکه تغذیه به مصرف کننده القایی). بنابراین

$$\hat{Q} = -\frac{\hat{U} \hat{I}_q}{2} = \frac{\hat{U}^2}{2R} \frac{1 - \cos 2\alpha}{2\pi} \quad (24-4)$$

تغییرات نسبت قدرت اکتیو P و قدرت رثا کتیو \hat{Q} ، به قدرت ماگزیم $\hat{U}^2/2R$ ، برحسب زاویه تأخیر آتش α ، در شکل ۱۰-۴ نشان داده شده اند. ملاحظه می شود که قدرت اکتیو برای $\alpha = 0^\circ$ ماگزیم (بیشینه) و برای $\alpha = 180^\circ$ صفر است. قدرت رثا کتیو موج اصلی برای $\alpha = 0^\circ$ و $\alpha = 180^\circ$ صفر است و برای $\alpha = 90^\circ$ ماگزیم می شود. مقدار ماگزیم (بیشینه) آن $1/\pi = 0.318$ برابر قدرت ماگزیم $\hat{U}^2/2R$ است.



شکل ۱۰-۴ قدرت اکتیو P و قدرت رثا کتیو موج اصلی \hat{Q} برای بار اهمی خالص.

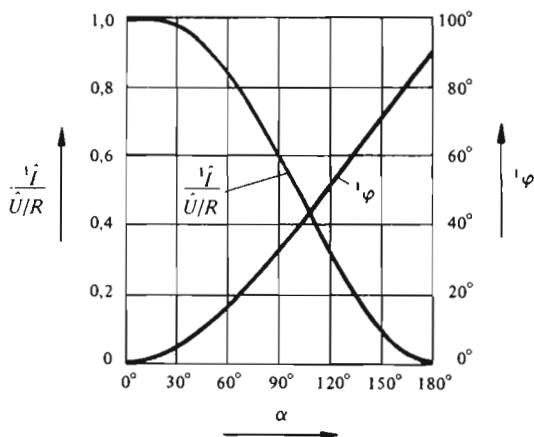
دامنه موج اصلی جریان با استفاده از روابط (۲۱-۴) و (۲۲-۴) به دست می آید.

$$\begin{aligned} \hat{I} &= \sqrt{\hat{I}_p^2 + \hat{I}_q^2} \\ &= \frac{\hat{U}}{R} \frac{1}{\pi} \sqrt{\left(\pi - \alpha + \frac{1}{\gamma} \sin 2\alpha\right)^2 + \frac{1}{\gamma^2} (1 - \cos 2\alpha)^2} \quad (25-4) \end{aligned}$$

و اختلاف فاز موج اصلی نسبت به فشار الکتریکی تغذیه عبارت است از

$$\varphi = -\arctan \frac{\hat{I}_q}{\hat{I}_p} = \arctan \frac{\frac{1}{\gamma} (1 - \cos 2\alpha)}{\pi - \alpha + \frac{1}{\gamma} \sin 2\alpha} \quad (26-4)$$

تغییرات نسبت دامنه موج اصلی به مقدار ماکزیمم \hat{U}/R و همچنین اختلاف فاز φ بر حسب زاویه α در شکل ۱۱-۴ نشان داده شده است.

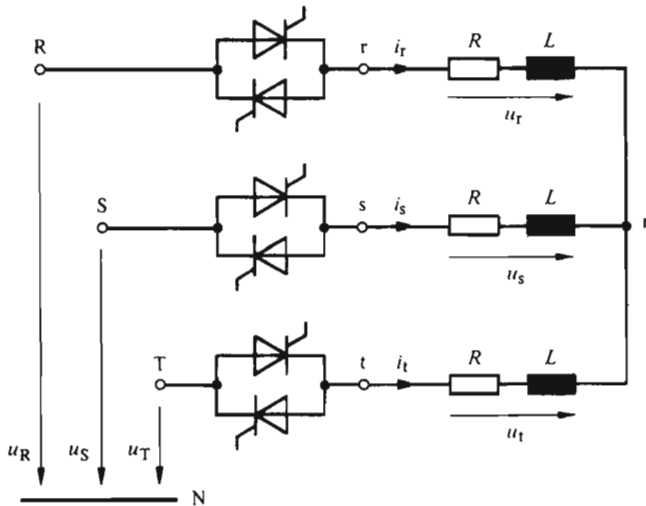


شکل ۱۱-۴ دامنه \hat{I} و اختلاف فاز موج اصلی جریان φ برای بار اهمی خالص.

۳-۴ تغییردهنده (برشگر) جریان سه فازه

۱-۳-۴ مدار

مدار «تغییردهنده جریان سه فازه» در شکل ۱۲-۴ نشان داده شده است. این مدار سه جفت تریستور با اتصال موازی معکوس دارد که با سه بار عموماً اهمی و القایی (L, R)، متوالی بسته شده‌اند. سه بار متعادل در نقطه خنثای n به یکدیگر متصل شده‌اند. نقطه خنثای بار n غیر از نقطه خنثای شبکه N سه فازه تغذیه (T, S, R) است. کار تغییردهنده جریان سه فاز پیچیده‌تر از کار تغییر دهنده جریان تک فازه است. در اینجا چگونگی کار این تغییردهنده را برای بارهای اهمی، القایی، و اهمی القایی بررسی می‌کنیم.



شکل ۱۲-۴ مدار تغییردهنده جریان سه فازه.

در اغلب موارد، مدار به صورت مثلث نیز بسته می‌شود. در این حالت هر دو تریستور موازی معکوس با فازی از بار متوالی می‌شوند و در ضلعی از مثلث قرار می‌گیرند. چون کار این مدار به کار سه تغییردهنده تک فازی شبیه است که به توسط فشارهای الکتریکی مرکب (خطی) تغذیه می‌شوند، نیازی به بررسی بیشتر آن نیست.

۲-۳-۴ بار اهمی

روند تغییرات فشارهای الکتریکی و جریانها، برای بار اهمی خالص، در شکل ۱۳-۴

نشان داده شده است. برای اینکه چگونگی کار روشنتر باشد، در قسمت بالای شکل، مدت زمان هدایت تیرستورهای واقع بین نقاط $S-S$ ، $R-R$ و $T-t$ ، به صورت مستطیل‌هایی (مثبت یا منفی بسته به جهت هدایت) مشخص شده‌اند.

در تغییردهنده جریان سه فاز، زاویه تأخیر آتش α از نقطه عبور از صفر هر فشار الکتریکی ساده اندازه گیری می‌شود. شکل ۴-۱۳ برای حالت $\alpha = 45^\circ$ ترسیم شده است.

در شروع کار، برای اینکه تغییر دهنده بتواند وصل شود، لازم است تپهای روشن-کننده‌ای، به طور همزمان، به تیرستور فاز R (جهت هدایت جریان مثبت) و تیرستور فاز S (جهت هدایت منفی) اعمال شود. چنانچه تپ روشن کننده اضافی به تیرستور فاز S اعمال نشود جریان نخواهد توانست مسیر خود را ببندد.

موقعی که فقط تیرستورهای دوتا از فازها هدایت می‌کنند، فشارهای الکتریکی ساده در سرهای بار اهمی سه فاز، با نصف فشار الکتریکی مرکب مربوط به فازهای در حال هدایت برابرند. چنانچه تیرستورهای هر سه فاز به طور همزمان هادی باشند، فشار الکتریکی ساده در سرهای بار (به شرط متعادل بودن بار) با فشار الکتریکی ساده شبکه برابر خواهد بود. روند تغییرات جریان، همانند روند تغییرات فشار الکتریکی ساده در سرهای بار و به تناسب $1/R$ است.

جریان سینوسی نیست و شکلی نسبتاً پیچیده دارد. برای به دست آوردن روند تغییرات آن فقط می‌توان از توالی تکه‌های سینوسی (با در نظر گرفتن شرایط فازهای دیگر) استفاده کرد.

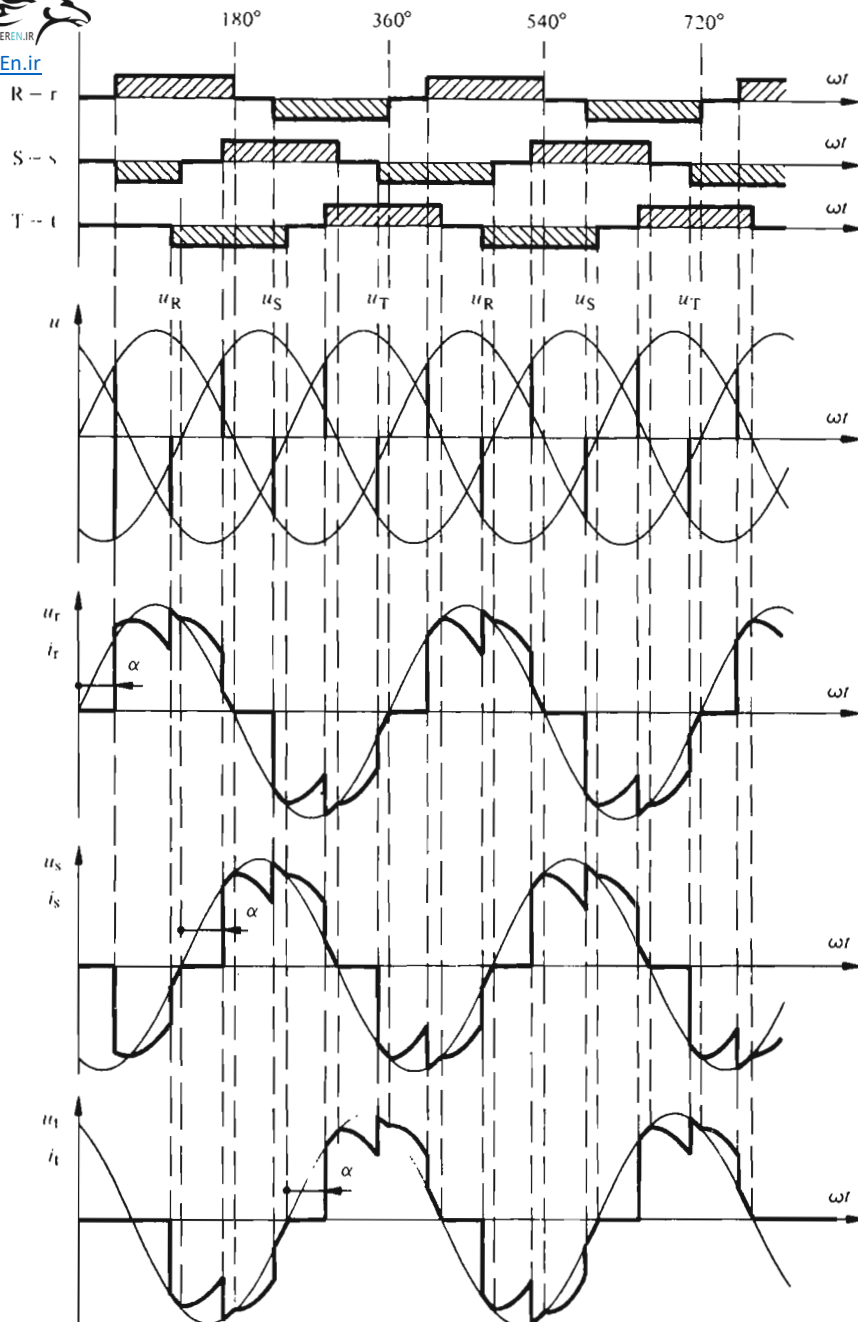
چنانکه در شکل ۴-۱۴ (که برای $\alpha = 105^\circ$ رسم شده است) ملاحظه می‌شود، با افزایش زاویه تأخیر آتش α ، جریان در هر نیم دوره يك حالت انفصال نشان می‌دهد و باید همیشه دو تیرستور همزمان با هم روشن بشوند. در واقع برای $\alpha \geq 90^\circ$ فقط دو تیرستور می‌توانند به طور همزمان در حال هدایت باشند.

از شکل ۴-۱۴ با راحتی می‌توان نتیجه گرفت که برای $\alpha \geq 105^\circ$ ، جریان صفر است. در این محدوده، فشار الکتریکی مرکب دوفازی که تپ روشن کننده دریافت می‌کنند و در نتیجه فشار الکتریکی تیرستورهای مربوط، منفی است و تیرستورها نمی‌توانند روشن بشوند.

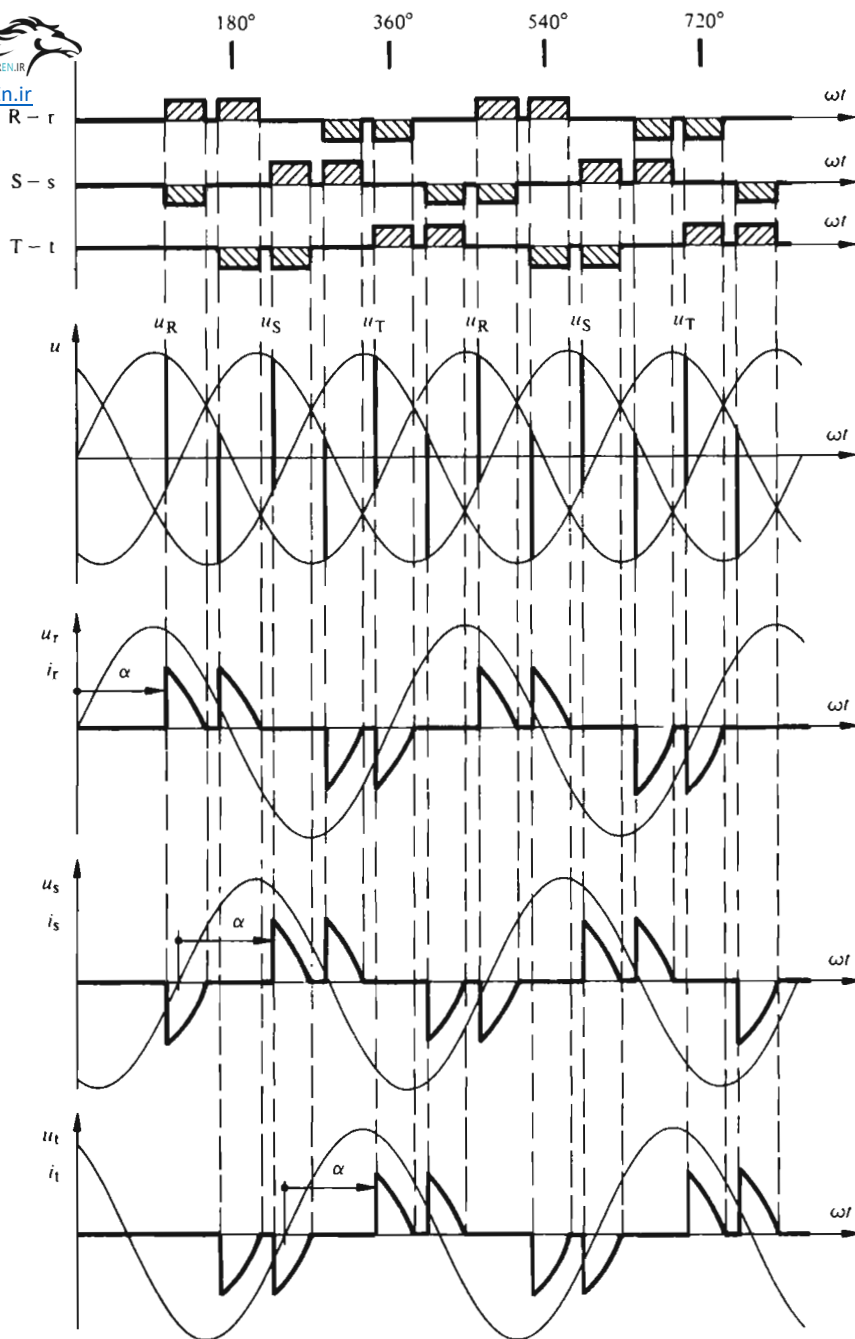
برای کار به صورت کنتاکتور جریان سه فاز، تیرستورها باید بتناوب و با $\alpha = 0^\circ$ روشن بشوند. پس از يك بار هدایت در هر فاز، جریان سینوسی می‌شود و اختلاف فازی نسبت به فشار الکتریکی تغذیه نخواهد داشت.

۳-۳-۴ بار القایی

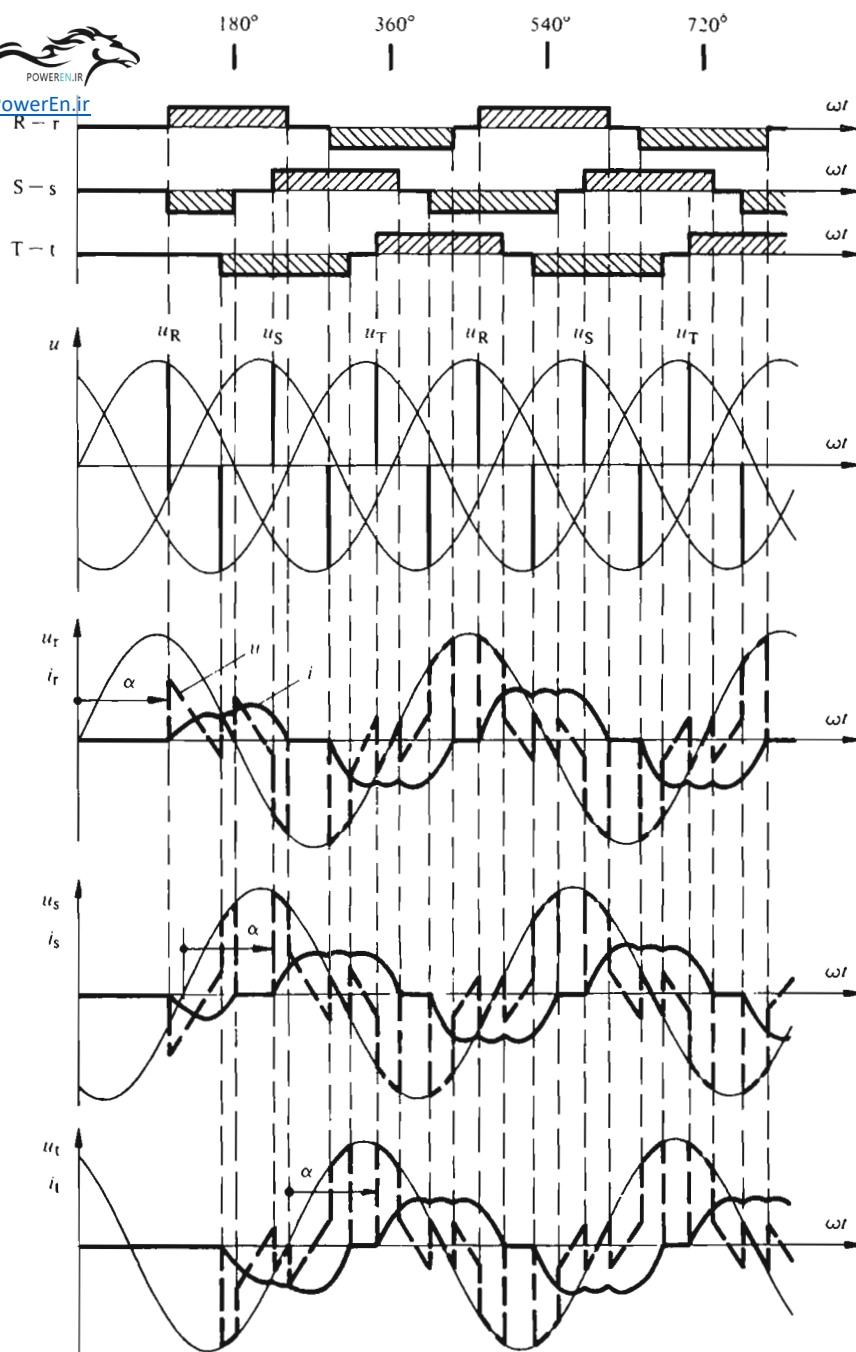
مدت زمان هدایت تیرستورها و روند تغییرات فشارهای الکتریکی و جریانه‌ها برای بار القایی در شکل ۴-۱۵ نشان داده شده و زاویه تأخیر آتش α برابر با 105° است.



شکل ۴-۱۳ مدت زمان هدایت تی‌ریستورها و روند تغییرات فشارهای الکتریکی و جریانها در مدار تغیردهنده جریان سه فازه برای بار اهمی، با $\alpha = 45^\circ$.



شکل ۴-۱۴ مدت زمان هدایت تیرستورها و روند تغییرات فشارهای الکتریکی و جریانها در مدار تغییردهنده جریان سه فاز با بار اهمی، برای $\alpha = 105^\circ$.



شکل ۴-۱۵ مدت زمان هدایت تیریسورها و روند تغییرات فشارهای الکتریکی و جریانها در مدار تغییردهنده جریان سه فاز با بار القایی خالص و برای $\alpha = 105^\circ$.

ترسیم روند تغییرات جریان نسبتاً ساده است. جریان از تکه های سینوسی که به طور عمودی جابجا شده اند و نسبت به تکه های سینوسی مربوط به فشار الکتریکی به اندازه 90° تأخیر فاز دارند، تشکیل شده است. چون بار القایی است و جریان نمی تواند تغییرات ناگهانی داشته باشد، در موقع عوض شدن فشار الکتریکی، در جریان عدم پیوستگی ظاهر نمی شود.

موقعی که فقط تیرستورهای دو فاز هدایت می کنند، فشار الکتریکی ساده در سرهای بار، نصف فشار الکتریکی مرکب شبکه است. در مواقعی که تیرستورهای هر سه فاز هادی اند فشار الکتریکی ساده در سرهای بار برابر فشار الکتریکی ساده شبکه است. روند تغییرات جریانهای سه فاز، بلافاصله پس از شروع کار، حالت پایای خود را پیدا نمی کند و این حالت پایا فقط پس از اینکه هر یک از فازها یک بار هدایت کردند به دست می آید. بدین ترتیب جریان تقریباً دوزنقه ای شکل می شود و در فاصله زمانی مشخصی صفر است.

همانند تغییر دهنده جریان تک فاز، زاویه تأخیر آتش نباید کمتر از 90° باشد. از آنجایی که به ازای: $\alpha > 150^\circ$ ، فشار الکتریکی بین آند و کاتد تیرستورهایی که باید روشن شوند، منفی می شود، حد بالا برای زاویه تأخیر آتش، 150° است (مانند بار اهمی).

چنانچه کنتاکتور جریان سه فاز (برای بار القایی خالص) با زاویه تأخیر آتش $\alpha = 90^\circ$ وصل شود، جریان سینوسی کامل خواهد بود.

۴-۳-۴ بار اهمی و القایی

تعیین روند تغییرات جریان در حالت بار اهمی و القایی دشوارتر است. برای هر تکه از جریان باید معادله دیفرانسیلی از نوع معادله (۴-۷) را حل کرد. جواب این معادله شامل یک مؤلفه پایا و یک مؤلفه گذراست. علاوه بر این برای هر تکه از جریان، باید شرایط اولیه را طوری تعیین کرد که عدم پیوستگی در جریان پدید نیاید. محاسبات در این حالت نسبتاً مشکل است و به طور عددی به کمک ماشین حسابگر انجام می شود.

برای به دست آوردن جواب این معادله دیفرانسیل، باید برای هر فاز از بار، روند تغییرات فشار الکتریکی معلوم باشد. فشار الکتریکی ساده در سرهای بار هنگامی که فقط دو فاز هادی اند با نصف فشار الکتریکی مرکب مربوط برابر است. و چنانچه هر سه فاز در حال هدایت باشند، فشار الکتریکی ساده در سرهای بار با فشار الکتریکی ساده شبکه تغذیه برابر خواهد بود. چون جریانها سینوسی نیستند، شرط دوم کاملاً روشن و مشخص نیست. در زیر، به اثبات این موضوع می پردازیم.

با توجه به علایم به کار رفته در شکل ۴-۱۲، برای سه شاخه بار، می توان معادلات دیفرانسیل زیر را نوشت:

$$u_r = L \frac{di_r}{dt} + R i_r \quad (27-4)$$

$$u_s = L \frac{di_s}{dt} + R i_s \quad (28-4)$$

$$u_t = L \frac{di_t}{dt} + R i_t \quad (29-4)$$

چون نقطه خنثای بار n آزاد (شناور) است، مجموع سه جریان صفر است

$$i_r + i_s + i_t = 0 \quad (30-4)$$

از رابطه بالا نتیجه می‌شود که مجموع مشتق جریانها نیز صفر خواهد بود

$$\frac{di_r}{dt} + \frac{di_s}{dt} + \frac{di_t}{dt} = 0 \quad (31-4)$$

با توجه به روابط (30-4) و (31-4)، از مجموع روابط (27-4)، (28-4) و (29-4) نتیجه می‌شود

$$u_r + u_s + u_t = 0 \quad (32-4)$$

یعنی، مجموع مقادیر لحظه‌ای فشارهای الکتریکی در سرهای سه‌شاخه بار همواره صفر است.

از طرف دیگر، فشارهای الکتریکی بار با فشارهای الکتریکی تغذیه در ارتباط اند. چنانچه هر سه فاز در حال هدایت باشند، روابط زیر قرار خواهند بود

$$-u_R + u_r - u_s + u_S = 0 \quad (33-4)$$

$$-u_R + u_r - u_t + u_T = 0 \quad (34-4)$$

از جمع کردن دو رابطه فوق نتیجه می‌شود

$$-2u_R + 2u_r - u_s - u_t + u_S + u_T = 0 \quad (35-4)$$

با توجه به رابطه (32-4) می‌توان نوشت: $-u_s - u_t = u_r$. چنانچه فشارهای الکتریکی

تغذیه تشکیل سیستم سه فاز متعادل را بدهند، داریم، $u_S + u_T = -u_R$ با قرار دادن این روابط در رابطه (۳۵-۴) به دست می آید: $-3u_R + 3u_r = 0$ و یا

$$u_r = u_R \quad (36-4)$$

با انجام دادن همین عملیات برای شاخه های دیگر، نتیجه می شود

$$u_s = u_S \quad (37-4)$$

$$u_t = u_T \quad (38-4)$$

به شرط هدایت هر سه فاز و متعادل بودن بار، فشارهای الکتریکی در سرهای بار با فشار الکتریکی ساده شبکه تغذیه برابرند.

تغییرات جریان برای بار اهمی و القایی روندی بین حالت بار اهمی و حالت بار القایی دارد و اساساً پدیده تازه ای حاصل نمی شود. از این رو از نشان دادن روند تغییرات فشارهای الکتریکی و جریانه ها برای این حالت خودداری شده است.

فقط یادآور می شود که زاویه تأخیر آتش α نباید از زاویه ψ بار، تعریف شده در رابطه (۹-۴)، کمتر باشد. حد بالایی α باز هم 150° است. وصل کنتاکتور جریان سه فاز باید با زاویه تأخیر آتش $\psi = \alpha$ انجام پذیرد.

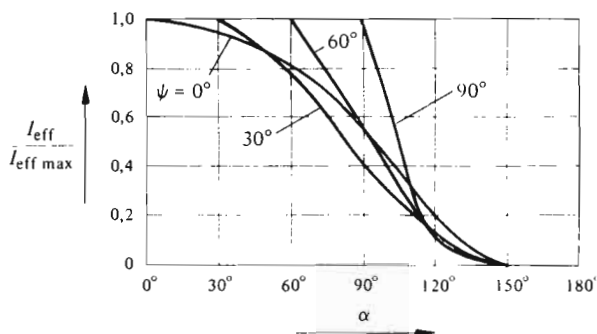
۵-۳-۴ مشخصه های فرمان

از آنجایی که نمی توان رابطه ای تحلیلی برای جریانه ها مشخص کرد به دست آوردن رابطه ای ساده برای مقدار مؤثر جریان نیز امکان پذیر نیست. بنابراین بناچار محاسبات نسبتاً طولانی به کمک ماشین حسابگر انجام می پذیرد.

مشخصه های فرمانی که بدین ترتیب به دست می آیند در شکل ۴-۱۶ نشان داده شده اند که تغییرات نسبت مقدار مؤثر جریان I_{eff} به مقدار ماگزیمم (بیشینه) $I_{eff\ max}$ را بر حسب زاویه تأخیر آتش α نشان می دهند. $\psi = \arctan L/R$ حکم پارامتر را دارد. مقدار ماگزیمم (بیشینه) جریان مؤثر از رابطه زیر به دست می آید

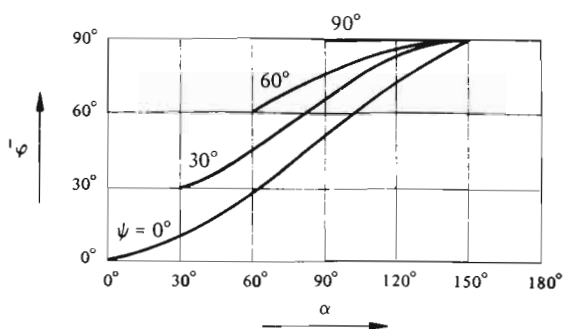
$$I_{eff\ max} = \frac{\hat{U}_{ph}}{\sqrt{3} \sqrt{R^2 + (\omega L)^2}} \quad (39-4)$$

در این رابطه \hat{U}_{ph} دامنه فشار الکتریکی ساده (فشار الکتریکی فازی) شبکه تغذیه است. اختلاف فاز موج اصلی ψ در شکل ۴-۱۷ نشان داده شده است. این نتیجه از محاسبه عددی بسط بدرشته فوریه بدست آمده است. ملاحظه می شود که حتی در حالت تغییر دهنده



شکل ۴-۱۶ مشخصه‌های فرمان تغییردهنده جریان سه‌فاز.

جریان سدفازه با بار اهمی خالص ($\psi = 0^\circ$) نیز، اختلاف فازی بین موج اصلی جریان و فشار الکتریکی وجود دارد و به معنی آن است که مقداری انرژی راکتیو به توسط منبع تغذیه فراهم می‌شود.



شکل ۴-۱۷ اختلاف فاز موج اصلی جریان ϕ در تغییردهنده جریان سه‌فاز.

فصل پنجم

مبدل‌های جریان: کارکرد ایدئال

۱-۵ مقدمه

۱-۱-۵ کلیات

متداولترین مبدل‌های ایستای با کموتاسیون طبیعی، مبدل‌های جریان‌اند. در گذشته انواع مختلف مبدل‌های جریان به کمک یکسوکننده‌های با بخار جیوه ساخته می‌شد. با وارد شدن تریستورها، توسعه قابل ملاحظه‌ای در ساخت و نرمالیزه کردن این مبدل‌ها به وجود آمد و امروزه، تقریباً تنها، از مدارهای به صورت پل^۱ استفاده می‌شود (به بندهای ۵-۶ و ۵-۷ مراجعه شود).

چنانکه تقسیم‌بندی شکل ۲-۱۳ نشان می‌دهد، مبدل‌های ایستای با کموتاسیون طبیعی می‌توانند کاربردهای نسبتاً متنوعی داشته باشند، زیرا قادرند هم به صورت یکسوکننده و هم به صورت اندولر کار کنند. این دو نوع کارکرد و همچنین کار یکسوکننده فرمان‌ناپذیر، حالت خاصی از طرز کار مبدل‌های جریان‌اند. ویژگی اساسی مبدل‌های جریان، امکان تبدیل از متناوب به دایم و بعکس است.

در اینجا، انواع مختلف مدارها و طرز کارکرد آنها را بررسی خواهیم کرد. ابتدا کارکرد ایدئال که شرایط آن در بند ۵-۱۴ بیان شده است بررسی می‌شود.

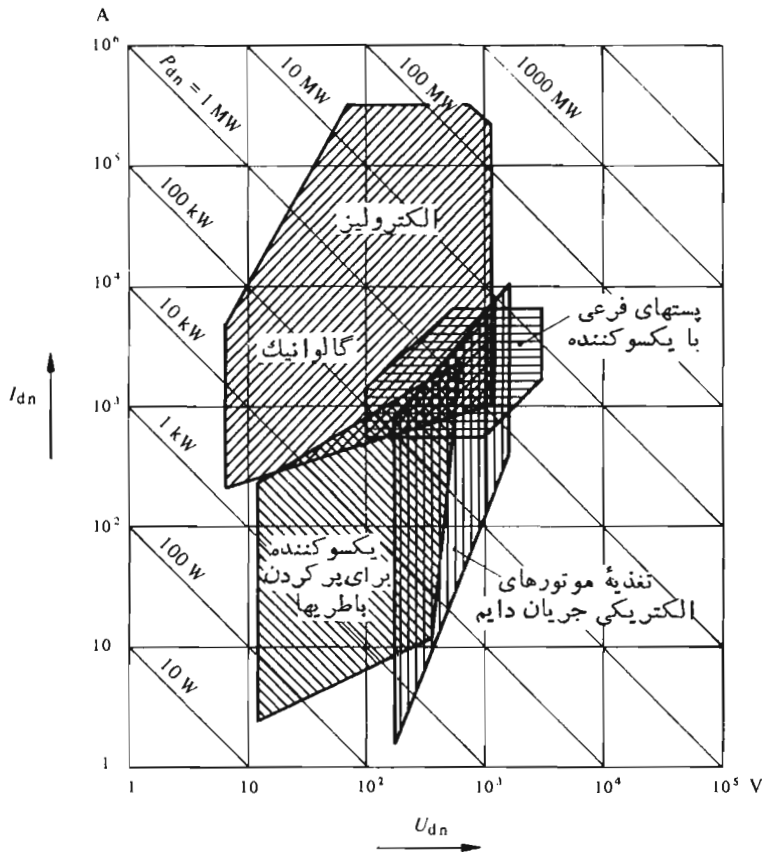
۱-۵-۲ کاربردهای مبدل‌های جریان

زمینه کاربرد مبدل‌های جریان بسیار وسیع است. قدرتها، فشارهای الکتریکی و جریانهای

1) pont



دایمی که مورد استفاده قرار می گیرند، در دامنه بسیار گسترده ای تغییر می کنند. در شکل ۱-۵ کاربردهای مختلف این مبدلها نشان داده شده است و در آن، فشارهای الکتریکی دایم اسمی U_{dn} ، جریانهای دایم اسمی I_{dn} و قدرت اسمی P_{dn} تأسیسات مشخص شده اند.



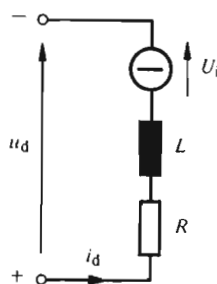
شکل ۱-۵ کاربردهای مبدل جریان.

یکی از کاربردهای مهم عبارت از تغذیه قابل تنظیم موتورهای الکتریکی با جریان دایم است. این موتورها ممکن است در تأسیسات ساکن (تأسیسات صنعتی) یا در وسایل حمل و نقل (کشند) که به وسیله جریان تک فاز تغذیه می شوند، به کار روند. برای وسایل حمل و نقل (کشند) تغذیه شده با جریان دایم به پستهای تغذیه فرعی که تأسیساتی با یکسو کننده های ساکن دارند، نیاز هست.

در تأسیسات الکتروشیمیایی، برای تغذیه حمام‌های الکترولیتی (برق‌کافتی) یا گالوانیکی (برق تجزیه‌ای)، به جریان‌های دایم قابل تنظیم نیازمندیم. در این حالت قدرت اسمی تأسیسات می‌تواند تا ۲۰۰ MW برسد. نهایتاً باید از یکسوکننده‌هایی که برای پرکردن باتری‌ها به کار می‌روند نیز نام برده شود.

۳-۱-۵ بار با جریان دایم

برای کاربردهای بیان شده در بند پیشین، «بار با جریان دایم» مدل جریان را می‌توان به‌طور کلی با مدار معادل نشان داده شده در شکل ۲-۵ نمایش داد. این بار اهمی و القا‌یی، از یک مقاومت و یک القاگر تشکیل شده است. R مقاومت کل و L القاگری کل مدار را نشان می‌دهد. در ضمن این مدار یک نیروی ضد محرك الکتریکی به‌صورت فشار الکتریکی داخلی U_i نیز دارد، که در نقطه کار معینی مقدارش در زمان ثابت است.



شکل ۲-۵ مدار معادل بار با جریان دایم.

مدار معادل فوق ممکن است در بعضی مواقع به‌جای «منبع فشار الکتریکی» شامل «منبع جریان» باشد. در این کتاب فقط منبع فشار الکتریکی به‌کار می‌رود و با دایره‌ای که در داخلش نشانه (—) قرار گرفته است (به‌شکل ۲-۵ مراجعه شود) نمایش داده می‌شود. در حالت تغذیه ماشین جریان دایم، R و L مقاومت اهمی و القاگری مدار القاپذیر را نشان می‌دهند، در صورتی که U_i فشار الکتریکی القا شده است و به تحريك و سرعت چرخش ماشین بستگی دارد. از این مدار معادل می‌توان در موارد دیگر نیز استفاده کرد. اغلب، برای صاف کردن جریان دایم i_d ، با اضافه کردن «پیچک‌های القاگر صاف‌کننده»، القاگری L به‌طور مصنوعی افزایش داده می‌شود.



چون در الکترونیک قدرت، بار اهمی خالص، اهمیت زیادی ندارد، در بررسی کارکرد ایدئال از این حالت صرف نظر می کنیم ولی در موقع بررسی کارکرد واقعی، در بند ۷-۴، توضیحاتی در این باره خواهیم داد. به سرهای بار، فشار الکتریکی دایم u_d ای اعمال می شود که به توسط مبدل جریان فراهم می آید. در نمایش مدارمبدلهای جریان، سر مثبت در پایین و سر منفی در بالا نشان داده خواهد شد. زیر نویس d برای فشار الکتریکی دایم u_d و جریان دایم i_d از واژه انگلیسی «مستقیم» گرفته شده است.

۴-۱-۵ مفروضات بررسی کارکرد ایدئال

در این فصل، مفروضات زیرین برای مطالعه کارکرد ایدئال مبدلهای جریان در نظام پایا در نظر گرفته خواهند شد.

– القاگری L بار با جریان دایم (به شکل ۲-۵ مراجعه شود) بینهایت است.

$$L = \infty \quad (۱-۵)$$

– القاگری L_c در مدار کموتاسیون (به شکل ۳-۲ مراجعه شود) ناچیز است.

$$L_c = 0 \quad (۲-۵)$$

از فرض اول ($L = \infty$) نتیجه می شود که جریان دایم i_d کاملاً صاف است و در زمان تغییر نمی کند. این موضوع با به کار بردن نشانه I_d ، برای جریان دایم بیان خواهد شد. از فرض دوم ($L_c = 0$) برمی آید که جریانها در مدار کموتاسیون می توانند ناگهانی تغییر یابند. بدین ترتیب می توان از پدیده کموتاسیون طبیعی صرف نظر کرد.

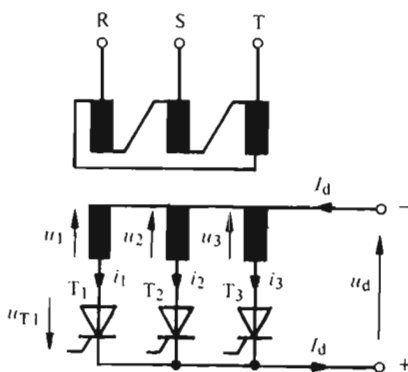
۲-۵ اتصال ستاره سه فاز

۱-۲-۵ مدار

شکل ۳-۵ مبدل جریانی را با «اتصال ستاره سه فاز» نشان می دهد. این مبدل از یک ترانسفورماتور سه فاز و سه تریستور T_1 ، T_2 و T_3 تشکیل شده است. این اتصال اغلب «اتصال سه فاز» با نقطه وسط» نامیده می شود.

اولیه ترانسفورماتور باید به صورت مثلث بسته شود، در صورتی که ثانویه به صورت

ستاره است. مسایل مربوط به کارکرد ترانسفورماتور در این مدار، در فصل هشتم بررسی خواهد شد.



شکل ۳-۵ اتصال ستاره سه فاز.

ثانویه ترانسفورماتور که با سه تیرستور متوالی است، سه فشار الکتریکی متناوب سینوسی u_1, u_2, u_3 را تولید می‌کند که سیستم سه فاز متعادل تشکیل می‌دهند و نسبت به هم اختلاف فازی به اندازه $2\pi/3 = 120^\circ$ دارند. کاتدهای تیرستورها به هم متصل شده و سرخروجی مثبت مبدل جریان را می‌سازند. فشار الکتریکی دایم u_d ، بین این سرخروجی مثبت و نقطه خنثای ثانویه ترانسفورماتور، که سرخروجی منفی مبدل را تشکیل می‌دهد، پدید می‌آید. بار با جریان دایم (به شکل ۳-۵ مراجعه شود) بین سرهای + و - بسته می‌شود.

در یکسوکننده ساده بدون امکان کنترل فشار الکتریکی دایم، به جای تیرستورها دیود قرار می‌گیرد. این مدار که حالت خاص مبدل جریان است، به طور مجزا بررسی نخواهد شد.

اتصال ستاره سه فاز، برای بررسی پدیده‌های مختلفی که در مبدل‌های جریان مطرح می‌شود، بسیار مناسب است. نتایج به دست آمده می‌تواند با سانی در مورد سایر اتصالها مخصوصاً اتصال پل که امروزه متداولترین است، تعمیم داده شود (به بند ۳-۵ مراجعه شود).

۳-۳-۵ کارکرد

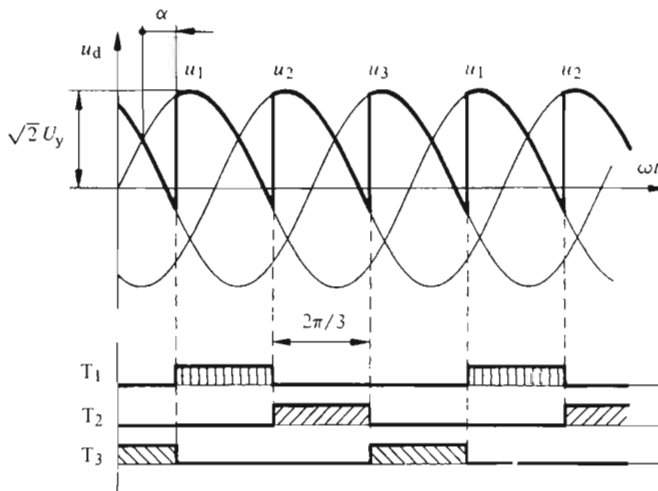
روند تغییرات فشار الکتریکی دایم u_d و همچنین مدت زمان هدایت تیرستورهای T_1, T_2 و T_3 در شکل ۳-۵ نشان داده شده‌اند. فشار الکتریکی u_d از پشت سرهم قرار گرفتن تکه‌هایی از فشارهای الکتریکی سینوسی u_1, u_2, u_3 (این سه فشار الکتریکی با هم سیستم



سه فازه ای می سازند که نسبت به هم 120° اختلاف فاز دارند) تشکیل شده است. در هر لحظه فقط تیرستور متصل به فاز دارای بیشترین مقدار لحظه ای فشار الکتریکی هدایت می کند (به شرط اینکه تپ روشن کننده برچکاننده آن اعمال شده باشد).

لحظه روشن شدن تیرستورها با «زاویه تأخیر آتش» α مشخص می شود. برای مبدل های جریان با کموتاسیون طبیعی، این زاویه را از محل برخورد دو فشار الکتریکی مثبت فاز اندازه گیری می کنند.

فشار الکتریکی لحظه ای u_d که ثابت نیست و حتی ممکن است در مدت زمان کوتاهی منفی نیز بشود، نه فشار الکتریکی دائم است و نه فشار الکتریکی یکسو. تعریف خاص این فشار الکتریکی در بند ۵-۹ بیان خواهد شد.



شکل ۵-۴ روند تغییرات فشار الکتریکی دائم u_d و مدت زمان هدایت تیرستورها برای اتصال ستاره سه فازه.

روند تغییرات فشار الکتریکی دائم u_d به زاویه تأخیر آتش α بستگی دارد (به بند ۹-۵ مراجعه شود).

فشار الکتریکی دائم u_d می تواند به مقدار اوج $\sqrt{2}U_y$ برسد که U_y مقدار مؤثر فشار الکتریکی ساده در ثانویه ترانسفورماتور است.

جریان دائم I_d ، در حالت ایدئال $L = \infty$ ، نسبت به زمان ثابت است و به نوبت از یکی از سه تیرستور، با ترتیب $T_1, T_2, T_3, T_4, T_5, T_6, T_7, T_8, T_9, T_{10}, T_{11}, T_{12}$ می گذرد. «مدت زمان هدایت» هر تیرستور بر حسب زاویه الکتریکی برابر $120^\circ = 2\pi/3$ و $\omega t = 120^\circ$ است.

۵-۳-۳ شاخص ضربان^۱ و شاخص کموتاسیون

مطابق شکل ۵-۴ در هر دوره فشار الکتریکی تغذیه، فشار الکتریکی u_h از ترکیب سه تکه سینوسی تشکیل شده است و در نتیجه ضربان آن با ضربان $\omega = 2\pi f$ یکی نیست. این امر با «شاخص ضربان» p بیان می‌شود. برای اتصال ستاره سه فاز، $p = 3$ است.

سه تیرستور T_1, T_2, T_3 «گروه کموتاسیون» می‌سازند. در این گروه کموتاسیون، در هر دوره از فشار الکتریکی تغذیه، جریان I_h سه بار از یک تیرستور به تیرستور دیگر منتقل می‌شود. این امر را می‌توان با «شاخص کموتاسیون» q بیان کرد. برای اتصال ستاره سه فاز، $q = 3$ است (به شکل ۵-۴ مراجعه شود).

۵-۳-۴ اتصال ستاره تک فاز

۵-۳-۴-۱ مدار

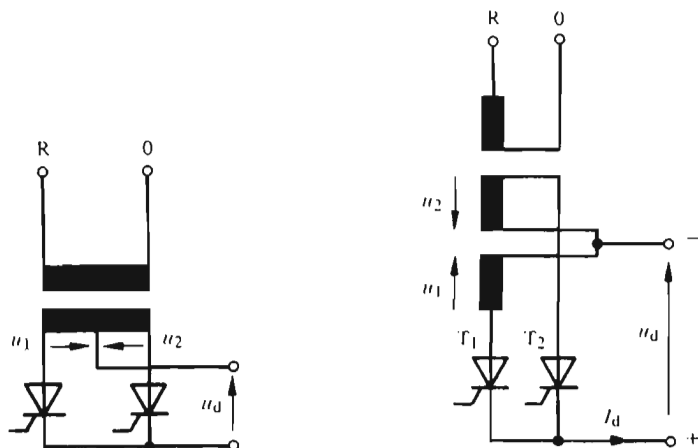
شکل ۵-۵ مدار مبدل جریان با اتصال ستاره تک فاز را نشان می‌دهد که از یک ترانسفورماتور تک فاز با دو سیم پیچ ثانویه و دو تیرستور T_1, T_2 تشکیل می‌شود. سیم پیچ‌های ثانویه ترانسفورماتور، در نقطه‌ای به نام نقطه وسط به یکدیگر وصل شده‌اند، از این رو این مدار اغلب «مدار تک فاز با نقطه وسط» نامیده می‌شود. فشارهای الکتریکی u_1 و u_2 ثانویه ترانسفورماتور، سیستم دوفاز را با اختلاف فاز 180° تشکیل می‌دهند.

با هر سیم پیچ ثانویه، یک تیرستور متوالی بسته می‌شود. کاتدهای تیرستورها به یکدیگر وصل‌اند و سر مثبت فشار الکتریکی u_h را می‌سازند و سر منفی u_h نقطه وسط دو سیم پیچ ثانویه است.

این اتصال معمولاً به صورت معادل شکل ۵-۶ نشان داده می‌شود. این اتصال با اینکه در حقیقت اتصال ستاره دوفاز است، نامیدن آن بدین اسم متداول نیست، و با توجه به شبکه تغذیه عموماً آن را اتصال ستاره تک فاز می‌نامند.

۵-۳-۴-۲ کارکرد

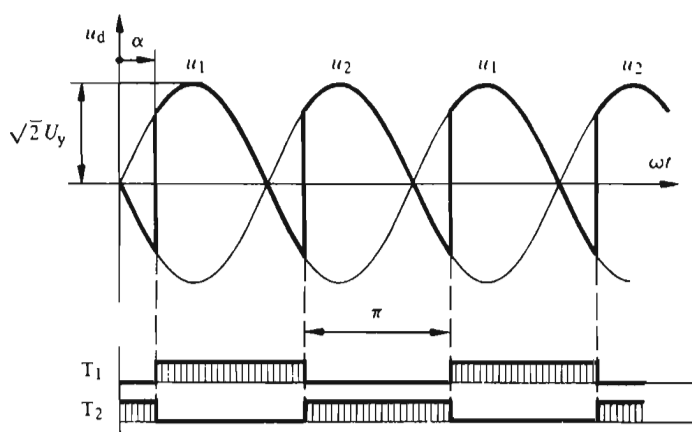
روند تغییرات فشار الکتریکی دایم u_h و مدت زمان هدایت تیرستورها در شکل ۵-۷ نشان داده شده‌اند. فشار الکتریکی دایم u_h از تکه‌هایی از فشارهای الکتریکی سینوسی u_1 و u_2 تشکیل می‌شود. تیرستوری هدایت می‌کند که به مثبت ترین فشار الکتریکی متصل است به شرط آنکه تپ روشن کننده‌ای بر آن وارد شده باشد.



شکل ۵-۵ اتصال ستاره تک فازه.

شکل ۵-۶ نمایش متداول اتصال ستاره تک فازه.

زاویه تأخیر آتش α از محل تلاقی دو فشار الکتریکی u_1 و u_2 که در این حالت همان محل عبور این فشارهای الکتریکی از صفر است، اندازه گیری می شود. اوج فشار الکتریکی داریم u_d می تواند به $\sqrt{2}U_y$ برسد که U_y مقدار مؤثر فشار الکتریکی ساده در ثانویه ترانسفورماتور است.

شکل ۵-۷ روند تغییرات فشار الکتریکی داریم u_d و مدت زمان هدایت تیرستورها برای اتصال ستاره تک فازه.

جریان دائم I_d به نوبت از تیریس‌تورهای T_1 و T_2 می‌گذرد. مدت زمان هدایت هر تیریس‌تور، برحسب زاویه الکتریکی، برابر $\pi = 180^\circ = \omega t$ است.

۳-۳-۵ شاخص ضربان و شاخص کموتاسیون

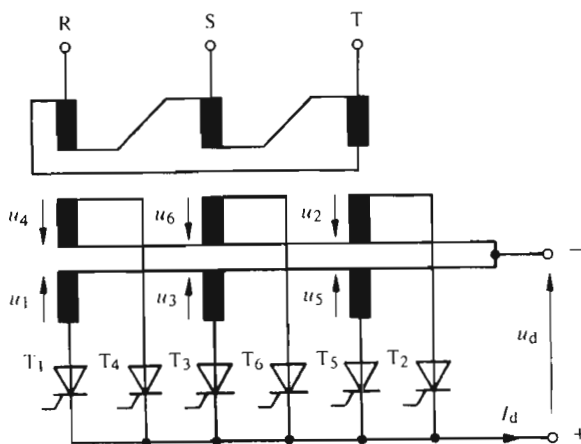
چنانکه شکل ۷-۵ نشان می‌دهد، در هر دوره فشار الکتریکی تغذیه، برای فشار الکتریکی دائم u_d دو ضربان وجود دارد. بنابراین شاخص ضربان، $p=2$ است. دو تیریس‌تور T_1 و T_2 هم یک گروه کموتاسیون با شاخص کموتاسیون $q=2$ تشکیل می‌دهند.

۴-۵ اتصال ستاره شش فازه

۱-۴-۵ مدار

یک مبدل جریان با «اتصال ستاره شش فازه» در شکل ۸-۵ نشان داده شده. این اتصال اغلب «اتصال شش فازه با نقطه وسط» نامیده می‌شود و از یک ترانسفورماتور و شش تیریس‌تور تشکیل شده است.

اولیه ترانسفورماتور باید مثلثی بسته شود. در ثانویه، ترانسفورماتور روی هر ستون هسته دو سیم پیچ دارد. یک سر سیم پیچ‌های ثانویه به هم متصل می‌شوند و نقطه خنثایی را تشکیل می‌دهند، به این ترتیب فشارهای الکتریکی $u_1, u_2, u_3, u_4, u_5, u_6$ نسبت به هم 180° اختلاف فاز دارند و مطابق ترتیبشان در سیستم شش فازه شماره گذاری شده‌اند. این



شکل ۸-۵ اتصال ستاره شش فازه.



نقطه خشی سر خروجی منفی مبدل است. هر تیرستور با يك سیم پیچ ثانویه متوالی PowerEn.ir و نقطه اتصال کاتد همه تیرستورها به هم، سر خروجی مثبت مبدل را می‌سازد.

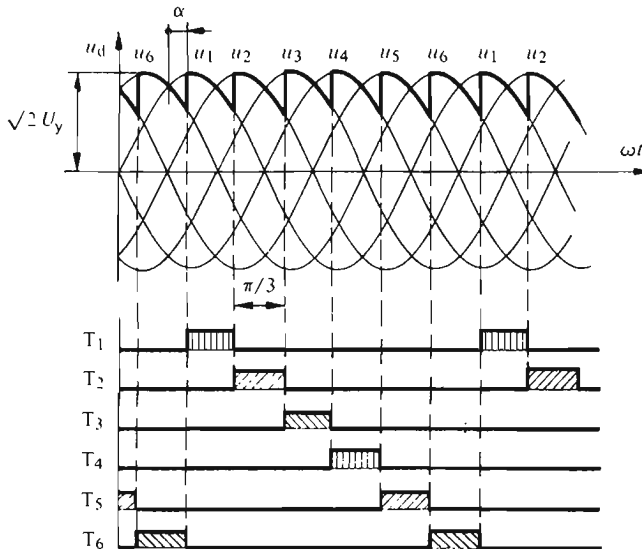
۵-۴-۲ کارکرد

روند تغییرات فشار الکتریکی دایم u_d و همچنین مدت زمان هدایت تیرستورها در شکل ۵-۹ نشان داده شده‌اند. فشار الکتریکی دایم u_d از پشت سر هم قرار گرفتن تکه‌هایی از فشارهای الکتریکی سینوسی $u_1, u_2, u_3, u_4, u_5, u_6$ که نسبت به هم 60° اختلاف فاز دارند و سیستم شش فازه‌ای را می‌سازند، تشکیل می‌شود. در هر لحظه فقط تیرستوری هدایت می‌کند که فشار الکتریکی متصل به آن بیشترین مقدار لحظه‌ای را داشته باشد و به چکانده‌اش تپ روشن کننده اعمال شود.

لحظه روشن شدن تیرستورها را زاویه تأخیر آتش α مشخص می‌کند که از محل تلاقی دو فشار الکتریکی مثبت دو فاز از سیستم شش فازه اندازه گیری می‌شود. اوج فشار الکتریکی دایم می‌تواند به $\sqrt{2}U_y$ برسد که U_y مقدار مؤثر فشار الکتریکی ساده در ثانویه ترانسفورماتور است.

جریان دایم I_d ، به نوبت از شش تیرستور با ترتیب T_1, T_2, T_3, T_4, T_5 و T_6 می‌گذرد.

مدت زمان هدایت هر تیرستور به زاویه الکتریکی برابر $\pi/3 = 60^\circ = \omega t$ است. بنابراین، در این حالت استفاده خوبی از تیرستورها به عمل نمی‌آید.



شکل ۵-۹ روند تغییرات فشار الکتریکی دایم u_d و مدت زمان هدایت تیرستورها برای اتصال ستاره شش فازه.

۳-۴-۵ شاخص ضربان و شاخص کموتاسیون

در هر دوره از فشار الکتریکی تغذیه، برای فشار الکتریکی دایم u_h شش ضربان متشکل از تکه‌های سینوسی وجود دارد. بنابراین شاخص ضربان در این اتصال، $p = 6$ است. در گروه کموتاسیون که متشکل از شش تیرستور T_1, T_2, T_3, T_4, T_5 و T_6 است، در هر دوره از فشار الکتریکی تغذیه، جریان، شش بار از تیرستوری به تیرستور دیگر منتقل می‌شود. در نتیجه، برای این اتصال، شاخص کموتاسیون، $q = 6$ خواهد بود.

۵-۵ اتصال با پیچک جذب کننده

۱-۵-۵ کلیات

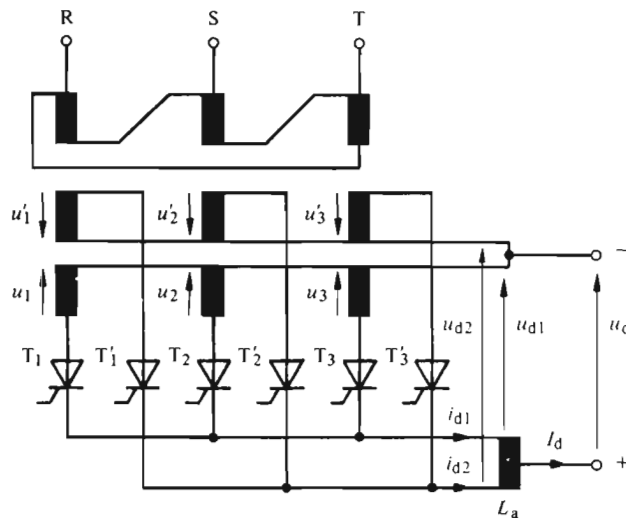
اتصال ستاره شش‌فازه، که در قسمت پیشین بررسی شد، این مزیت را دارد که در آن شاخص ضربان فشار الکتریکی دایم تولید شده نسبتاً بالا و برابر ۶ است؛ در نتیجه هارمونیک‌های آن کوچک خواهند بود. در عوض، هدایت هر تیرستور بر حسب زاویه الکتریکی به $\pi/3 = 60^\circ$ محدود می‌شود.

با اتصال موازی دو مبدل جریان ستاره سه‌فازه با فشارهای الکتریکی تغذیه متقابل نیز می‌توان مبدل جریان شش‌فازه ($p = 6$) ساخت [در این صورت هدایت تیرستورها $120^\circ = 2\pi/3$ است و عیب مذکور برای اتصال ستاره شش‌فازه منتفی خواهد شد]. چون مقدار لحظه‌ای فشارهای الکتریکی دایم فراهم شده به توسط دو مبدل جریان یکسان نیستند، اتصال موازی آنها به‌طور مستقیم امکان‌پذیر نیست. این اتصال را می‌توان به کمک یک القاگر با نقطه وسط، به نام «پیچک جذب کننده»، انجام داد. چگونگی مدار در بند بعد خواهد آمد.

۲-۵-۵ مدار

«اتصال با پیچک جذب کننده» در شکل ۱۰-۵ نشان داده شده که از یک ترانسفورماتور، شش تیرستور و یک پیچک جذب کننده L_h تشکیل می‌شود.

در هر ستون از هسته ترانسفورماتور دو سیم‌پیچ ثانویه وجود دارد و بدین ترتیب دو سیستم سه‌فازه u_1, u_2, u_3 و u'_1, u'_2, u'_3 با فاز متقابل تولید می‌شوند. اولین سیستم سه‌فازه، تیرستورهای T_1, T_2, T_3 یعنی اولین گروه کموتاسیون را تغذیه می‌کند. سیستم سه‌فازه دیگر، به تیرستورهای T'_1, T'_2, T'_3 که گروه کموتاسیون دوم را به وجود می‌آورند متصل است. کاتدهای دو گروه کموتاسیون به دو سر پیچک جذب کننده وصل شده‌اند. سر خروجی مثبت برای کل مبدل جریان، نقطه وسط پیچک جذب کننده است. نقاط خنثای دو سیستم سه‌فازه نیز به هم متصل می‌شوند و سر خروجی منفی مبدل را می‌سازند.



شکل ۳-۵-۱۰ اتصال با پیچک جذب کننده.

۳-۵-۵ کارکرد

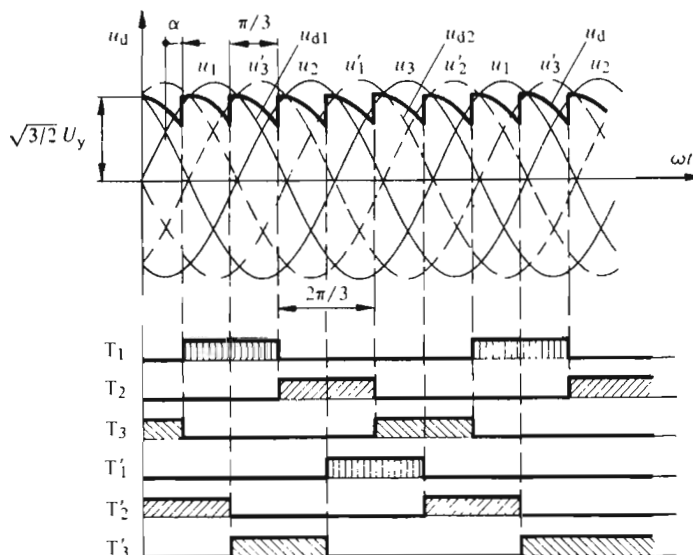
به وسیله دو گروه کموتاسیون، دو فشار الکتریکی دایم u_{d1} و u_{d2} فراهم می شود. روند تغییرات این فشارهای الکتریکی مشابه فشار الکتریکی دایم در خروجی اتصال ستاره سه فاز بیان شده در بند ۳-۵-۲ است. زاویه تأخیر آتش α ، از محل تلاقی دو فشار الکتریکی با فاز مثبت در هر سیستم سه فاز اندازه گیری می شود (شکل ۳-۵-۱۱).

پیچک جذب کننده L_a نقش تقسیم کننده القایی فشار الکتریکی را دارد و اختلاف بین مقادیر لحظه ای u_{d1} و u_{d2} را جذب می کند. فشار الکتریکی در نقطه وسط این پیچک برابر است با

$$u_d = \frac{u_{d1} + u_{d2}}{2} \quad (3-5)$$

اوج فشار الکتریکی دایم u_d به $\sqrt{3/2} U_y$ می رسد، که U_y مقدار مؤثر فشار الکتریکی ساده در ثانویه ترانسفورماتور است. ملاحظه می شود که مقدار اوج u_d از مقدار اوج فشارهای الکتریکی u_{d1} و u_{d2} در اتصال ستاره سه فاز $(\sqrt{2} U_y)$ کمتر است.

در حالت پیچک جذب کننده ایدئال، جریان مغناطیس کننده ناچیز است، جریان دایم I_d به تساوی بین دو گروه کموتاسیون تقسیم می شود و داریم $i_{d1} = i_{d2} = I_d/2$. در هر گروه کموتاسیون نصف جریان دایم، بتناوب از تیرستورهای T_1, T_2 و T_3 و تیرستورهای



شکل ۵-۱۱ روند تغییرات فشار الکتریکی دایم u_d و مدت‌زمان هدایت تیریسورها در اتصال با پیچک جذب کننده.

برای روشن کردن تیریسورها باید بترتیب $T_1, T_2, T_3, T'_1, T'_2, T'_3$ عبور می‌کند. مدت‌زمان هدایت هر تیریسور به‌زاویه الکتریکی، برابر $120^\circ = 2\pi/3$ است.

برای روشن کردن تیریسورها باید بترتیب $T_1, T_2, T_3, T'_1, T'_2, T'_3$ عبور می‌کند. مدت‌زمان هدایت هر تیریسور به‌زاویه الکتریکی، برابر 120° است. به عبارت دیگر پس از روشن شدن هر تیریسور از یک گروه باید تیریسوری از گروه دیگر را روشن کرد.

در عمل، پیچک جذب کننده احتیاج به جریان مغناطیس کننده دارد و جریان I_d نمی‌تواند بتساوی بین دو گروه تقسیم شود. در اینجا دو شرط برقرار است: از سویی، مجموع $i_{d1} + i_{d2}$ برابر جریان دایم I_d است. از سوی دیگر، اختلاف $i_{d1} - i_{d2}$ باید برابر جریان مغناطیس کننده پیچک جذب کننده باشد. جریان مغناطیس کننده پیچک جذب کننده به شار آن بستگی دارد که این خود نیز تابع اختلاف بین مقادیر لحظه‌ای فشارهای الکتریکی u_{d1} و u_{d2} است $(d\Phi/dt = u_{d1} - u_{d2})$. بنابراین، حتی درحالتی هم که I_d مقدار ثابتی دارد، جریانهای i_{d1} و i_{d2} در زمان تغییر می‌کنند. البته i_{d1} و i_{d2} باید همواره مثبت باشند. چنانچه جریان I_d به مقداری کمتر از مقدار بحرانی $I_{d\text{crit}}$ تنزل یابد، جریان مغناطیس کننده برای ایجاد افت فشار الکتریکی $u_{d1} - u_{d2}$ کافی نخواهد بود. در این حالت پیچک جذب کننده نمی‌تواند به عنوان تقسیم کننده القایی فشار الکتریکی عمل نماید، و مجموعه به صورت اتصال ستاره شش فازه با مدت هدایتی برابر $60^\circ = \pi/3$ کار خواهد

کرد. ابعاد پیچك جذب كننده را چنان تعيين می كنند كه جریان بحرانی $I_{d\text{ crit}}$ برابر $\frac{1}{6}$ درصد مقدار اسمی جریان دایم باشد.

۵-۵-۴ شاخص ضربان و شاخص کموتاسیون

در مدارهای با چندین گروه کموتاسیون موازی، تعداد این گروهها را با عددی مانند r بیان می کنند. در اتصال با پیچك جذب كننده، دو گروه کموتاسیون با هم موازی شده اند، بنا براین $r=2$ است.

«شاخص ضربان» برای کل مبدل جریان تعریف می شود و عبارت از تعداد ضربانهای فشار الکتریکی داریم $u_{d\theta}$ دو هر دوره کامل از فشار الکتریکی تغذیه است. چنانکه از شکل ۵-۱۱ برمی آید، در اتصال با پیچك جذب كننده، $p=6$ است.

«شاخص کموتاسیون» همواره برای يك گروه کموتاسیون منفرد تعریف می شود. بنا براین برای هریك از دو گروه فوق، $q=3$ است.

دو فشار الکتریکی $u_{d\theta 1}$ و $u_{d\theta 2}$ نسبت به هم جایجا شده اند. شاخص ضربان برای فشار الکتریکی منتجه خروجی، دو برابر شاخص کموتاسیون q است، زیرا مبدل جریان با پیچك جذب كننده از رابطه $p=rq$ تبعیت می كند.

۵-۵-۵ اتصالات دیگر با پیچك جذب كننده

برای ساختن اتصالات با پیچك جذب كننده امکانات دیگری نیز وجود دارد. به عنوان مثال پیچك جذب كننده را می توان بین دو نقطه خنثای ثانویه های ترانسفورماتور قرار داد، و از اتصال مستقیم کاتدهای شش تیرستور به عنوان سرخروجی + مبدل جریان استفاده کرد. کارکرد این اتصال کاملاً شبیه مدار شکل ۵-۱۰ خواهد بود.

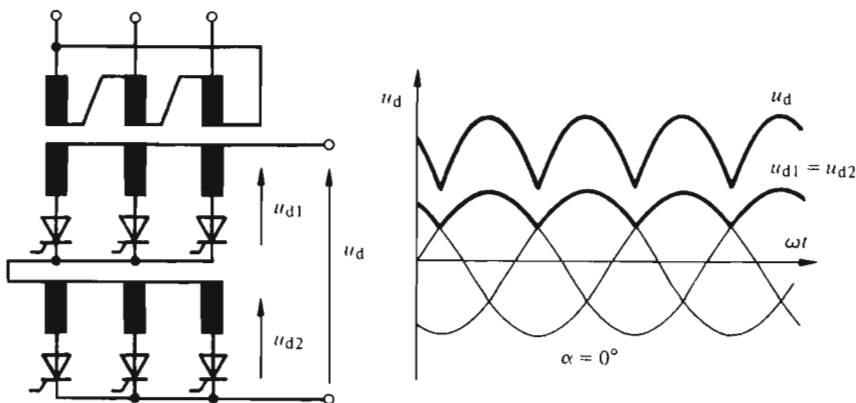
پیچك جذب كننده می تواند در موازی بستن اتصالات دیگر مبدلهای جریان، به عنوان مثال موازی بستن دو اتصال پلسه فازه، نیز به کار رود. از این روش در مواردی که افزایش شاخص ضربان p مورد نظر باشد استفاده می شود. در چنین مواردی، دو مبدل جریان باید با سیستمهای فشارهای الکتریکی متناوب که نسبت به هم اختلاف فاز دارند، تغذیه شوند تا فشارهای الکتریکی داریم حاصل از تك تك مبدلها نسبت به هم جایجا شده باشند. بدین ترتیب ضربان فشار الکتریکی داریم منتجه در نقطه وسط پیچك جذب كننده دو برابر خواهد شد.

موازی بستن به كمك پیچك جذب كننده بویژه برای فراهم كردن فشارهای الکتریکی داریم نسبتاً كم و جریانهای داریم زیاد، مفید است.

۵-۶ اتصال پل سه فازه

۵-۶-۱ به دست آوردن اتصال پل سه فازه

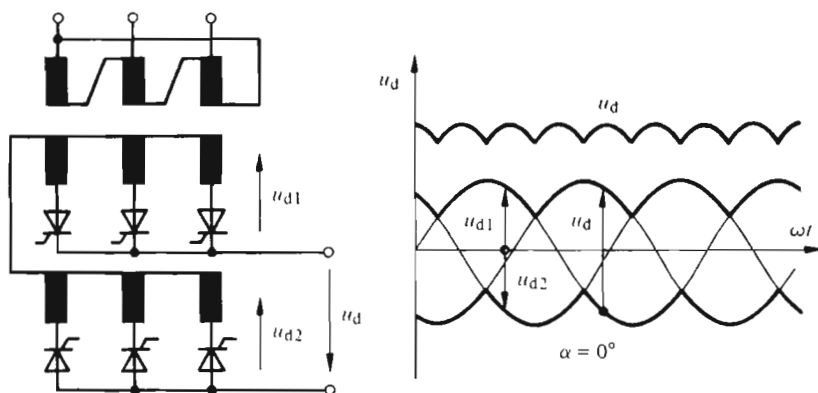
اتصال پل سه فازه که امروزه بیشتر به کار می‌رود، «اتصال پل سه فازه» است. این اتصال، از متوالی بستن دو مبدل جریان با اتصال ستاره سه فازه حاصل می‌شود. با متوالی بستن دو اتصال ستاره سه فازه کاملاً یکسان با $u_{d1} = u_{d2}$ ، مطابق شکل ۵-۱۲، فشار الکتریکی دایم u_d دو برابر می‌شود ولی شاخص ضریب پهنای برابر ۳ می‌ماند. بدین ترتیب، این مدار دو گروه کموتاسیون متوالی به هم بسته دارد.



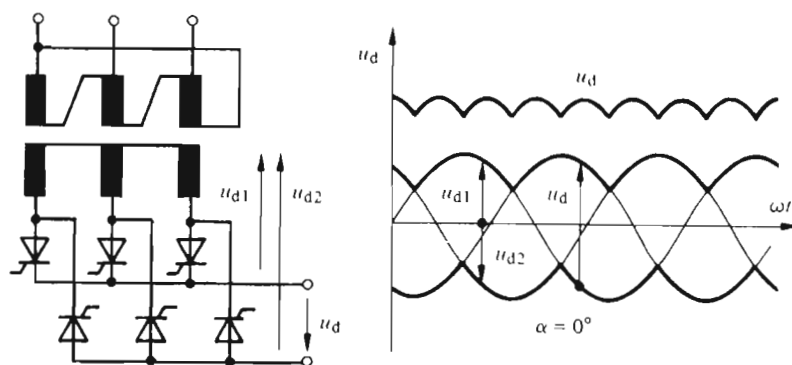
شکل ۵-۱۲ اتصال متوالی دو اتصال ستاره سه فازه.

مطابق شکل ۵-۱۳ می‌توان جهت تیرستورهای گروه دوم کموتاسیون را عوض کرد. در این حالت هر تیرستور از گروه دوم کموتاسیون، هنگامی هدایت خواهد کرد که منفی‌ترین فشار الکتریکی را داشته و روشن شده باشد. بدین ترتیب فشار الکتریکی دایم u_{d2} منفی می‌شود و اتصالات بین دو گروه کموتاسیون را باید عوض کرد. مقدار متوسط فشار الکتریکی دایم u_d باز هم دو برابر فشار الکتریکی دایم در اتصال ستاره سه فازه است. شاخص ضریب پهنای p در این حالت برابر ۶ خواهد بود، زیرا تکه‌های سینوسی که u_{d2} را می‌سازند، 180° نسبت به تکه‌های سازنده u_{d1} جابجایی دارند.

فشارهای الکتریکی متناوب دو گروه کموتاسیون نقطه‌خنثای واحدی دارند. بنابراین مطابق شکل ۵-۱۴، می‌توان با حذف یک دسته از سیم پیچ‌های ثانویه، هر دو گروه کموتاسیون را به سیم پیچ‌های ثانویه واحدی وصل کرد. روند تغییرات فشار الکتریکی دایم u_d همانند حالت شکل ۵-۱۳ است.



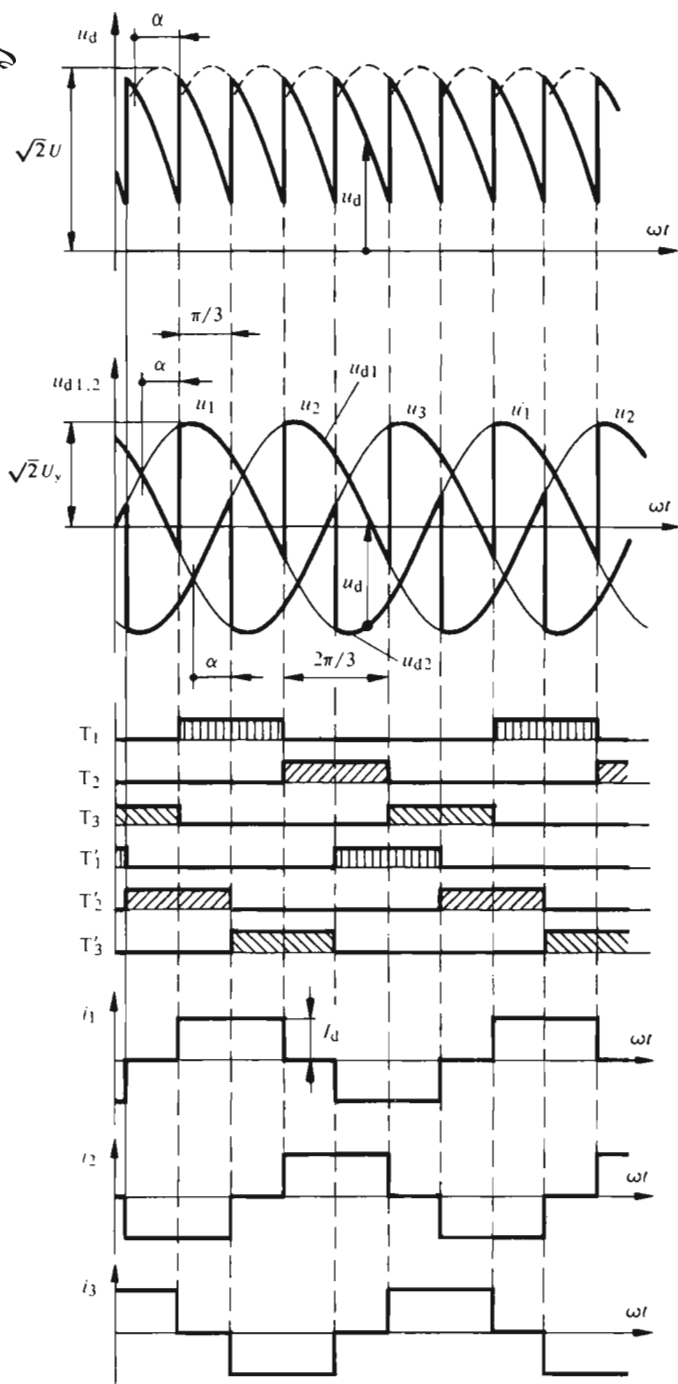
شکل ۵-۱۳ متوالی بستن دو اتصال ستاره سه فاز که جهت تیرستورهای یکی از آنها عوض شده است.



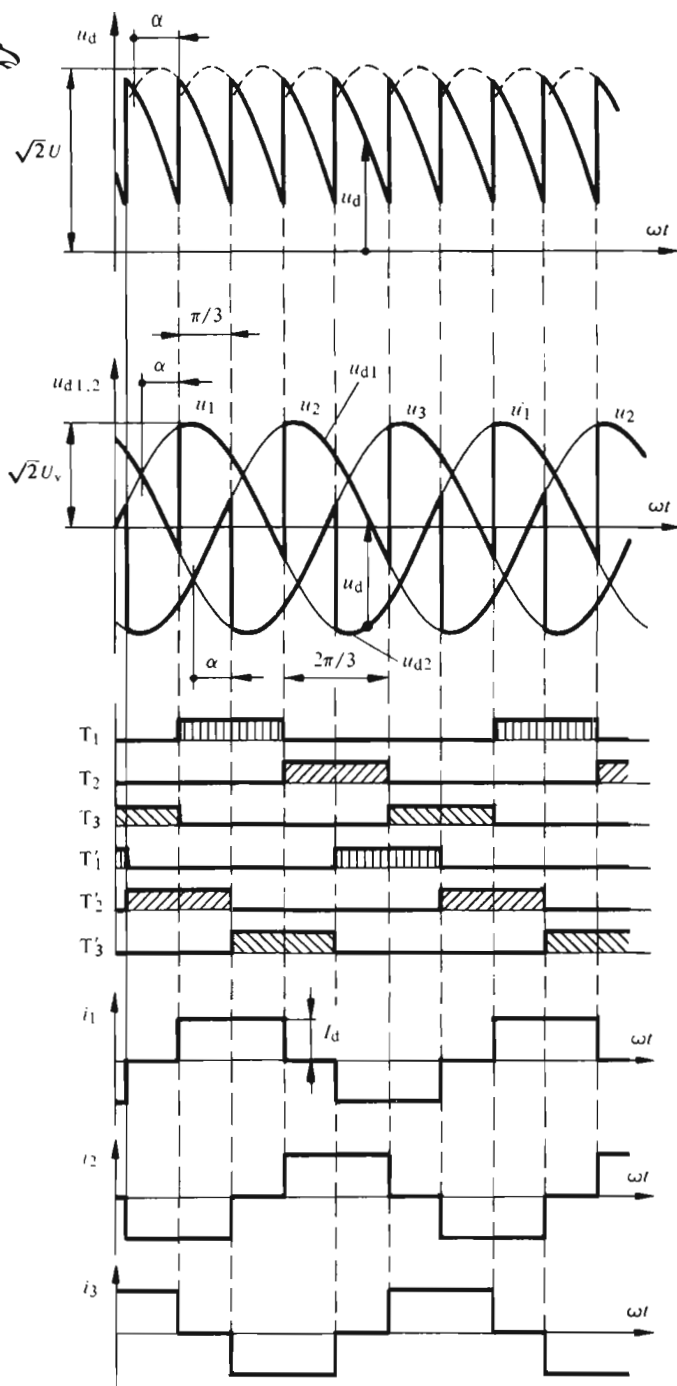
شکل ۵-۱۴ حالت ساده شده اتصال شکل ۵-۱۳.

۵-۶-۲ مدار

مدار اتصال پل، معمولاً مطابق شکل ۵-۱۵ نشان داده می شود. از آنجا که اتصال پل را می توان مستقیماً به شبکه سه فاز وصل کرد، ترانسفورماتور تغذیه در این شکل داده نشده است. فقط در مواردی که مجزا کردن الکتریکی مدار از شبکه یا تبدیل فشار الکتریکی شبکه تغذیه به فشار الکتریکی دیگری به تناسب فشار الکتریکی داریم، مورد نظر باشد، ترانسفورماتور تغذیه به کار می رود. گاهی برای کاهش اثر عکس العمل کموناسیون بر شبکه تغذیه، لازم خواهد بود تا پیچکهای القایی به نام «القاگرهای کموناسیون» در سه فاز تغذیه قرار داده شوند (به بند ۳-۹ مراجعه شود).



شکل ۱۶-۵ روند تغییرات فشار الکتریکی u_d ، جریانهای خط i_1, i_2, i_3 و مدت زمان هدایت تیرستورها در اتصال پل سه فاز.



شکل ۱۶-۵ روند تغییرات فشار الکتریکی دایم u_d ، جریانهای خط i_1, i_2, i_3 و مدت زمان هدایت تیریسورها در اتصال پل سه فاز.

آتش α ، که از محل تلاقی دو فشار الکتریکی ساده مثبت اندازه گیری می شود، مشخص می کند.

فشار الکتریکی دایم $u_{d\varphi}$ گروه کموتاسیون دوم، از تکه های سینوسی فشارهای الکتریکی ساده u_1, u_2, u_3 در ارتباط با هدایت تیرستورهای T'_1, T'_2, T'_3 تشکیل می شود. در این حالت، تیرستور هدایت کننده به منفی ترین فشار الکتریکی تغذیه متصل است به شرط آنکه تپ روشن کننده بر آن اعمال شود. لحظه شروع هدایت را، بازهم زاویه تأخیر آتش α که در این حالت از محل تلاقی دو فشار الکتریکی ساده منفی اندازه گیری می شود، مشخص می کند.

فشار الکتریکی دایم کل u_d از تفاضل u_{d1} و u_{d2} به دست می آید و روند تغییراتش را شکل ۵-۱۶ نشان می دهد. این فشار الکتریکی از تکه هایی از فشارهای الکتریکی یک سیستم شش فازه تشکیل می شود. فشار الکتریکی u_d را می توان با استفاده از فشارهای الکتریکی مرکب شبکه تغذیه نیز به دست آورد.

مقدار اوج فشار الکتریکی دایم u_d برابر $\sqrt{2} U$ است و در آن U مقدار مؤثر فشار الکتریکی مرکب شبکه تغذیه است.

جریان دایم I_d ، به نوبت، در گروه اول کموتاسیون از تیرستورهای T_1, T_2, T_3 و در گروه دوم کموتاسیون از تیرستورهای T'_1, T'_2, T'_3 می گذرد. مدت زمان هدایت هر تیرستور معادل $\omega t = 120^\circ = 2\pi/3$ است. چنانکه از شکل ۵-۱۶ برمی آید، ترتیب روشن شدن تیرستورها در کل پل عبارت از $T_1, T'_2, T_3, T'_1, T_2, T'_3$ است. هرگز نباید دو تیرستور متوالی و واقع در یک شاخه، مانند T_1 و T'_1 ، به طور همزمان هدایت کنند. هدایت چنین جفت تیرستوری معادل اتصال کوتاه مبدل جریان در طرف دایم خواهد بود.

در موقع شروع کار پل سه فازه، لازم است تاتپهای روشن کننده به طور همزمان به یک تیرستور از هر گروه کموتاسیون، با توجه به ترتیب هدایت جریان، اعمال شوند. به عنوان مثال اگر تیرستور T_1 می خواهد برای بار اول روشن شود، باید تیرستور T'_2 نیز روشن گردد. بدون اعمال این تپ روشن کننده اضافی به چکاننده تیرستور T'_2 ، هیچ جریانی نمی تواند عبور کند.

در شکل ۵-۱۶ جریانهای i_1, i_2 و i_3 خطهای تغذیه نیز نمایش داده شده اند. این جریانها از ترکیب جریانهای جاری در دو تیرستور هر شاخه، به عنوان مثال T_1 و T'_2 حاصل می شوند. در نظر گرفتن جهت هدایت تیرستورها نشان می دهد که جریانهای خط، جریانهای متناوب و مستطیلی شکل اند. دامنه این موج مستطیلی برابر با مقدار جریان دایم I_d است.

۵-۶-۴ شاخص ضربان و شاخص کموتاسیون

چنانکه در بند ۵-۶-۱ بیان کردیم، در اتصال پل سه فازه دو گروه کموتاسیون متوالی به هم بسته شده اند. این واقعیت را می توان با «تعداد گروههای کموتاسیون متوالی به هم بسته»

که با s نشان داده می‌شود بیان کرد. در اینجا $s = ۲$ است.

«شاخص ضربان p » باز هم، برای مبدل جریان، و از روی تعداد ضربانهای u_d در هر دوره از فشار الکتریکی تغذیه، تعریف می‌شود. برای اتصال پل سه فازه چنانکه در بند ۵-۶-۱ دیدیم $p = ۶$ است.

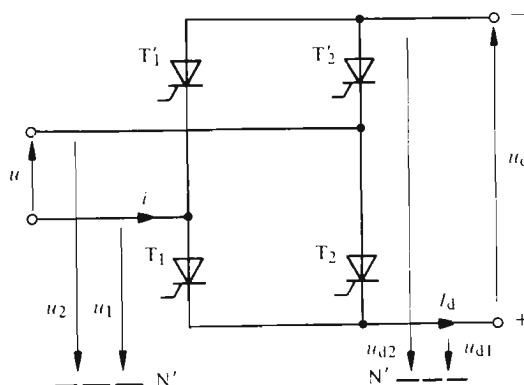
در عوض، «شاخص کموتاسیون q » همواره به یک گروه کموتاسیون تنها مربوط می‌شود. در هر یک از دو گروه کموتاسیون تشکیل دهنده اتصال پل سه فازه، $q = ۳$ است. در اینجا $p = sq$ است و این رابطه فقط در مورد اتصال پل سه فازه اعتبار دارد.

۵-۷ اتصال پل تک فازه

۵-۷-۱ مدار

هرگاه در پل سه فازه یکی از شاخه‌ها، به عنوان مثال شاخه متشکل از T_p و T'_p حذف شود، مبدل جریانی با «اتصال پل تک فازه» شامل چهار تیرستور به دست می‌آید. تغذیه مبدل در این حالت از طریق فشار الکتریکی تک فازه انجام می‌شود.

مدار اتصال پل تک فازه در شکل ۵-۱۷ نشان داده شده است. این مدار دارای دو شاخه است که هر کدام دو تیرستور متوالی شده دارند. تیرستورهای T_1 و T'_1 ، گروه اول کموتاسیون و تیرستورهای T_2 و T'_2 ، گروه دوم کموتاسیون را می‌سازند. کاتدهای تیرستورهای گروه اول کموتاسیون به سر مثبت و آندهای تیرستورهای گروه دوم به سر منفی متصل‌اند.



شکل ۵-۱۷ اتصال پل تک فازه.

فشارهای الکتریکی متناوب u_1 و u_2 نسبت به «نقطه خنثای مجازی N' » اندازه گیری

می‌شوند. این دوفشار الکتریکی، سیستم دوفازه‌ای با اختلاف فاز 180° تشکیل می‌دهند و مقدار آنها برابر نصف مقدار فشار الکتریکی تک فاز تغذیه u است.

۵-۷-۲ کارکرد

روند تغییرات فشار الکتریکی دایم u_d و مدت زمان هدایت هر تیرستور در شکل ۵-۱۸ نشان داده شده است.

در حالت اتصال پل تک فاز فشار الکتریکی دایم u_d از ترکیب دوفشار الکتریکی مؤلفه u_{d1} و u_{d2} ، که به دو گروه کموتاسیون مربوط می‌شوند به دست می‌آید. u_{d1} بین سر مثبت و نقطه خنثای مجازی N' اندازه گیری می‌شود. در صورتی که u_{d2} فشار الکتریکی بین سر منفی و همان نقطه خنثای مجازی است. همانند پل سه فاز، u_d برابر تفاضل دوفشار الکتریکی مؤلفه u_{d1} و u_{d2} است (به رابطه ۵-۴ مراجعه شود).

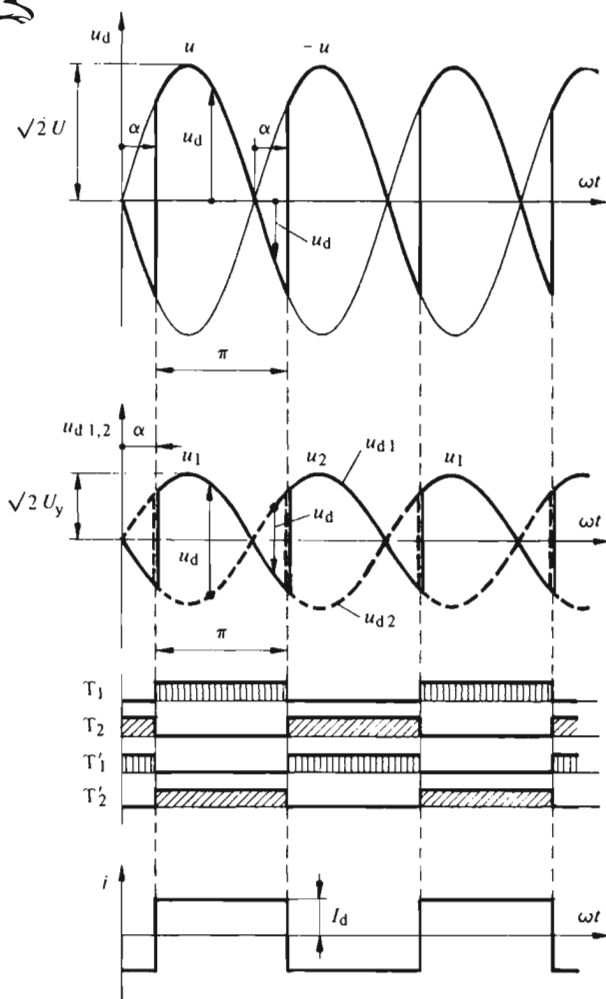
فشار الکتریکی مؤلفه u_{d1} از تکه‌های سینوسی u_1 و u_2 ، مربوط به هدایت تیرستورهای T_1 و T_2 تشکیل می‌شود. تیرستور متصل به مثبت ترین فشار الکتریکی (u_1 یا u_2) هادی است به شرط آنکه تپ روشن کننده‌ای برچکانده‌اش اعمال شده باشد. لحظه روشن شدن از زاویه تأخیر آتش α به دست می‌آید. این زاویه نسبت به محل تلاقی دو فشار الکتریکی ساده، که همان محل عبور از صفر فشار الکتریکی تغذیه u است، اندازه گیری می‌شود.

فشار الکتریکی مؤلفه گروه دوم کموتاسیون (u_{d2})، از تکه‌های سینوسی فشارهای الکتریکی ساده u_1 و u_2 ، مربوط به هدایت تیرستورهای T'_1 و T'_2 تشکیل می‌شود. در این گروه، تیرستور متصل به منفی ترین فشار الکتریکی u_1 یا u_2 هادی است، به شرط آنکه تپ روشن کننده‌ای بر آن اعمال شده باشد.

فشار الکتریکی دایم کل u_d که باز هم برابر تفاضل u_{d1} و u_{d2} است از تکه‌های سینوسی فشارهای الکتریکی یک سیستم دوفازه تشکیل می‌شود (به شکل ۵-۱۸ مراجعه شود). در تعیین روند تغییرات فشار الکتریکی دایم u_d ، معمولاً به جای u_1 و u_2 ، u — رسم می‌شود (به شکل ۵-۱۸ مراجعه شود). بنا بر این به جای فشارهای الکتریکی ساده مجازی، فشار الکتریکی مرکب به کار می‌رود. هر چند، به کار بردن فشارهای الکتریکی ساده مجازی، این مزیت را دارد که می‌توان اتصال پل تک فاز را با روابط کلی معتبر برای هر نوع اتصال مبدل‌های جریان، مورد بررسی قرارداد.

مقدار اوج فشار الکتریکی دایم u_d برابر $\sqrt{2}U$ است. U هم مقدار مؤثر فشار الکتریکی تک فاز تغذیه است.

جریان دایم I_d در گروه اول کموتاسیون به نوبت از تیرستورهای T_1 و T_2 و در گروه دوم از تیرستورهای T'_1 و T'_2 می‌گذرد. مدت زمان هدایت هر تیرستور معادل $\omega t = 180^\circ = \pi$ است. لازم است که تپ‌های روشن کننده به طور همزمان به دو تیرستور قطری پل یعنی به T_1 و T'_2 یا T_2 و T'_1 اعمال شوند.



شکل ۱۸-۵ روند تغییرات فشار الکتریکی دائم u_d ، جریان خط i و مدت زمان هدایت تیرستورها برای اتصال پل تک فاز.

در شکل ۱۸-۵ جریان i که از خط تغذیه پل تک فاز عبور می کند نیز نشان داده شده است. این جریان که در نیم دوره مثبت از طریق تیرستورهای T_1 و T'_2 و در نیم دوره منفی از طریق تیرستورهای T_2 و T'_1 می گذرد، متناوب، مستطیلی و با دامنه ای برابر مقدار دائم I_d است.

۳-۷-۵ شاخص ضربه و شاخص کموتاسیون

حتی در حالت اتصال پل تک فاز، دو گروه کموتاسیون متوالی به هم بسته شده اند.

بنابر این تعداد گروه‌های کموتاسیون متوالی شده یعنی s برابر ۲ است. چنانکه از شکل ۵-۱۸ برمی‌آید، شاخص ضربان p برای فشار الکتریکی داریم برابر ۲ است.

شاخص کموتاسیون در هر یک از دو گروه کموتاسیون نیز برابر ۲ است. دیده می‌شود که در اتصال پل تک‌فازه رابطه $p = sq$ برقرار نیست و علی‌رغم متوالی شدن دو گروه کموتاسیون، شاخص ضربان برخلاف حالت اتصال پل سه‌فازه دو برابر نشده است. زیرا دو فشار الکتریکی مؤلفه u_{a1} و u_{a2} در هر لحظه تنها در علامت اختلاف دارند.

۵-۸ اتصال پل تک‌فازه مختلط

۵-۸-۱ کلیات

اتصال پل سه‌فازه و تک‌فازه را می‌توان به ترتیب مختلط نیز ساخت، یعنی می‌توان به‌جای تیریس‌تورهای یک نیمه از پل دیود گذاشت. در نتیجه قیمت مبدل کاهش می‌یابد (با قدرت مساوی، دیود ارزان‌تر از تیریس‌تور است) و وسایل فرمان برای چکاننده‌ها ساده‌تر می‌شود. چه در قدرتهای کم (۱۰۰ W تا حدود ۵ kW) و چه در کاربردهای وسایل حمل و نقل (کشند) تک‌فازه با قدرتهای نسبتاً زیاد (۱ تا ۵ MW)، «اتصال پل تک‌فازه مختلط» اهمیت خاصی دارد. در اینجا به بررسی دو اتصال پل تک‌فازه مختلط می‌پردازیم. این دو اتصال در چگونگی کنترل باهم تفاوت دارند و عبارتند از: نیمه کنترل‌شده به‌طریق متقارن و نیمه کنترل‌شده به‌طریق نامتقارن.

۵-۸-۲ اتصال نیمه‌کنترل‌شده به‌طریق متقارن

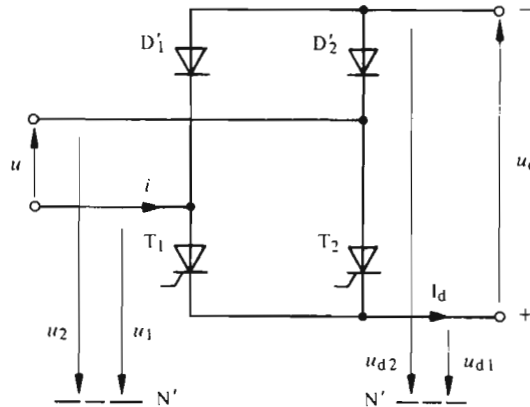
شکل ۵-۱۹ مداری را نشان می‌دهد که در آن به‌جای دو تیریس‌تور گروه کموتاسیون بالایی، دو دیود D'_1 و D'_2 قرار گرفته‌اند. این دو عنصر یکسوکننده کنترل نمی‌شوند. چون گروه کموتاسیون پایینی به‌طریق متقارن کنترل می‌شود، این اتصال را اتصال «نیمه‌کنترل‌شده به‌طریق متقارن» می‌نامند.

فشارهای الکتریکی متناوب u_1 و u_2 در این حالت نیز نسبت به نقطه خنثای مجازی N' اندازه‌گیری می‌شوند و سیستم دو‌فازه‌ای با اختلاف فاز 180° تشکیل می‌دهند.

۵-۸-۳ کارکرد

روند تغییرات فشار الکتریکی داریم u_h و مدت‌زمان هدایت دو تیریس‌تور و دو دیود در شکل ۵-۲۰ نشان داده شده‌اند.

مدار شکل ۵-۱۹ را می‌توان متشکل از دو گروه کموتاسیون متوالی شده دانست



شکل ۱۹-۵ اتصال پل تک فازۀ مختلف، نیمه کنترل شده به طریق متقارن.

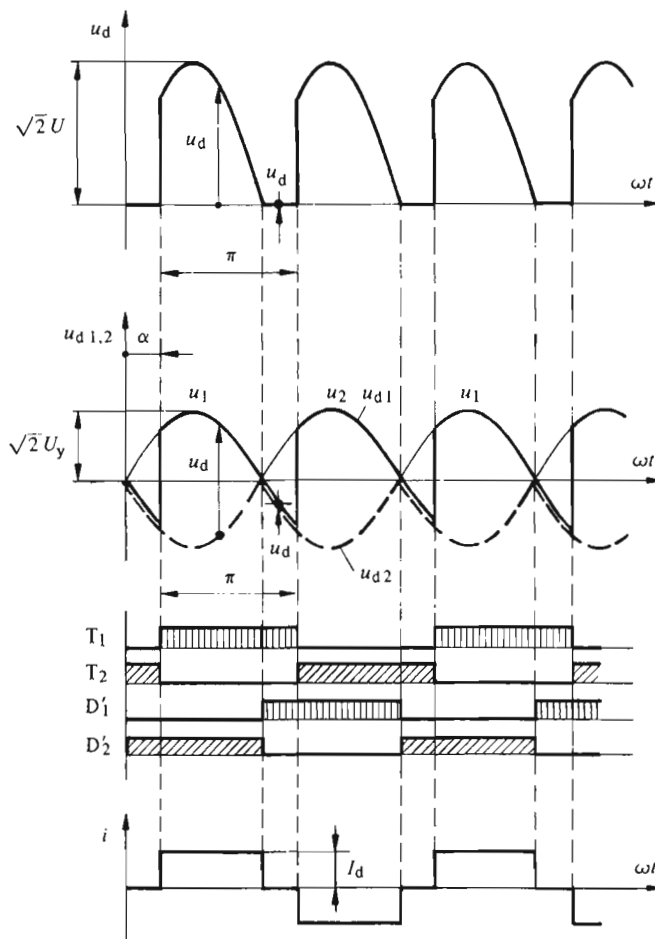
که یکی با زاویۀ تأخیر آتش α کنترل می شود (نیمۀ پایینی پل) و برای دیگری $\alpha = 0$ است (نیمۀ بالایی پل).

فشار الکتریکی مؤلفۀ u_{d1} بسته به زاویۀ تأخیر آتش α از تکه های سینوسی مثبت و منفی، مربوط به هدایت تیرستورهای T_1 و T_2 ، تشکیل شده است. فشار الکتریکی مؤلفۀ u_{d2} سراسر منفی است و بسته به هدایت دیودهای D_1' و D_2' از نیم دورهای منفی فشارهای الکتریکی u_1 و u_2 تشکیل می شود.

بنابر رابطه (۴-۵) فشار الکتریکی دایم کل u_d برابر تفاضل دو فشار الکتریکی مؤلفۀ u_{d1} و u_{d2} است، روند تغییرات آن را شکل ۵-۲۰ نشان می دهد. در فاصله های زمانی مربوط به ωt از ۰ تا α و از π تا $\pi + \alpha$ دو فشار الکتریکی دایم مؤلفۀ u_{d1} و u_{d2} با هم برابرند و فشار الکتریکی دایم u_d صفر است و هرگز نمی تواند منفی شود. این موضوع برای همه مدارهای مختلف معتبر است.

جریان دایم I_d بتناوب، در گروه اول کموتاسیون از طریق تیرستورهای T_1 و T_2 و در گروه دوم کموتاسیون از طریق دیودهای D_1' و D_2' می گذرد. هر تیرستور و هر دیود بمدت $\omega t = 180^\circ = \pi$ هدایت می کند. ولی هدایت تیرستورها نسبت به هدایت دیودها جابجا شده است. در فاصله های زمانی مربوط به ωt از ۰ تا α و از π تا $\pi + \alpha$ تیرستور و دیود متوالی در هر شاخه، هدایت می کنند. بنابراین پل مختلط، اتصال کوتاهی در طرف دایم از خود نشان می دهد.

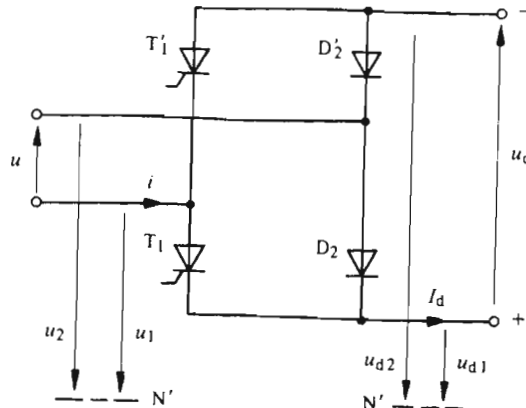
جریان i که از خط تغذیۀ پل می گذرد نیز در شکل ۵-۲۰ نشان داده شده است. این جریان که از جریانهای گذرنده از تیرستور T_1 و دیود D_1' تشکیل شده، متناوب مستطیلی است و دامنه ای برابر با جریان دایم I_d دارد. در فاصله های زمانی مربوط به ωt از ۰ تا α و از π تا $\pi + \alpha$ ، جریان i در طرف تغذیۀ متناوب صفر می شود.



شکل ۵-۲۰ روند تغییرات فشار الکتریکی دائم u_d ، جریان i و مدت زمان هدایت تیریسورها و دیودها برای اتصال پل تک فازه مختلط، نیمه کنترل شده به طریق متقارن.

۵-۸-۴ اتصال نیمه کنترل شده به طریق نامتقارن

اتصال پل تک فازه مختلط دیگری در شکل ۵-۲۱ نشان داده شده است. در این مدار به جای دو تیرستور متوالی شده در یکی از شاخه‌ها، دیودهای D_4 و D_4' قرار گرفته‌اند. چون هر گروه کموتاسیون از یک تیرستور و یک دیود تشکیل شده و در نتیجه به طریق نامتقارن کنترل می‌شود، این مدار را «نیم کنترل شده به طریق نامتقارن» می‌نامند.



شکل ۵-۲۱ اتصال پل تک فازۀ مختلط، نیمه کنترل شده به طریق نامتقارن.

در این حالت نیز، فشارهای الکتریکی u_1 و u_2 نسبت به یک نقطه خنثای مجازی N' اندازه گیری می شوند و سیستم دوفازۀ ای با اختلاف فاز 180° می سازند.

۵-۸-۵ کارکرد

برای اتصال نیمه کنترل شده به طریق نامتقارن، روند تغییرات فشار الکتریکی u_d و همچنین مدت زمان هدایت دوتریستور و دودیود در شکل ۵-۲۲ نشان داده شده اند.

حتی در این حالت نیز، مدار را می توان مشکل ازدو گروه کموتاسیون متوالی دانست. مع هذا، چنانکه شکل ۵-۲۲ نشان می دهد، هر گروه کموتاسیون به طریق نامتقارن کنترل می شود. در یک نیم دوره، روشن شدن تریستور T_1 (یا T'_1 به نوبه خود) با زاویه تأخیر آتش α انجام می پذیرد، در صورتی که دیود D_2 (یا D'_2 به نوبه خود) در نیم دوره بعدی یعنی با $\alpha = 0$ بلافاصله به هدایت می پردازد.

بنابراین فشارهای الکتریکی مؤلفه u_{d1} و u_{d2} دو گروه کموتاسیون (که نسبت به نقطه خنثای مجازی اندازه گیری می شوند) شکل نامتقارنی دارند. به عنوان مثال فشار الکتریکی مؤلفه u_{d1} در نیم دوره اول ابتدا منفی و برابر u_1 است و از لحظه مربوط به $\alpha = \omega t$ (روشن شدن تریستور T_1) به بعد مثبت و برابر u_1 می شود. در نیم دوره دوم این فشار الکتریکی سراسر مثبت و برابر u_1 است.

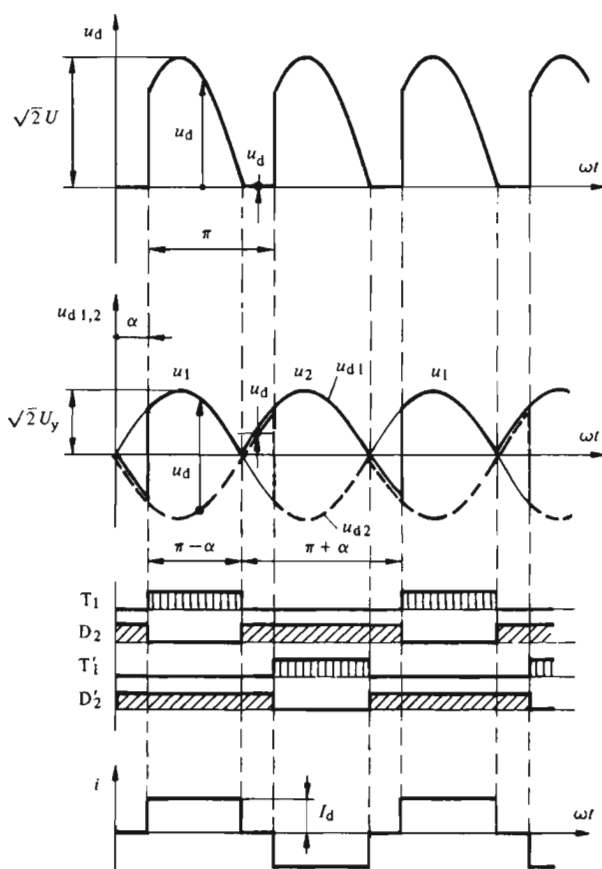
فشار الکتریکی مؤلفه u_{d2} شکلی همانند علامتی مخالف u_{d1} دارد و در نتیجه در بیشتر اوقات منفی است.

فشار الکتریکی دایم کل u_d از تفاضل u_{d1} و u_{d2} به دست می آید. روند تغییرات آن همانند روند تغییرات u_d برای مدار نیمه کنترل شده به طریق متقارن است و مقادیر لحظه ای

همواره مثبت دارد.

جریان دایم I_d ، در گروه اول کموتاسیون، بتناوب از طریق تیرستور T_1 و دیود D_2 و در گروه دوم کموتاسیون از تیرستور T'_1 و دیود D'_2 می‌گذرد. از شکل ۲۲-۵ نتیجه می‌شود که مدت زمان هدایت تیرستورها و دیودها یکسان نیست. تیرستورها در طول $\omega t = \pi - \alpha$ و دیودها در طول $\omega t = \pi + \alpha$ هادی‌اند. این رفتار، در تعیین ابعاد تیرستورها، به‌عنوان مزیتی به‌حساب می‌آید زیرا مقدار متوسط جریان جاری در تیرستورها کمتر از مقدار متوسط جریان جاری در دیودهاست.

بالاخره چنانکه از شکل ۲۲-۵ برمی‌آید، روند تغییرات جریان i ، در خط تغذیه، مانند حالت مدار نیمه کنترل شده به‌طریق متقارن است.



شکل ۲۲-۵ روند تغییرات فشار الکتریکی دایم u_d ، جریان خط i و مدت زمان هدایت تیرستورها و دیودها برای اتصال پل تک‌فاز نیمه کنترل شده به‌طریق نامتقارن.

۵-۸-۶ شاخص ضربان و شاخص کموتاسیون

در مدارهای پل تک فاز، دو گروه کموتاسیون با هم متوالی اند و بنابراین $s = 2$ است. البته باید توجه داشت که دو گروه کموتاسیون، کنترل متفاوتی دارند. از شکل‌های ۵-۲۰ و ۵-۲۲ نتیجه می‌شود که در این مدارها شاخص ضربان فشار الکتریکی داریم u_h ، $p = 2$ و شاخص کموتاسیون برای هر گروه کموتاسیون $q = 2$ است.

۵-۹ فشار الکتریکی داریم و مشخصه‌ایده‌ئال

۵-۹-۱ تعریف فشار الکتریکی داریم

چنانکه در بندهای پیش دیدیم، فشار الکتریکی خروجی u_h مبدل‌های جریان (که فشار الکتریکی داریم نامیده می‌شود) ثابت نیست بلکه در زمان تغییرات دوره‌ای دارد. بنابراین لازم است تا مفهوم فشار الکتریکی داریم، برای مبدل‌های جریان، با تعریف زیر گسترش داده شود: به طور کلی «هر فشار الکتریکی داریم» یک مقدار متوسط u_h مخالف صفر دارد که به آن یک «تموج» u_h اضافه می‌شود و مجموع $u_h + U_h$ «مقدار لحظه‌ای» u_h را می‌دهد. باید توجه داشت که در اینجا همواره نشانه U_h برای مقدار متوسط و نشانه u_h برای مقدار لحظه‌ای به کار می‌رود.

۵-۹-۲ روند تغییرات فشار الکتریکی داریم بر حسب زاویه تأخیر آتش

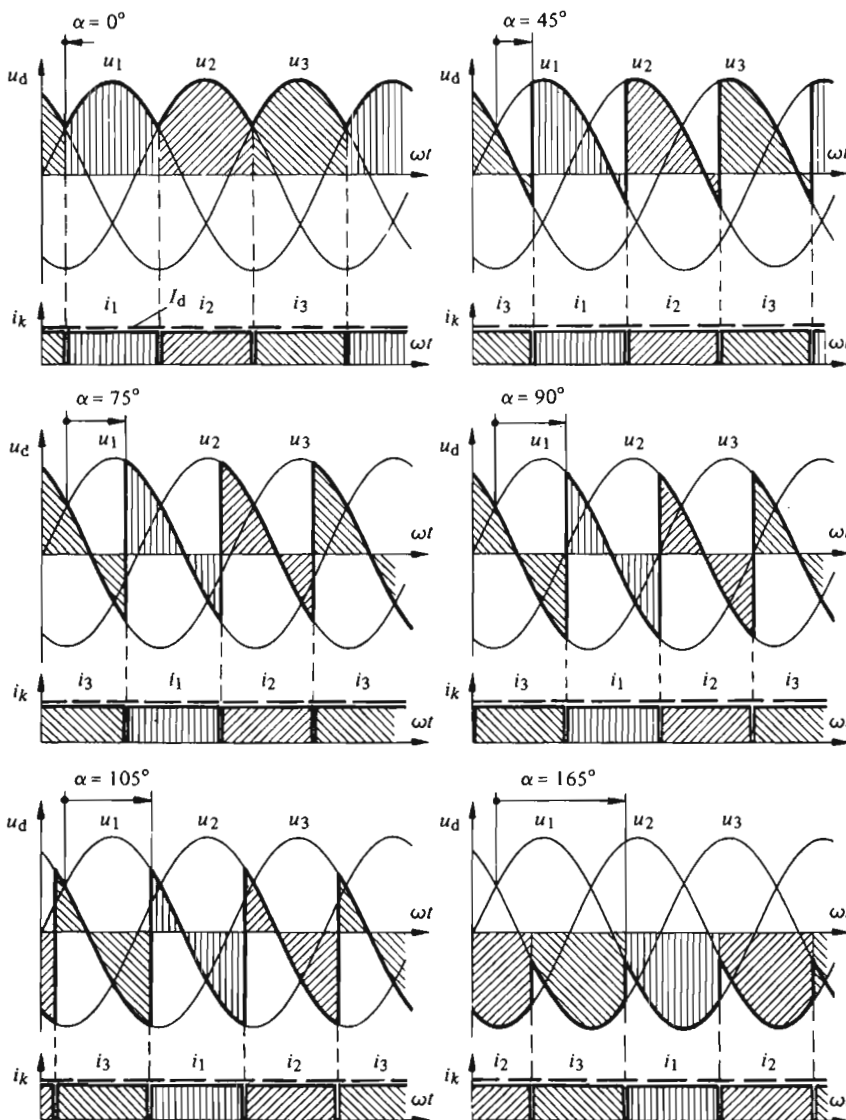
برای اتصال ستاره سه فاز، تأثیر زاویه تأخیر آتش α بر مقدار لحظه‌ای فشار الکتریکی داریم u_h ، در شکل ۵-۲۳ نشان داده شده است. این اتصال نمونه‌ای از یک گروه کموتاسیون با $q = 3$ است.

زاویه تأخیر آتش $\alpha = 0$ به کار مبدل به صورت یکسوکننده کنترل ناپذیر مربوط می‌شود. چنانکه خواهیم دید، در این حالت مقدار متوسط فشار الکتریکی داریم ماگزیم (بیشینه) است. اگر در مبدل‌های جریان به جای همه تیرستورها دیود قرار گیرد، روند تغییرات مشابهی برای فشار الکتریکی خروجی به دست خواهد آمد.

با افزایش زاویه تأخیر آتش، فشار الکتریکی u_h گهگاه منفی می‌شود (برای $\alpha > 30^\circ$) و در نتیجه مقدار متوسط آن کاهش می‌یابد. برای $\alpha = 90^\circ$ ، قسمتهای مثبت و منفی u_h با هم برابرند و مقدار متوسط u_h صفر است.

برای زوایای تأخیر آتش بیشتر از 90° ، اثر قسمتهای منفی u_h بیشتر است و مقدار متوسط آن منفی می‌شود. برای اینکه این حالت امکان پذیر باشد، باید جریان I_h همواره مثبت بماند. بدین ترتیب مبدل جریان به صورت اندولر کار خواهد کرد. بار با جریان داریم از طریق مبدل جریان قدرت اکتیو به شبکه متناوب می‌دهد. ویژگیهای کار کرد اندولر بعداً بررسی خواهد شد (به بند ۵-۶ مراجعه شود).

شکل ۲۳-۵ جابجایی جریانهای i_k ($k = 1, 2, 3$) گذرنده از تیرستورهای گروه کموتاسیون را بر حسب زاویه تأخیر آتش α نیز نشان می‌دهد.



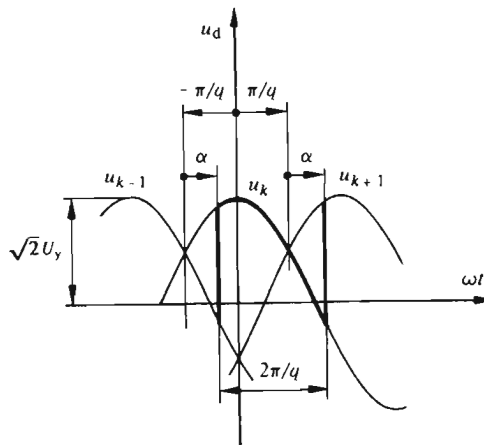
شکل ۲۳-۵ اثر زاویه تأخیر آتش α بر روند تغییرات فشار الکتریکی داریم در مبدل جریان با اتصال ستاره سه‌فاز.

۳-۹-۵ فشار الکتریکی دایم یک گروه کموتاسیون

برای تعیین مقدار متوسط فشار الکتریکی دایم یک گروه کموتاسیون، از شکل ۲۴-۵ کمک می‌گیریم. مناسب‌تر است تا تکه‌ای از فشار الکتریکی متناوب به صورت تابع $\cos \omega t$ بیان شود

$$u_k = \sqrt{2} U_y \cos \omega t \quad (۵-۵)$$

در این رابطه U_y مقدار مؤثر فشار الکتریکی ساده شبکه متناوب q فاز و q شاخص کموتاسیون گروه کموتاسیون است.



شکل ۲۴-۵ تعیین مقدار متوسط فشار الکتریکی دایم یک گروه کموتاسیون.

چون u_d تابعی تناوبی از زمان با دوره $2\pi/q$ است، برای محاسبه مقدار متوسط آن، انتگرال‌گیری در یک دوره یعنی در فاصله $2\pi/q$ کافی خواهد بود. مقدار متوسط «فشار الکتریکی دایم ایدئال» که به زاویه تأخیر آتش α بستگی دارد، با $U_{di\alpha}$ نشان داده می‌شود، که در آن زیرنویس d معرف دایم، زیرنویس i معرف ایدئال و زیرنویس α معرف وابستگی به زاویه تأخیر آتش α است. برای این فشار الکتریکی دایم ایدئال می‌توان نوشت

$$U_{di\alpha} = \frac{1}{2\pi/q} \int_{-\pi/q+\alpha}^{\pi/q+\alpha} \sqrt{2} U_y \cos \omega t \, d\omega t = \frac{q\sqrt{2}}{\pi} \sin \frac{\pi}{q} U_y \cos \alpha \quad (۶-۵)$$

این فشار الکتریکی برای $\alpha = 0$ ما گزیم (بیشینه) است و داریم

$$U_{dio} = \frac{q\sqrt{r}}{\pi} \sin \frac{\pi}{q} U_y \quad (7-5)$$

با در نظر گرفتن این واقعیت که در شبکه q فازه متعادل، رابطه زیر بین فشار الکتریکی مرکب U و فشار الکتریکی ساده U_y برقرار است

$$U = r \sin \frac{\pi}{q} U_y \quad (8-5)$$

رابطه (7-5) را می‌توان چنین نوشت

$$U_{dio} = \frac{q\sqrt{r}}{r\pi} U \quad (9-5)$$

U_{dio} ماگزیم فشار الکتریکی دایم ایدئالی است که گروه کموتاسیون می‌تواند، در حالت کار به صورت یکسوکننده، تولید کند.

5-9-4 فشار الکتریکی دایم مبدل جریان

با در نظر گرفتن تعداد گروه‌های کموتاسیون متوالی s ، می‌توان نتیجه فوق را برای مبدل‌های جریان، عمومیت داد. هرگاه کلیه گروه‌های کموتاسیون با زاویه تأخیر آتش یکسانی فرمان داده شوند، «ماگزیم فشار الکتریکی دایم ایدئال» U_{dio} از ضرب کردن رابطه (7-5) یا (9-5) در ضریب s به دست می‌آید

$$U_{dio} = \frac{sq\sqrt{r}}{\pi} \sin \frac{\pi}{q} U_y \quad (10-5)$$

و یا

$$U_{dio} = \frac{sq\sqrt{r}}{r\pi} U \quad (11-5)$$

چنانکه از رابطه (6-5) نتیجه می‌شود، رابطه زیر، صرف نظر از شاخص کموتاسیون q ، برقرار است

$$U_{di\alpha} = U_{dio} \cos \alpha \quad (12-5)$$

۵-۹-۵ فشار الکتریکی دایم در اتصال پل مختلط

در اتصال پل مختلط، کنترل دو گروه کموتاسیون متوالی شده با زاویه تأخیر آتش یکسانی انجام نمی‌پذیرد. در اتصال پل تک فازه مختلط نیمه کنترل شده به طریق متقارن، مطابق شکل ۵-۱۹، نیمی از پل با زاویه تأخیر آتش تنظیم پذیر کنترل می‌شود در صورتی که برای نیمه دیگر، α همواره برابر صفر است ($\cos\alpha = 1$). در این حالت چنانچه U_{di0} با $s = 2$ محاسبه شود، باید در نظر داشت که هر گروه کموتاسیون، نصف فشار الکتریکی اتصال پل مختلط را تأمین می‌کند.

بنابراین مقدار متوسط فشار الکتریکی دایم ایدئال چنین به دست می‌آید

$$U_{di\alpha} = U_{di0} \frac{1 + \cos\alpha}{2} \quad (5-13)$$

با انتگرال گیری فشار الکتریکی $\sqrt{2}U \sin\omega t$ بین دو حد π و $\omega t = \alpha$ نیز به همین نتیجه می‌رسیم. روند تغییرات فشار الکتریکی دایم u_d برای اتصال پل تک فازه مختلط نیمه کنترل شده به طریق نامتقارن، بنا بر شکل ۵-۲۱، همانند حالت قبلی است. و رابطه (۵-۱۳) می‌تواند برای محاسبه مقدار متوسط فشار الکتریکی دایم در این حالت نیز به کار رود. بر راحتی می‌توان نشان داد، که این رابطه برای دیگر اتصالهای پل مختلط و از جمله برای اتصال پل سه فازه مختلط نیز معتبر است.

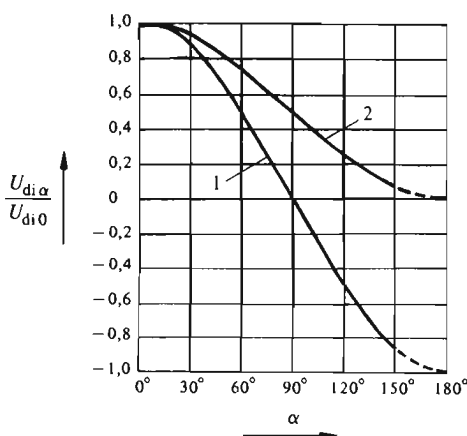
۵-۹-۶ فشار الکتریکی دایم در اتصال با پیچک جذب کننده

چنانکه در بند ۵-۵ بیان شد، اتصال با پیچک جذب کننده عبارت از اتصال موازی دو مبدل جریان است. پیچک جذب کننده اختلاف بین مقادیر لحظه‌ای دو فشار الکتریکی دایم را دریافت می‌کند. چون مقدار متوسط فشار الکتریکی در دو سر القاگر باید صفر باشد، مقدار متوسط فشارهای الکتریکی دایم تولید شده به توسط دو مبدل جریان باید برابر باشند. بنابراین لازم است تا هر دو مبدل با زاویه تأخیر آتش یکسانی کنترل بشوند. مقدار متوسط فشار الکتریکی دایم تولید شده به توسط اتصال با پیچک جذب کننده برابر مقدار متوسط فشار الکتریکی دایم یکی از دو مبدل جریان است و $U_{di\alpha}$ از رابطه (۵-۱۲) به دست می‌آید. در محاسبه U_{di0} باید s و q مربوط به هر مبدل جریان در نظر گرفته شود.

۵-۹-۷ مشخصه ایدئال

«مشخصه ایدئال» مبدل جریان، یعنی تغییرات نسبت $U_{di\alpha}$ به U_{di0} بر حسب زاویه تأخیر آتش α ، در شکل ۵-۲۵ نشان داده شده است. منحنی ۱ از رابطه (۵-۱۲) به دست می‌آید

و برای مبدل جریانی که کلیه عناصر یکسوکننده‌اش با یک زاویه تأخیر آتش کنترل می‌شوند (اتصالات معمولی) معتبر است. منحنی ۲ از رابطه (۵-۱۳) تبعیت می‌کند و فقط درباره مبدل‌های جریان مختلط اعتبار دارد.



شکل ۵-۲۵ مشخصه ایدئال مبدل جریان ۱: در اتصال‌های معمولی، ۲: در اتصال‌های مختلط.

در مبدل‌های جریان معمولی (منحنی ۱)، مقدار متوسط فشار الکتریکی داریم برای زاویه‌های تأخیر آتش واقع بین صفر و 90° ، مثبت است. در این ناحیه مبدل به صورت یکسو-کننده عمل می‌کند. برای α های واقع بین 90° و 180° ، $U_{di\alpha}$ منفی است و مبدل به صورت اندولر کار می‌کند. زاویه α ، جز در حالت کارکرد ایدئال نمی‌تواند به حد نهایی 180° برسد. در عمل، برای کار به صورت اندولر، این زاویه را باید در مرز 150° محدود کرد (به بند ۵-۶ مراجعه شود).

برای اتصال مختلط (منحنی ۲)، مقدار متوسط فشار الکتریکی داریم همواره مثبت است، و مبدل نمی‌تواند به صورت اندولر کار کند و برگشت انرژی امکان‌پذیر نیست. در حالت نیمه کنترل شده به طریق متقارن، گروه کموتاسیون متشکل از تیرستورها، برای زاویه‌های تأخیر آتش بیشتر از 90° به صورت اندولر کار می‌کند و با توجه به محدودیتی که برای زاویه α در حالت کار به صورت اندولر وجود دارد، نتیجه می‌شود که فشار الکتریکی داریم را نمی‌توان کاملاً صفر کرد. در عوض در حالت نیمه کنترل شده به طریق نامتقارن، هر دو گروه کموتاسیون یکسان و به‌طور مرکب کار می‌کنند و برای حالت کار به صورت اندولر، نباید محدودیتی را در نظر گرفت. در این حالت به ازای $\alpha = 180^\circ$ ، فشار الکتریکی داریم صفر می‌شود.

۵-۹-۸ شرایط کار

با توجه به شکل ۵-۲ و با استفاده از فشار الکتریکی متوسط $U_{di\alpha}$ ، می‌توان جریان دائم I_d جاری در بار را حساب کرد

$$I_d = \frac{U_{di\alpha} - U_i}{R} \quad (۵-۱۴)$$

با در نظر گرفتن این فرض که القاگری بار خیلی بزرگ است ($L \rightarrow \infty$)، مقدار لحظه‌ای جریان بار i_d برابر مقدار متوسط I_d آن است. چون جریان i_d همواره مثبت است (عناصر یکسو کننده یکطرفه‌اند)، لازم است تا $U_{di\alpha}$ بزرگتر از U_i باشد. در حالت عکس یعنی $U_{di\alpha} < U_i$ ، تیرستورها یا دیودها قطع‌اند و هیچ جریانی عبور نمی‌کند. برای اینکه بتوان جریان I_d را ثابت نگه داشت، لازم خواهد بود، تا همزمان با تغییر زاویه تأخیر آتش α ، فشار الکتریکی داخلی بار U_i تنظیم شود. بویژه برای $\alpha > 90^\circ$ ، فشار الکتریکی داخلی U_i باید منفی بشود. تنظیم فشار الکتریکی داخلی U_i در ماشین جریان دائم، با تغییر جریان تحریک و یا تغییر سرعت چرخش بسادگی امکان‌پذیر است.

۵-۱۰ جمع‌بندی

در جدول شکل ۵-۲۶ مهمترین داده‌های انواع اتصالهای مبدل جریان که در بالا بررسی شد، جمع‌بندی شده‌اند. در این جدول شاخص ضربه p ، شاخص کموتاسیون q ، تعداد گروهای کموتاسیون متوالی s و تعداد گروهای کموتاسیون موازی r آورده شده‌اند. همچنین با استفاده از روابط (۵-۱۰) و (۵-۱۱) نسبت ماگزیمم (بیشینه) فشار الکتریکی دائم ایدئال U_{dio} به مقدار مؤثر فشار الکتریکی ساده U_y و یا مرکب U شبکه تغذیه مبدل جریان بیان شده‌اند.

اتصال	p	q	s	r	U_{dio}/U_y	U_{dio}/U
ستاره سه فازه	۳	۳	۱	۱	۱٫۱۷۰	۰٫۶۷۵
ستاره تک فازه	۲	۲	۱	۱	۰٫۹۰۰	۰٫۴۵۰
ستاره شش فازه	۶	۶	۱	۱	۱٫۳۵۰	۰٫۳۵۰
با پیچک جذب کننده (ستاره سه فازه)	۶	۳	۱	۲	۱٫۱۷۰	۰٫۶۷۵
پل سه فازه	۶	۳	۲	۱	۲٫۳۳۹	۰٫۳۵۰
پل تک فازه	۲	۲	۲	۱	۱٫۸۰۱	۰٫۹۰۰
پل تک فازه مختلط	۲	۲	۲	۱	۱٫۸۰۱	۰٫۹۰۰

شکل ۵-۲۶ جدول خلاصه داده‌های انواع اتصالهای مبدل‌های جریان.

چنانچه سیستم تغذیه‌کننده مبدل جریان، سه فازه باشد، عموماً، از اتصال پل سه فازه که دارای شاخص ضربه بان بالایی است ($p=6$)، استفاده می‌شود. اغلب، بدون استفاده از ترانسفورماتور، می‌توان اتصال پل را مستقیماً به شبکه تغذیه وصل کرد. در صورتی که کلیه اتصالات دیگر با تغذیه سه فازه، احتیاج به ترانسفورماتور دارند. در اتصال ستاره شش-فازه که شاخص ضربه بان همچنان بالاست ($p=6$)، از تیرستورها بخوبی استفاده نمی‌شود. از این رو امروزه این اتصال به کار نمی‌رود. استفاده از اتصال پل پیچک جذب‌کننده در حالتی که فشار الکتریکی دایم پایین ($< 100V$) و ولی جریان دایم بالاست، مزیت دارد. جریان دایم زیاد بین دو گروه کموتاسیون تقسیم می‌شود.

افت فشار الکتریکی حاصل از عناصر یکسوکننده (به بند ۳-۵ مراجعه شود)، در این حالت برابر فشار الکتریکی مستقیم عنصر است. در صورتی که در اتصال پل سه فازه، به لحاظ متوالی شدن دو گروه کموتاسیون این افت فشار الکتریکی دو برابر می‌شود.

برای تغذیه تک فازه، بیشتر از اتصال پل استفاده می‌شود که می‌تواند مختلط نیز باشد. استفاده از اتصال پل مختلط در مواردی مطرح است که فشار الکتریکی دایم باید همواره مثبت باشد (کار به صورت اندولر مطرح نیست). با اتصال نیمه کنترل شده، فشار الکتریکی دایم را می‌توان صفر کرد.



فصل ششم

مبدل‌های جریان: پدیده تداخل^۱

۱-۶ مقدمه

۱-۱-۶ کلیات

کارکرد مبدل‌های جریان را در حالت ایدئال، یعنی بدون در نظر گرفتن اثر کموتاسیون طبیعی، در فصل پیش بررسی کردیم. کموتاسیون باعث پدید آمدن تداخلی در جریان‌های جاری در تیریسورها می‌شود.

در اینجا، ابتدا خود پدیده تداخل مورد بررسی قرار می‌گیرد (بند ۶-۲). سپس اثر آن در کاهش فشار الکتریکی دایم مبدل، که افت فشار الکتریکی القایی نامیده می‌شود و بر مشخصه‌های مبدل جریان تأثیر دارد، تشریح خواهد شد (بند ۶-۳). در بند ۶-۴، محدودیت‌هایی درباره فشار الکتریکی و جریان عناصر یکسوکننده داده خواهند شد تا در مطالعه کارکرد مبدل به صورت اندولر که عمل کموتاسیون باعث محدود شدن دامنه کار آن می‌شود، مورد استفاده قرار گیرند.

۲-۱-۶ فرض‌های مطالعه پدیده تداخل

برای مطالعه پدیده تداخل در مبدل‌های جریان، فرض‌های زیر در نظر گرفته خواهند شد:
- القاگری بار با جریان دایم (به شکل ۵-۲ مراجعه شود) بینهایت است

1) empîètement

$$L = \infty$$

(۱-۶)

– القاگری مدار کموتاسیون (به شکل ۲-۳ مراجعه شود) مقدار معینی دارد

$$L_c > 0$$

(۲-۶)

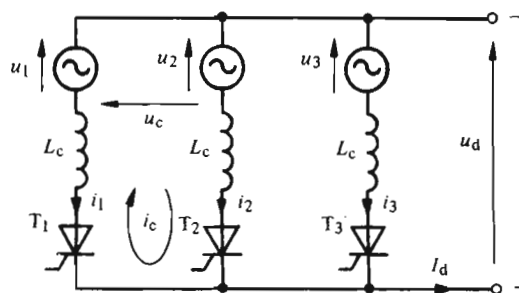
از فرض اول یعنی $L = \infty$ ، نتیجه می‌شود که جریان دایم i_c ، همانند حالت کارکرد ایدئال (فصل پنجم)، کاملاً صاف است.

فرض دوم یعنی $L_c > 0$ از جهشهای ناگهانی جریان در مدار کموتاسیون جلوگیری می‌کند و بدین ترتیب رفتار واقعی جریانها در طول پدیده تداخل به دست می‌آید.

۲-۶ پدیده تداخل

۱-۲-۶ تداخل در یک گروه کموتاسیون

برای مطالعه «پدیده تداخل» در یک گروه کموتاسیون از شکل ۱-۶ استفاده می‌کنیم که طرح واره (شمای^۱) معادل یک مبدل جریان با اتصال ستاره سه فاز را با تقریب خوبی نشان می‌دهد. القاگری اتصال کوتاه ترانسفورماتور تغذیه با L_c نشان داده شده است و در هر سه فاز مقدار یکسانی دارد. فشارهای الکتریکی ثانویه ترانسفورماتور به توسط منابع فشار الکتریکی متناوب u_1 ، u_2 و u_3 نشان داده شده‌اند که با هم سیستم سه فاز متعادلی را می‌سازند. برای نمایش «منبع فشار الکتریکی متناوب» از دایره‌ای که در داخلش نشانه \sim قرار دارد استفاده شده است.



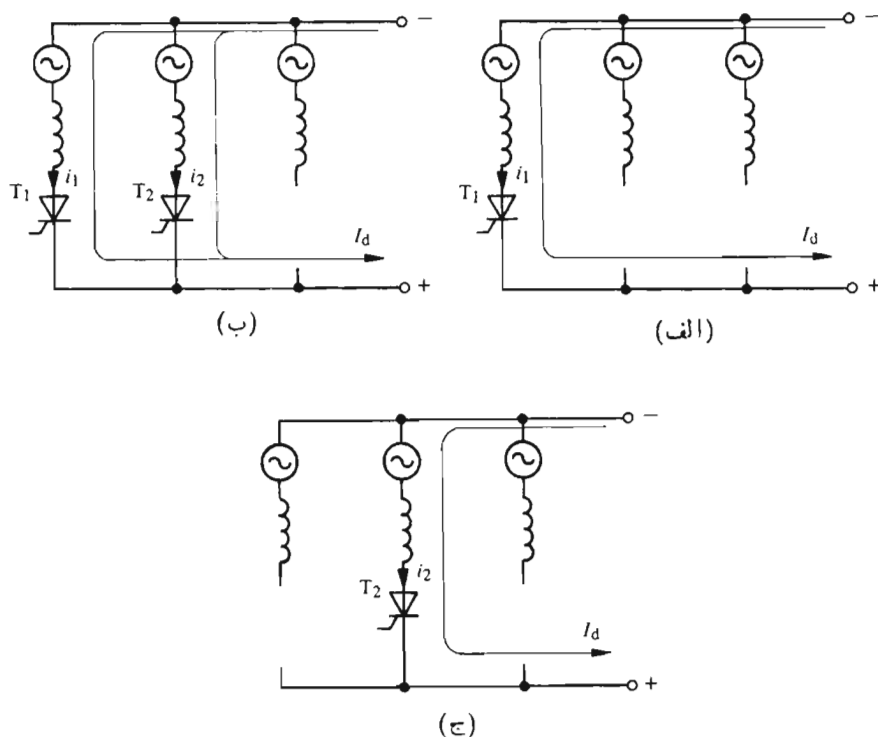
شکل ۱-۶ بررسی پدیده تداخل در اتصال ستاره سه فاز.

طرح واره (شمای^۱) فوق در مورد اتصالهای ستاره تک فاز و شش فاز نیز صادق است.

در حالت اول فقط دو منبع فشار الکتریکی، مربوط به يك سیستم دوفاز وجود دارد. در صورتی که در حالت دوم باید شش منبع فشار الکتریکی، که يك سیستم شش فاز می سازند در نظر گرفته شوند. ولی چون در مطالعه پدیده تداخل فقط عبور جریان از يك فاز به فاز دیگر مطرح است، تعداد فازها اثر ناچیزی در بررسی پدیده دارد.

در موقع کموتاسیون جریان I_d بین تیرستورهای T_1 و T_2 ، سه مرحله متمایز به چشم می خورد. این مراحل در شکل ۲-۶ نشان داده شده اند و در هر مرحله مسیر عبور جریان I_d مشخص شده است. فرض کنیم که مطابق شکل ۲-۶ الف تیرستور T_1 هادی است و جریان $i_1 = I_d$ از آن می گذرد. با روشن کردن تیرستور T_2 ، اتصال کوتاهی بین دو فاز ۱ و ۲ پدید می آید (شکل ۲-۶ ب) که چنانکه در بند ۲-۲-۳ گفته شد، باعث افزایش جریان i_2 و کاهش جریان i_1 می شود. در پایان کموتاسیون، مطابق شکل ۲-۶ ج، فقط تیرستور T_2 هادی است و جریان $i_2 = I_d$ از آن می گذرد. بنابراین طی مدت زمان معینی، بین دو فاز تداخل جریان وجود دارد.

در طول اتصال کوتاه بین دو فاز، فشار الکتریکی u_c ، معروف به «فشار الکتریکی کموتاسیون»، در مدار اثر می کند (شکل ۱-۶) و داریم



شکل ۲-۶ سه مرحله کموتاسیون جریان I_d از تیرستور T_1 به تیرستور T_2 .

$$u_c = u_2 - u_1 \quad (3-6)$$

برای اینکه تیرستور T_2 بتواند روشن شود، باید شرط $u_c \geq 0$ برقرار باشد. فشار الکتریکی u_c در حالت کلی برابر فشار الکتریکی مرکب سیستم q فازه است.

۳-۳-۶ زاویه تداخل يك گروه كموتاسيون

در اینجا برای يك گروه كموتاسيون با شاخص كموتاسيون q ، مدت زمان كموتاسيون را که بر حسب «زاویه تداخل μ » بیان می شود تعیین می کنیم. زاویه تداخل را با نشانه u نیز بیان می کنند ولی استفاده از این نشانه ممکن است باعث اشتباه با فشار الکتریکی بشود. علاوه بر این، در بیان زاویه معمولاً حرف یونانی به کار می رود.

برای محاسبه زاویه تداخل شکل ۳-۶ را در نظر می گیریم. در قسمت بالای شکل، فشارهای الکتریکی دوفازی که در حال كموتاسيون هستند (u_1 و u_2) نشان داده شده اند. بسته به انتخاب مبدأ محور زمان، فشار الکتریکی كموتاسيون را می توان چنین بیان کرد

$$u_c = \sqrt{2} U_c \sin \omega t \quad (4-6)$$

U_c ، مقدار مؤثر این فشار الکتریکی، در يك سیستم q فازه برابر مقدار مؤثر فشار الکتریکی مرکب چند ضلعی است، یعنی

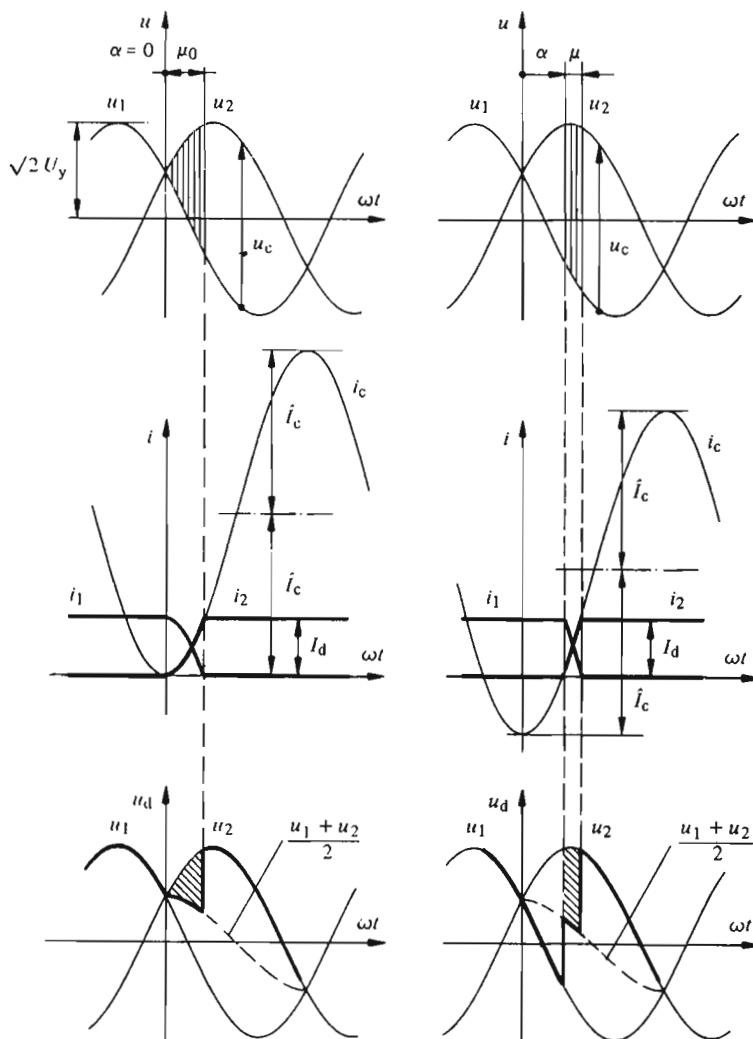
$$U_c = \sqrt{2} \sin \frac{\pi}{q} U_y \quad (5-6)$$

و U_y مقدار مؤثر فشار الکتریکی ساده است. با توجه به شکل ۱-۶، جریان اتصال کوتاه i_c را می توان از معادله دیفرانسیل زیر حساب کرد

$$\sqrt{2} L_c \frac{di_c}{dt} = u_c \quad (6-6)$$

با در نظر گرفتن اینکه به ازای $\omega t = \alpha$ ، یعنی در لحظه روشن شدن فاز جدید، جریان اتصال کوتاه باید صفر باشد، اذاتنگرال گیری رابطه فوق نتیجه می شود

$$i_c = \frac{\sqrt{2} U_c}{\sqrt{2} L_c \alpha \omega} \int \sin \omega t dt = I_c (\cos \alpha - \cos \omega t) \quad (7-6)$$



شکل ۳-۶ روند تغییرات فشارهای الکتریکی و جریان‌ها در طول پدیده تداخل برای $\alpha = 0^\circ$ و $\alpha = 40^\circ$.

در رابطه فوق I_c اوج (دامنه) جریان اتصال کوتاه در حالت پایاست.

$$I_c = \frac{\sqrt{2} U_c}{2 \omega L_c}$$

(۸-۶)

جریان اتصال کوتاه i_c برابر جریان i_p جاری در تیرستور T_p است. برای به دست آوردن این جریان کافی است تابع $i_c \cos \omega t - I_c$ را چنان بالا یا پایین ببریم تا در لحظه مربوط به $\omega t = \alpha$ ، جریان i_p برابر صفر شود (به شکل ۳-۶ مراجعه شود). مجموع جریانهای i_p و i_c باید برابر جریان دائم I_d بشود. چون القاگری بار بینهایت فرض شده، جریان دائم I_d ثابت است، و جریان i_c چنین به دست می آید

$$i_c = I_d - i_p = I_d - i_c \quad (9-6)$$

ملاحظه می شود که جریان i_p افزایش و جریان i_c کاهش می یابد. در لحظه مربوط به $\omega t = \alpha + \mu$ ، با صفر شدن جریان i_c ، تیرستور T_p خاموش می شود و کموتاسیون پایان می گیرد (به شکل ۳-۶ مراجعه شود). رابطه (۷-۶) فقط تا این لحظه یعنی فقط در طول کموتاسیون معتبر است. پس از خاتمه یافتن کموتاسیون تمامی جریان دائم I_d از تیرستور T_p می گذرد (به شکل ۳-۶ ج ۲ مراجعه شود). با قرار دادن $i_c = I_d$ و $\omega t = \alpha + \mu$ در رابطه (۷-۶) نتیجه می شود

$$\cos(\alpha + \mu) = \cos \alpha - \frac{I_d}{I_c} \quad (10-6)$$

که از آن می توان زاویه تداخل μ را حساب کرد. برای $\alpha = 0$ داریم

$$\cos \mu_0 = 1 - \frac{I_d}{I_c} \quad (11-6)$$

μ_0 را «زاویه تداخل اولیه» می نامند.

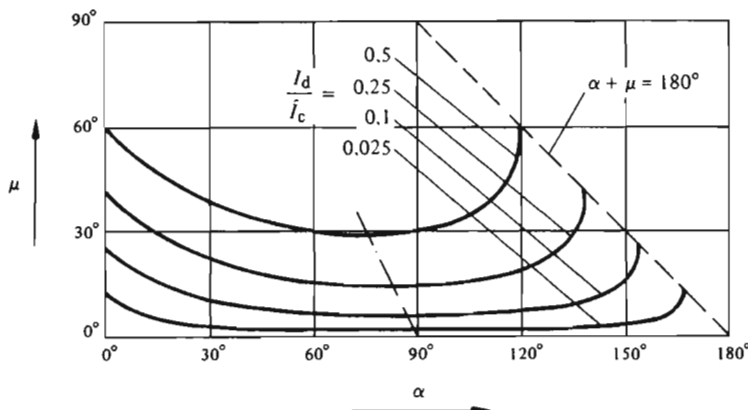
هدایت هر تیرستور نسبت به هدایت آن در حالت ایدئال که برابر $2\pi/q$ است، به اندازه زاویه تداخل μ افزایش می یابد. روند تغییرات جریان جاری در تیرستورها دیگر مستطیلی نیست و تقریباً حالت ذوزنقه ای پیدا می کند.

۳-۲-۶ بستگیهای زاویه تداخل

رابطه (۱۰-۶) نشان می دهد که زاویه تداخل به زاویه تأخیر آتش α و جریان دائم I_d بستگی دارد. برای هر مدار مشخص، I_c پارامتری است که با فشار الکتریکی U_c نسبت مستقیم و با القاگری اتصال کوتاه L_c نسبت معکوس دارد.

در شکل ۳-۶، بستگی زاویه تداخل μ به زاویه تأخیر آتش α برای مقادیر متفاوت I_d/I_c نشان داده شده است. زاویه تداخل با افزایش I_d/I_c ، افزایش می یابد و برای $\alpha = 0$ بهما گزیم مقدار خود یعنی μ_0 می رسد که به کارکرد یکسو کننده تمام موج یا مبدل های

جریانی که در آنها به جای تیرستور از دیود ساده استفاده شده است، مربوط می‌شود.



شکل ۴-۶ زاویه تداخل μ بر حسب زاویه تأخیر آتش α و نسبت I_d/I_c .

زاویه تداخل μ با افزایش زاویه تأخیر آتش α کاهش می‌یابد و به ازای $\alpha = 90^\circ$ $-\arcsin(I_d/2I_c)$ به مقدار می‌نیم (کمینه) خود می‌رسد. برای $\alpha > 90^\circ$ ، یعنی در ناحیه کارکرد به صورت اندولر، افزایش α باعث افزایش μ می‌شود. با توجه به اینکه باید $\alpha + \mu < \pi$ باشد، حدی برای کار وجود دارد. این شرط در بند ۳-۵-۶ تشریح خواهد شد.

روابط به دست آمده در بند ۲-۲ فقط در حالتی معتبرند که مدت زمان کموتاسیون از مدت زمان هدایت هر تیرستور، در حالت ایدئال، کمتر باشد ($\mu \leq 2\pi/q$). هرگاه این شرط برقرار نباشد، قبل از خاتمه یافتن کموتاسیون بین تیرستورهای T_1 و T_2 ، تیرستور موسمی نیز روشن می‌شود در نتیجه پدیده کموتاسیون چند گانه پیش می‌آید. این پدیده فقط در مواردی که جریان دائم I_d خیلی بالاست رخ می‌دهد. در این باره می‌توان به عنوان مثال به اتصال کوتاه بار اشاره کرد.

چون تیرستورها نمی‌توانند چنین جریانهای زیادی را، مگر برای مدت خیلی کوتاه، تحمل کنند (به بند ۳-۵ مراجعه شود)، در کارکرد حالت پایا مزیتی برای این حالت نیست.

۴-۲-۶ فشار الکتریکی دائم در حین تداخل

پدیده تداخل بر فشار الکتریکی دائم u_d نیز اثر دارد. در طول کموتاسیون، دو القاگر L_c ، که گذرگاه جریان i_c هستند، به صورت تقسیم کننده القایی فشار الکتریکی بین u_1 و u_2 عمل می‌کنند (به شکل ۱-۶ مراجعه شود). برای $\mu + \alpha \leq \omega t \leq \alpha$ ، مقدار لحظه‌ای فشار

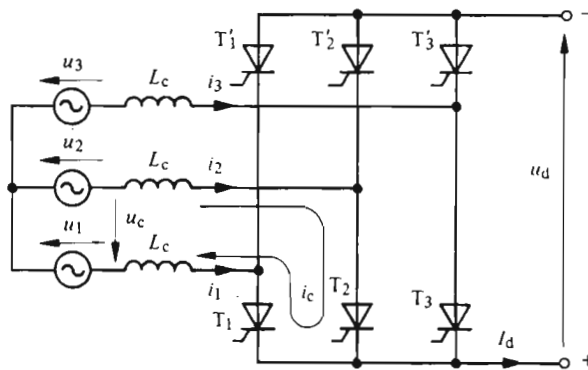
الکتریکی دایم عبارت است از

$$u_d = \frac{u_1 + u_2}{2} \quad (۱۲-۶)$$

از شکل ۳-۶ چنین برمی آید که فشار الکتریکی دایم u_d در حین کموتاسیون از مقدار ایدئال کمتر است. این موضوع باعث کاهش مقدار متوسط فشار الکتریکی دایم می شود. این پدیده در بند ۳-۶ به طور دقیقتر بررسی خواهد شد.

۵-۳-۶ تداخل در اتصال پل سه فاز

چنانکه شکل ۵-۶ نشان می دهد، در اتصال پل سه فاز، کموتاسیون جریان دایم I_d ، در اثر القاگری L_c طرف متناوب، تأخیر پیدا می کند. این القاگری بر آند کلیه القاگرهایی است که قبل از تیرستور قرار دارند (القاگری اتصالات، القاگری اتصال کوتاه ترانسفورماتور و شبکه تغذیه و حتی پیچکهای به کار رفته برای کموتاسیون). از القاگری اتصالات بین تیرستورها معمولاً می توان صرف نظر کرد و فقط در تأسیسات با قدرت بالا که ممکن است طول اتصالات زیاد باشد، در نظر گرفتن آن الزامی است.

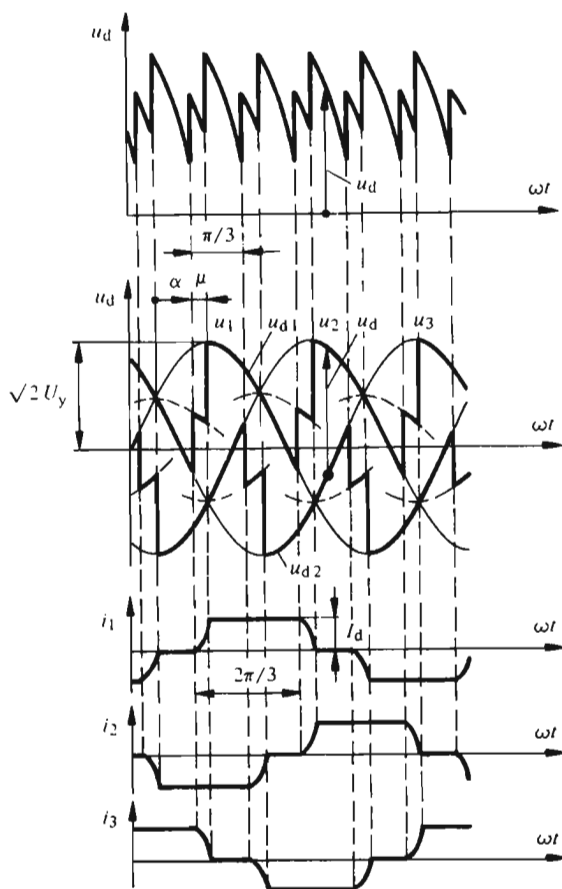


شکل ۵-۶ بررسی پدیده تداخل در اتصال پل سه فاز.

چنانکه در بند ۵-۶ بیان شد، در گروه اول کموتاسیون، جریان دایم I_d بترتیب از تیرستور T_1 به T_2 ، از T_2 به T_3 و از T_3 به T_1 انتقال می یابد. ترتیب انتقال این جریان، در گروه دوم کموتاسیون: از T'_1 به T'_2 ، از T'_2 به T'_3 و از T'_3 به T'_1 است. به هر حال در هر یک از دو گروه کموتاسیون روابط مربوط به پدیده تداخل همانند حالت

اتصال ستاره سه فازه است، زیرا کموتاسیون گروهها معمولاً مستقل از یکدیگرند. جریان اتصال کوتاه I_c و زاویه تداخل μ در روابط به دست آمده در بند ۲-۲ صدق می کنند. بدین ترتیب برای تعیین μ بر حسب α می توان از منحنیهای شکل ۴-۶ استفاده کرد. روند تغییرات فشار الکتریکی u_d با در نظر گرفتن اثر کموتاسیون، در شکل ۴-۷ نشان داده شده است. برای به دست آوردن u_d لازم است ابتدا روند تغییرات فشارهای الکتریکی مؤلفه u_{d1} و u_{d2} مشخص بشوند. فشارهای الکتریکی مؤلفه، در طول کموتاسیون برابر نصف مجموع مقادیر لحظه ای فشارهای الکتریکی ساده فازهای در حال کموتاسیون هستند (به رابطه ۱۲-۶ مراجعه شود).

روند تغییرات سه جریان i_1 ، i_2 و i_3 در ورودی پل نیز در شکل ۴-۷ نمایش داده شده است. این جریانها باز هم متناوب هستند و شکل تقریباً دوزنقه ای آنها نتیجه پدیده



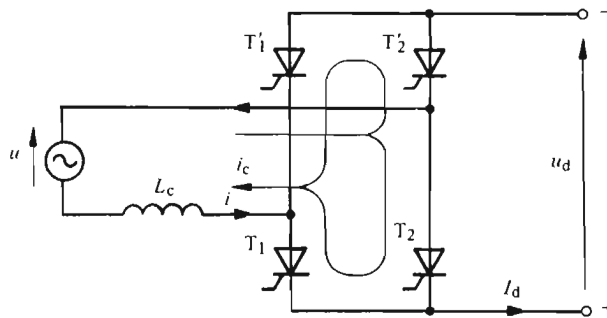
شکل ۴-۶ روند تغییرات فشارهای الکتریکی و جریانها در اتصال پل سه فازه با در نظر گرفتن پدیده تداخل.

کمو تاسیون است. مدتی که جریان در نیم دوره مثبت یا منفی، صفر نیست، در اینجا به اندازه زاویه تداخل μ نسبت به مقدار ایدئال $2\pi/3$ افزایش یافته است.

روابط بیان شده در بالا، در مورد این اتصال، فقط برای زوایای تداخل μ کوچکتر از 60° معتبرند. حالت $60^\circ < \mu$ فقط برای اضافه بارهای خیلی زیاد یا برای جریان اتصال کوتاه در طرف دایم پیش می آید. در این صورت کمو تاسیون دو گروه به طور همزمان روی می دهند و دیگر مستقل از هم نخواهند بود. از بررسی پدیده ای که بدین ترتیب اتفاق می افتد صرف نظر می کنیم.

۶-۲-۶ تداخل در اتصال پل تک فازه

طرح واره (شمای) معادل برای مطالعه پدیده تداخل در اتصال پل تک فازه در شکل ۶-۷ نشان داده شده است. چون تغذیه تک فازه مورد نظر است، القاگری اتصال کوتاه L_c (یا القاگری کمو تاسیون) می تواند فقط در یکی از خطوط تغذیه در نظر گرفته شود (بنابراین اگر اتصال پل تک فازه بین دو فاز از یک سیستم سه فازه وصل شده باشد، القاگری L_c دو برابر القاگری هر خط تغذیه خواهد بود). اتصال شکل ۶-۷ که به صورت پل متقارن است، این ویژگی را دارد که در آن کمو تاسیون دو گروه، همزمان انجام می پذیرد.



شکل ۶-۷ بررسی پدیده تداخل در اتصال پل تک فازه.

در موقع روشن شدن تیرستورهای T_1' و T_2 ، پل اتصال کوتاه می شود و تیرستورهای T_1 و T_2' هنوز هادی اند. جریان اتصال کوتاه i_c ، جریانهای تیرستورهای T_1' و T_2 را افزایش می دهد در صورتی که جریان تیرستورهای T_1 و T_2' کاهش می یابند تا به صفر برسند. در این موقع عمل کمو تاسیون پایان یافته و جریان i در خطوط تغذیه از $+I_d$ به $-I_d$ رسیده است.

جریان اتصال کوتاه i_c در معادله دیفرانسیل زیر صدق می کند

$$L_c \frac{di_c}{dt} = u_c = \sqrt{2} U \sin \omega t \quad (۱۳-۶)$$

از معادله فوق نتیجه می‌شود

$$i_c = \hat{I}_{cm} (\cos \alpha - \cos \omega t) \quad (۱۴-۶)$$

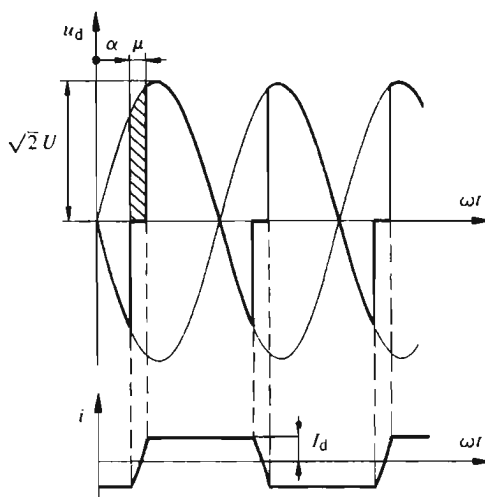
که در آن

$$\hat{I}_{cm} = \frac{\sqrt{2} U}{\omega L_c} \quad (۱۵-۶)$$

چنانکه در بالا نیز بیان کردیم، جریان اتصال کوتاه باید جریانی i را از $I_d +$ به $I_d -$ برساند، بنابراین تغییرات کل آن برابر $2I_d$ است و برای زاویه تداخل μ رابطه زیر به دست می‌آید

$$\cos(\alpha + \mu) = \cos \alpha - 2 \frac{I_d}{\hat{I}_{cm}} \quad (۱۶-۶)$$

چون $\hat{I}_{cm} = 2\hat{I}_c$ و بنا به رابطه (۵-۶)، فشار الکتریکی کموتاسیون $U_c = 2U_y = U$ است، در اینجا نیز به همان رابطه کلی بند ۲-۲ می‌رسیم.
در طول کموتاسیون، چون پل اتصال کوتاه شده، فشار الکتریکی u_d صفر است.
شکل ۸-۶ روند تغییرات فشار الکتریکی u_d و جریان i را نشان می‌دهد.



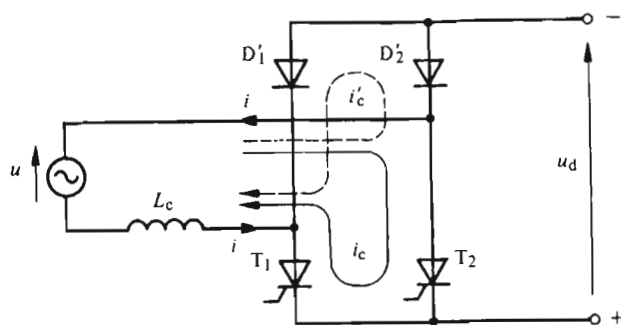
شکل ۸-۶ روند تغییرات فشار الکتریکی u_d و جریان i در اتصال پل تک‌فازه و با در نظر گرفتن پدیده تداخل.

۶-۲-۷ تداخل در اتصال پل تک فازه مختلط

برای مطالعه پدیده تداخل در اتصال پل تک فازه مختلط، طرح واره (شمای) معادل نشان داده شده در شکل ۹-۶ را به کار می‌بریم و خود را در مطالعه اتصال نیمه کنترل شده به طریق متقارن محدود می‌کنیم. نتایج به دست آمده، برای اتصال نیمه کنترل شده به طریق نامتقارن نیز معتبر خواهد بود.

در این حالت، دو گروه کموتاسیون، که از تیرستورهای T_1 و T_2 و دیودهای D'_1 و D'_2 تشکیل شده‌اند، معمولاً مستقل از یکدیگر عمل کموتاسیون را انجام می‌دهند. پس از روشن شدن تیرستور T_1 (با زاویه تأخیر آتش α)، جریان اتصال کوتاه i_c از طریق تیرستورهای T_1 و T_2 می‌گذرد و باعث افزایش جریان در تیرستور T_1 و کاهش جریان در تیرستور T_2 تا خاموشی آن می‌شود. این جریان اتصال کوتاه توسط رابطه (۱۴-۶) بیان می‌شود. چون جریان i قبل از روشن شدن تیرستور T_1 در خطوط تغذیه صفر است (به شکل ۱۰-۶ مراجعه شود) و سپس از صفر به I_d تغییر پیدا می‌کند؛ بنابراین، تغییر کل آن برابر I_d است و از رابطه (۱۴-۶) رابطه زاویه تداخل چنین به دست می‌آید

$$\cos(\alpha + \mu) = \cos \alpha - \frac{I_d}{I_{cm}} \quad (۱۷-۶)$$

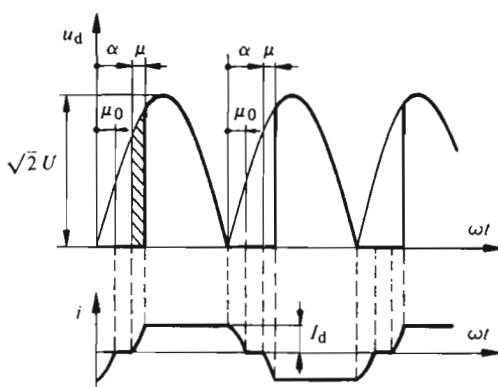


شکل ۹-۶ مطالعه پدیده تداخل در اتصال پل تک فازه مختلط.

از طرف دیگر، به محض منفی شدن فشار الکتریکی u ، دیود D'_2 با زاویه تأخیر آتش $\alpha = 0$ هادی می‌شود. در نتیجه چنانکه شکل ۹-۶ نشان می‌دهد جریان اتصال کوتاه i_c جاری می‌شود که جریان دیود D'_2 را افزایش و جریان دیود D'_1 را کاهش می‌دهد. جریان i از I_d تا صفر تغییر می‌کند و با قراردادن $\alpha = 0$ و $i_c = I_d$ در رابطه (۱۴-۶)، زاویه تداخل μ_0 به دست می‌آید.

$$\cos \mu_o = 1 - \frac{I_d}{\hat{I}_{cm}} \quad (18-6)$$

روند تغییرات فشار الکتریکی دایم u_d و جریان i در خطوط تغذیه را شکل ۱۰-۶ نشان می‌دهد. کموتاسیون بین دو دیود (زاویه تداخل μ_o) هیچ اثری بر روی فشار الکتریکی دایم ندارد زیرا در اتصال مختلط، فشار الکتریکی دایم در این لحظه صفر است. در عوض، کموتاسیون از یک تیرستور به دیگری، مدت صفر بودن فشار الکتریکی u_d را، به اندازه زمان مربوط به زاویه تداخل μ ، افزایش می‌دهد.



شکل ۱۰-۶ روند تغییرات فشار الکتریکی دایم u_d و جریان i در اتصال پل تک‌فاز مختلط و با در نظر گرفتن پدیده تداخل.

روابط به دست آمده در بالا فقط به شرط $\mu_o > \alpha$ معتبرند. هر گاه $\alpha < \mu_o$ باشد، کموتاسیون دو گروه، دیگر مستقل از هم انجام نخواهد شد. برای $\alpha = 0$ همان شرایط پل متقارن به دست می‌آید. در این حالت جریان i از $+I_d$ به $-I_d$ می‌رسد و تغییر کل آن به اندازه $2I_d$ است. با استفاده از رابطه (۱۴-۶) و با قرار دادن $\alpha = 0$ و $i_o = 2I_d$ ، زاویه تداخل μ'_o برای این حالت خاص، به قرار زیر به دست می‌آید

$$\cos \mu'_o = 1 - 2 \frac{I_d}{\hat{I}_{cm}} \quad (19-6)$$

۳-۶ افت فشار الکتریکی القایی و مشخصه بار

۱-۳-۶ افت فشار الکتریکی القایی

چنانکه در بند ۴-۲-۶ دیدیم، پدیده تداخل باعث کاهش مقدار لحظه‌ای فشار الکتریکی



دایم، در طول کموتاسیون می‌شود. در نتیجه مقدار متوسط فشار الکتریکی دایم $U_{d\alpha}$ کمتر از مقدار ایدئال $U_{di\alpha}$ حساب شده به توسط رابطه (۵-۱۲) است. اختلاف بین این دو مقدار را در زبان فنی با D_x نشان می‌دهند و «افت فشار الکتریکی القایی» می‌نامند.

$$D_x = U_{di\alpha} - U_{d\alpha} \quad (۲۰-۶)$$

افت فشار الکتریکی القایی با مساحت «فشار الکتریکی- زمان» سایه خورده در منحنی u_d شکل ۳-۶ متناسب است. این مساحت با نصف مساحت «فشار الکتریکی - زمان» مربوط به فشار الکتریکی کموتاسیون u_c برابر است (به شکل ۳-۶ مراجعه شود). چون در هر گروه کموتاسیون، معمولاً پدیده کموتاسیون با دوره $2\pi/q$ تکرار می‌شود، برای محاسبه مقدار متوسط افت فشار الکتریکی القایی، باید مساحت «فشار الکتریکی - زمان» را بر $2\pi/q$ تقسیم کرد. هرگاه S گروه کموتاسیون با هم متوالی شده باشند، لازم است افت فشار الکتریکی القایی یک گروه کموتاسیون در ضریب S ضرب شود. بنابراین افت فشار الکتریکی القایی در مبدل جریان برابر است با

$$\begin{aligned} D_x &= \frac{s}{2\pi/q} \frac{1}{2} \int_{\alpha}^{\alpha+\mu} \sqrt{2} U_c \sin \omega t d\omega t \\ &= \frac{sq\sqrt{2}U_c}{4\pi} [\cos \alpha - \cos(\alpha+\mu)] \end{aligned} \quad (۲۱-۶)$$

و با توجه به رابطه (۶-۱۰) می‌توان نوشت

$$D_x = \frac{sq\sqrt{2}U_c}{4\pi} \cdot \frac{I_d}{\hat{I}_c} \quad (۲۲-۶)$$

بالاخره با جایگزین کردن \hat{I}_c از رابطه (۸-۶)، نتیجه می‌شود

$$D_x = \frac{sq}{2\pi} \omega L_c I_d \quad (۲۳-۶)$$

بنابراین، افت فشار الکتریکی القایی در مبدل جریان، با جریان دایم I_d و رثکتانس^۱ اتصال کوتاه $X_c = \omega L_c$ متناسب است. باید یادآوری کرد که افت فشار الکتریکی القایی مستقل از زاویه تأخیر آتش α است.

۳-۳-۶ افت فشار الکتریکی القایی در اتصال پل تک فازه

در اتصال پل تک فازه متقارن، افت فشار الکتریکی القایی با مساحت سایه خورده در شکل ۸-۶ متناسب است. بنابراین داریم

$$D_x = \frac{1}{\pi} \int_{\alpha}^{\alpha+\mu} \sqrt{2} U \sin \omega t \, d\omega t = \frac{\sqrt{2} U}{\pi} [\cos \alpha - \cos(\alpha + \mu)] \quad (24-6)$$

رابطه فوق را می‌توان با استفاده از رابطه‌های (۱۵-۶) و (۱۶-۶) به صورت زیر تبدیل کرد

$$D_x = \frac{\sqrt{2} U}{\pi} \cdot \frac{I_d}{I_{cm}} = \frac{2}{\pi} \omega L_c I_d \quad (25-6)$$

ملاحظه می‌شود که اگر در رابطه کلی (۲۳-۶)، برای اتصال پل تک فازه، $q=2$ و $s=2$ قرار داده شود، دقیقاً همین رابطه به دست می‌آید.

در حالت اتصال پل مختلط، افت فشار الکتریکی القایی با سطح سایه خورده در شکل ۱۵-۶ متناسب است. در این حالت نیز رابطه (۲۴-۶) معتبر است ولی زاویه تداخل μ از معادله (۱۷-۶)، به شرط $\alpha > \mu$ ، نتیجه می‌شود. با در نظر گرفتن اینکه I_{cm} توسط رابطه (۱۵-۶) داده شده است داریم

$$D_x = \frac{\sqrt{2} U}{\pi} \cdot \frac{I_d}{I_{cm}} = \frac{1}{\pi} \omega L_c I_d \quad (26-6)$$

بنابراین، برای اتصال پل تک فازه مختلط، افت فشار الکتریکی القایی نصف این افت در پل متقارن است. در این حالت خاص رابطه کلی (۲۳-۶) معتبر نیست.

۳-۳-۶ افت فشار الکتریکی القایی نسبی

افت فشار الکتریکی القایی اغلب به صورت نسبی و نسبت به ماگزیمم (بیشینه) فشار الکتریکی داریم ایدئال یعنی U_{dio} بیان می‌شود. بنابراین، «افت فشار الکتریکی القایی نسبی» با رابطه زیر تعریف می‌شود

$$d_x = \frac{D_x}{U_{dio}} \quad (27-6)$$

با جایگزینی مقدار D_x از رابطه (۲۲-۶) و مقدار U_{dio} از رابطه (۱۱-۵) و با در نظر گرفتن



اینکه فشار الکتریکی اتصال کوتاه U_c برابر فشار الکتریکی مرکب چند ضلعی U است، این رابطه به صورت زیر درمی آید

$$d_x = \frac{1}{2} \frac{I_d}{I_c} \quad (28-6)$$

d_x را همچنین می توان از تقسیم رابطه (21-6) به U_{dio} که در رابطه (5-11) بیان شده است بدست آورد

$$d_x = \frac{\cos \alpha - \cos (\alpha + \mu)}{2} \quad (29-6)$$

یافتن ارتباطی بین d_x و زاویه تداخل ابتدایی μ_0 (یعنی مربوط به $\alpha = 0$) جالب توجه است. نسبت I_d/I_c را می توان از رابطه (6-11) بدست آورد و در رابطه (28-6) قرار داد، در نتیجه

$$d_x = \frac{1 - \cos \mu_0}{2} \quad (30-6)$$

برای اتصال پل تک فازه مختلط، رابطه (29-6) معتبر می ماند ولی برای معتبر بودن رابطه (28-6) باید I_{cm} را جایگزین I_c کرد. در هر دو حالت باید $\alpha > \mu_0$ باشد که μ_0 از رابطه (6-18) بدست می آید.

۴-۳-۶ مقاومت داخلی مبدل جریان

توجه به این موضوع که القایی بودن مدار کموتاسیون موجب افتی، متناسب با جریان I_d ، در فشار الکتریکی داریم می شود (به رابطه 23-6 مراجعه شود)، بسیار حایز اهمیت است. این پدیده با مقاومت معادلی بدنام «مقاومت داخلی R_i »، که تحت جریان داریم مشخص I_d همان افت فشار الکتریکی D_x را پدید می آورد می تواند به حساب آید. بنابراین داریم

$$D_x = R_i I_d \quad (31-6)$$

از مقایسه رابطه فوق با رابطه (23-6) نتیجه می شود

$$R_i = \frac{s q}{2 \pi} \omega L_c \quad (32-6)$$

با اینکه افت فشار الکتریکی القایی در اثر یک القاگری به وجود آمده، مقاومت داخلی معادل، یک مقاومت اهمی است، زیرا که مبدل جریان وسیله‌ای غیر خطی و ناپیوسته است و در این حالت روش‌های برهم‌نهی^۱ سیستم‌های خطی و پیوسته معتبر نیست. مع‌هذا مقاومت R_i یک «مقاومت مجازی» است و در آن تلفات اکتیو پدید نمی‌آید.

۵-۳-۶ افت فشارهای الکتریکی دیگر

در مبدل جریان چندین افت فشار الکتریکی دیگر نیز وجود دارد که از مقاومت اهمی سیم‌پیچ‌های ترانسفورماتور و اتصالات و همچنین فشار الکتریکی مستقیم عناصر یکسوکننده ناشی می‌شوند.

افت فشار الکتریکی ناشی از مقاومت اهمی، با جریان دائم I_d متناسب است. چنانکه شکل ۳-۳ نشان می‌دهد، افت فشار الکتریکی ناشی از فشار الکتریکی مستقیم عناصر یکسوکننده، شامل یک فشار الکتریکی آستانه U_{FS} مستقل از جریان و یک تغییر فشار الکتریکی اضافی بر حسب مقاومت دیفرانسیلی R_{diff} است. در این مورد باید متوالی شدن عناصر یکسوکننده، به‌ویژه در اتصال پل، در نظر گرفته شود. معمولاً این افت فشار الکتریکی نسبتاً کوچک و قابل اغماض است. ولی در مبدل‌های جریان با فشارهای الکتریکی دائم پایین (کمتر از ۲۰ تا ۳۰ ولت) و جریان‌های خیلی بالا در نظر گرفتن این اثر الزامی است. در بندهای بعدی از این افت فشارهای الکتریکی صرف نظر خواهیم کرد.

۶-۳-۶ فشار الکتریکی دائم در مبدل جریان

با در نظر گرفتن افت فشار الکتریکی القایی، مقدار متوسط فشار الکتریکی دائم $(U_{d\alpha})$ در مبدل جریان از رابطهٔ زیر به‌دست می‌آید

$$U_{d\alpha} = U_{di\alpha} - D_x \quad (۳۳-۶)$$

با جایگزین کردن $U_{di\alpha}$ از رابطهٔ (۱۲-۵) و D_x از رابطهٔ (۲۷-۶) نتیجه می‌شود

$$U_{d\alpha} = U_{di\alpha} (\cos \alpha - d_x) \quad (۳۴-۶)$$

باید توجه داشت که در این رابطه افت فشار الکتریکی القایی نسبتی d_x با جریان I_d جاری در بار متناسب است.

با جایگزین کردن d_x از رابطهٔ (۲۹-۶) عبارت دیگری برای $U_{d\alpha}$ به‌دست می‌آید

$$U_{d\alpha} = U_{dio} \frac{\cos \alpha + \cos(\alpha + \mu)}{2} \quad (35-6)$$

این رابطه اثر زاویه تأخیر آتش α و زاویه تداخل μ را بر فشار الکتریکی $U_{d\alpha}$ نشان می‌دهد.

۷-۳-۶ فشار الکتریکی دائم در اتصال پل مختلط

برای مبدل جریان با اتصال پل مختلط، از رابطه (۳۳-۶) و با جایگزینی U_{dio} از رابطه (۱۳-۵)، نتیجه می‌شود

$$U_{d\alpha} = U_{dio} \left(\frac{1 + \cos \alpha}{2} - d_x \right) \quad (36-6)$$

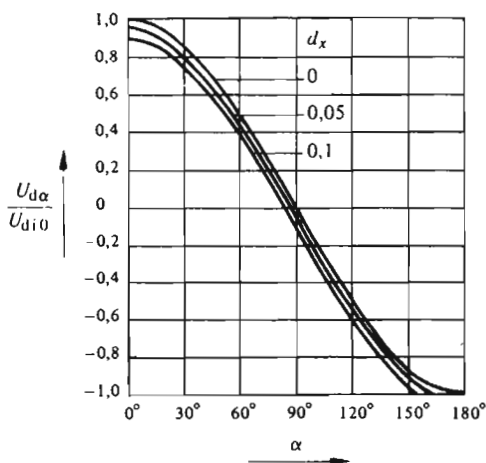
با قرار دادن مقدار d_x از رابطه (۲۹-۶) برای $U_{d\alpha}$ به دست می‌آید

$$U_{d\alpha} = U_{dio} \frac{1 + \cos(\alpha + \mu)}{2} \quad (37-6)$$

ملاحظه می‌شود که، اگر α جایگزین $\alpha + \mu$ بشود این رابطه همان رابطه (۱۳-۵) است.

۸-۳-۶ مشخصه بار

رابطه (۳۴-۶) امکان می‌دهد تا «مشخصه بار» را که در شکل ۱۱-۶ نشان داده شده است

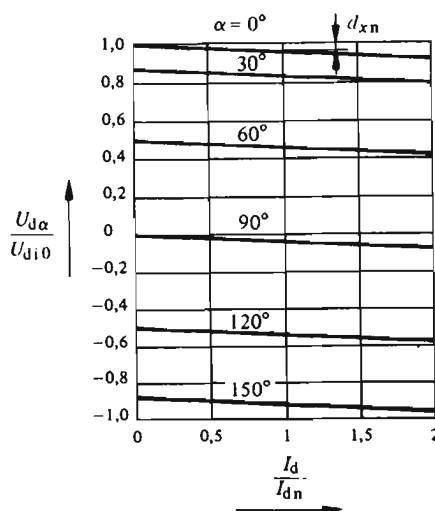


شکل ۱۱-۶ مشخصه بار، $U_{d\alpha}/U_{dio}$ بر حسب α .

رسم کنیم. با در نظر گرفتن d_x به عنوان پارامتر، سه منحنی برای $U_{d\alpha}/U_{di0}$ رسم شده است. مقادیر d_x مساوی ۰،۵ و ۰،۱ و به ترتیب به زوایای تداخل ابتدایی μ_0 مساوی 0° (کار در حالت بی باری)، 26° و 37° مربوط می‌شوند. دو حالت اخیر معمولاً فقط در حالت بارداری پیش می‌آیند. دیده می‌شود که، مشخصه ایدئال (مربوط به $d_x = 0$) به علت افت فشار الکتریکی القایی به طور عمودی به طرف پایین جابجا می‌شود.

شکل ۶-۱۲ تغییرات $U_{d\alpha}/U_{di0}$ را بر حسب نسبت جریان دایم I_d به جریان اسمی I_{dn} نشان می‌دهد و در آن زاویه تأخیر آتش α به عنوان پارامتر ظاهر شده است. فرض می‌شود که در حالت کاری که جریان دو برابر جریان اسمی است، زاویه ابتدایی تداخل $\mu_0 = 33^\circ$ باشد. این مشخصه‌ها خطی‌اند و شیب آنها به خط بار منبع فشار الکتریکی که دارای مقاومت داخلی R_i است مربوط می‌شود. d_{xn} افت فشار الکتریکی القایی نسبی برای جریان دایم اسمی است.

در این دو مشخصه، مقادیر مثبت فشار الکتریکی دایم $U_{d\alpha}$ مربوط به کار کرده صورت یکسو کننده است، در صورتی که در حوزه کار به صورت اندولر فشار الکتریکی دایم، منفی است.



شکل ۶-۱۲ مشخصه بار $U_{d\alpha}/U_{di0}$ بر حسب I_d/I_{dn} .

اتصالات مختلط، بویژه اتصال پل تک فازه مختلط، مشخصه‌های بار مشابهی دارند با این تفاوت که فشار الکتریکی دایم $U_{d\alpha}$ در آنها نمی‌تواند منفی شود. در اینجا از نمایش این مشخصه‌ها خودداری می‌کنیم.

۹-۳-۶ شرایط کارکرد

برای مبدل جریان و با استفاده از مقاومت داخلی مجازی می‌توان نوشت

$$U_{d\alpha} = U_{di\alpha} - R_i I_d \quad (۳۸-۶)$$

از طرف دیگر، بنابه شکل ۵-۲ برای بار با جریان دایم رابطه زیر برقرار است

$$U_{d\alpha} = U_i + R I_d \quad (۳۹-۶)$$

با حذف کردن $U_{d\alpha}$ میان دو رابطه بالا، جریان I_d به دست می‌آید

$$I_d = \frac{U_{di\alpha} - U_i}{R + R_i} \quad (۴۰-۶)$$

و این همان رابطه بند ۵-۸-۹ است، با این تفاوت که مقاومت بار R دیگر بنتهایی وارد نمی‌شود بلکه به اندازه مقاومت داخلی مجازی R_i افزایش می‌یابد.

چون مبدل جریان فقط برای جریانهای I_d مثبت کار می‌کند، شرط $U_{di\alpha} > U_i$ باید برای کارکرد با جریانهای غیر صفر رعایت شود. هرگاه ثابت نگه داشتن جریان I_d مورد نظر باشد، ناچار فشار الکتریکی داخلی U_i با تغییرات $U_{di\alpha}$ تطبیق داده می‌شود.

۴-۶ محدودیتهای عناصر یکسوکننده

۱-۴-۶ کلیات

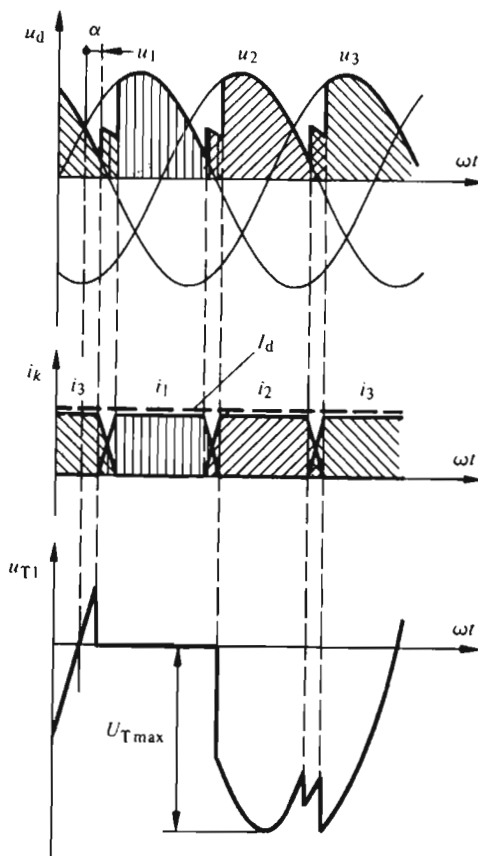
محدودیتهای عناصر یکسوکننده، از يك طرف از فشار الکتریکی معکوس، در حالت قطع، و از طرف دیگر از جریان در حالت هدایت ناشی می‌شوند.

برای مبدل جریان با اتصال ستاره سه فاز روند تغییرات فشار الکتریکی دایم u_h ، فشار الکتریکی u_{T1} دو سر تیرستور شاخه (۱) و جریانهای i_1 ، i_2 و i_3 در سه تیرستور، در شکل ۶-۱۳ نشان داده شده‌اند. این شکل می‌تواند برای بسیاری از مبدلهای دیگر نیز به کار رود.

در بندهای آینده، محدودیتهای عناصر یکسوکننده را تعیین خواهیم کرد. این مقادیر باید از مقادیر حد عناصر انتخاب شده کوچکتر باشند.

۲-۴-۶ محدودیت فشار الکتریکی

فشار الکتریکی در دو سر (بین آند و کاتد) تیرستور شاخه k عبارت است از



شکل ۱۳-۶ محدودیت فشار الکتریکی و جریان در تیر یستورها.

$$\begin{cases} u_{Tk} = 0 & i_k > 0 \\ u_{Tk} = u_k - u_d & i_k = 0 \end{cases} \quad (41-6)$$

در هر گروه کموتاسیون، k از ۱ تا q تغییر می‌کند. رابطهٔ دوم را می‌توان به راحتی از شکل ۳-۵ نتیجه گرفت.

شکل ۱۳-۶ فقط روند تغییرات u_{T1} را نشان می‌دهد. سایر فشارهای الکتریکی u_{Tk} دارای همان روند تغییرات هستند، فقط برحسب زمان جابجا شده‌اند. فشار الکتریکی u_{T1} بلافاصله پس از قطع شدن جریان i_1 ، به سرعت به یک مقدار منفی می‌رسد که متناظر با مقدار لحظه‌ای فشار الکتریکی مرکب چند ضلعی است و در حد مسائزیم (بیشینه) با دامنهٔ آن برابر است. عموماً «مسائزیم فشار الکتریکی معکوس» U_{Tmax} در دو سر هر

تیرستور با فشار الکتریکی مرکب چندضلعی سیستم q فازه برابر است یعنی

$$U_{T \max} = \sqrt{2} \sin \frac{\pi}{q} U_y \quad (42-6)$$

و این «ماگزیمم» (بیشینه) محدودیت فشار الکتریکی برای تیرستور در حالت قطع است. این مقدار باید از ماگزیمم فشار الکتریکی معکوس سرویس U_{RWM} کوچکتر باشد (بند ۲-۳).

در فاصله زمانی مربوط به زاویه α ، تیرستور هنوز روشن نشده و فشار الکتریکی u_{T1} (بین آند و کاتد) مثبت است. بسته به زاویه تأخیر آتش α ، این فشار الکتریکی می‌تواند، در جهت مثبت، به مقدار ماگزیمم (بیشینه) $U_{T \max}$ نیز برسد. پس از خاموش شدن تیرستور، مدت زمانی که فشار الکتریکی u_{T1} منفی می‌شود، معمولاً برای تضمین قطع کامل آن (زمان t_q) کافی است. این مدت زمان فقط در کارکرد به صورت اندولر ممکن است به حالت بحرانی درآید (به بند ۵-۶ مراجعه شود). چون اتصال پل سه فازه یا تک فازه اتصال متوالی دو گروه کموتاسیون است، محدودیت فشار الکتریکی عنصر یکسوکننده در آنها نیز همان مقدار محدودیت در اتصال ستاره را، که معرف گروه کموتاسیون است، دارد. ماگزیمم فشار الکتریکی معکوس $U_{T \max}$ در این حالت نیز از رابطه (۴۲-۶) به دست می‌آید که ممکن است در جهت مثبت هم در دو سر تیرستور قطع شده ظاهر شود. مزیت اتصال پل در این است که برای همان ماگزیمم فشار الکتریکی معکوس $U_{T \max}$ ، ماگزیمم (بیشینه) فشار الکتریکی دایم ایدئال U_{dio} ، نسبت به اتصال ستاره، دو برابر است.

۳-۴-۶ محدودیت جریان

چون جریان دایم I_d از همه تیرستورها در مدتی برابر دوره تناوب فشار الکتریکی تغذیه (از اثر کموتاسیون صرف نظر شده است) عبور می‌کند، مقدار متوسط جریان جاری در هر تیرستور عبارت است از

$$I_{T \text{ med}} = \frac{1}{q} I_d \quad (43-6)$$

مقدار مؤثر این جریان از رابطه زیر به دست می‌آید

$$I_{T \text{ eff}} = \sqrt{\frac{1}{q\pi} \int_0^{2\pi/q} I_d^2 d\omega t} = \frac{1}{\sqrt{q}} I_d \quad (44-6)$$

روابط فوق برای اتصال‌های پل نیز معتبرند.
در اتصال با پیچک جذب کننده که r گروه کموتاسیون باهم موازی شده دارد نتیجه می‌شود

$$I_{T\ med} = \frac{1}{q} \frac{I_d}{r} \quad (45-6)$$



$$I_{T\ eff} = \frac{1}{\sqrt{q}} \frac{I_d}{r} \quad (46-6)$$

پدیده تداخل بر مقدار متوسط جریان اثری ندارد ولی اندکی مقدار مؤثر جریان را تغییر می‌دهد مع‌هذا برای تعیین «محدودیت جریان» عموماً می‌توان به روابط فوق اکتفا کرد.

تلفات و در نتیجه دمای پیوندگاه نیمه هادی θ_J را می‌توان با مقادیر متوسط و مؤثر جریان بنا بر روابط بند ۳-۳ حساب کرد. این دما نباید از ماکزیمم (بیشینه) دمای قابل قبول θ_{JM} تجاوز کند.

ماگزیمم (بیشینه) شیب جریانی که در هر تیرستور جاری می‌شود، یعنی d_i/d_T ، به توسط پدیده کموتاسیون محدود می‌شود و با شیب جریان اتصال کوتاه i_c برابر است. بنا بر رابطه (۴۶-۶) می‌توان نوشت

$$\left. \frac{di_T}{dt} \right|_{\max} = \left. \frac{di_c}{dt} \right|_{\max} = \frac{u_c}{L_c} \Big|_{\max} = \frac{\sqrt{2}U_c}{L_c} \quad (47-6)$$

برای مبدل‌های معمولی جریان، که با فرکانس (بسامد) صنعتی ۵۰ هرتز کار می‌کنند این مقدار تقریباً با $1/10$ شیب بحرانی جریان مستقیم $(di/dt)_{crit}$ قابل قبول برای تیرستور، برابر است.
معمولاً به واسطه پدیده کموتاسیون، از نظر رعایت این حد، مشکلی وجود ندارد.

۵-۶ کار کرد به صورت اندولر

۵-۶-۱ کلیات

در کار کرد به صورت اندولر، پدیده تداخل مسایل خاصی را مطرح می‌سازد. در این حالت محدودیت تیرستور در مورد زمانی که باید برای خاموش شدن آن رعایت کرد بحرانی

۶-۵-۲ زاویه خاموشی

زمان t_y ، مربوط به این زاویه خاموشی، باید بیشتر از زمان قطع t_q تیرستور باشد تا خاموشی قطعی آن تضمین شود و تیرستور تحت فشار الکتریکی مثبت بعدی در حالت قطع بماند. بنابراین داریم

$$t_{\gamma} = \frac{\gamma}{\omega} > t_q \quad (48-6)$$

برای فرکانس (بسامد) ۵۰ هرتز، زمان مربوط به زاویه خاموشی $\gamma = 10^\circ$ برابر $t_{\gamma} = 555 \mu s$ است. زمان قطع نوعی t_q در تیرستورها از ۱۰۰ تا $200 \mu s$ تغییر می‌کند. به علت پراکندگی این مقدار، t_{γ} باید به اندازه قابل توجهی از آن بیشتر باشد تا اطمینانی کافی به دست آید. معمولاً برای کلیه حالات، باید زاویه خاموشی در حدود $\gamma = 10^\circ$ رعایت شود. برای کارکرد به صورت اندولر، عموماً زاویه تأخیر آتش در مقدار متداول $\alpha = 150^\circ$ محدود می‌شود.

۳-۵-۶ حد کارکرد به صورت اندولر

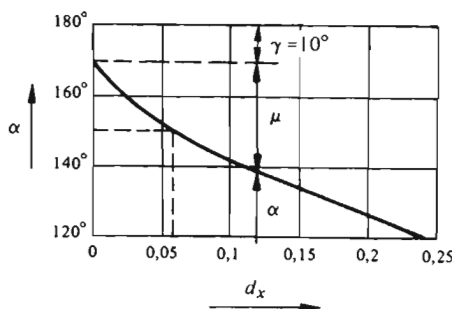
در بعضی از کار بردها، لازم است تا حد قابل قبول زاویه تأخیر آتش در کارکرد به صورت اندولر بدقت بررسی شود. در این باره باید کلیه عوامل مؤثر، از جمله اضافه جریان یا کاهش فشار الکتریکی تغذیه را که به افزایش زاویه تداخل μ می‌انجامند، در نظر گرفت. برای «حد کارکرد به صورت اندولر» می‌توان نوشت

$$\alpha + \mu = 180^\circ - \gamma \quad (49-6)$$

با بردن این رابطه در معادله (۲۹-۶)، زاویه تأخیر آتش چنین به دست می‌آید

$$\cos \alpha = 2d_x + \cos(\alpha + \mu) = 2d_x - \cos \gamma \quad (50-6)$$

رابطه بین α و d_x برای زاویه خاموشی $\gamma = 10^\circ$ را شکل ۱۵-۶ نشان می‌دهد. برای زاویه تأخیر آتش $\alpha = 150^\circ$ ، $d_x = 0.06$ است.



شکل ۱۵-۶ زاویه تأخیر آتش α در حد کارکرد به صورت اندولر برای زاویه خاموشی $\gamma = 10^\circ$.



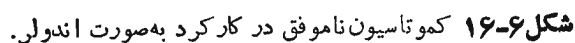
بنابر رابطه (۶-۲۸)، افت فشار الکتریکی القایی نسبتی d_x با جریان دایم I_h متناسب است. هرچه جریان دایم I_h (در اضافه بار ماگزیمم) بیشتر باشد، زاویه تأخیر آتش انتخاب شده برای حد کار کرد به صورت اندولر باید کوچکتر انتخاب بشود. d_x با جریان I_c متناسب معکوس دارد. این جریان هم به نوبه خود با فشار الکتریکی کموتاسیون U_c و عکس القاگری اتصال کوتاه L_c متناسب است (به رابطه ۶-۸ مراجعه شود). اگر در اثر تغییری در فشار الکتریکی تغذیه، U_c کاهش یابد، d_x افزایش خواهد یافت که در نتیجه مقدار حد برای α پایین می آید. بالاخره d_x همراه با L_c افزایش پیدا می کند. هر چه القاگری اتصال کوتاه L_c بزرگتر باشد، باید مقدار کوچکتری برای حد α انتخاب شود.

۴-۵-۶ کموتاسیون ناموفق

در مواقعی که زاویه تأخیر آتش α خیلی بزرگ باشد، پدیده ای رخ می دهد که در شکل ۶-۱۶ نشان داده شده است و «کموتاسیون ناموفق» نامیده می شود. نمایش شکل ۶-۱۶ برای اتصال ستاده سه فاز معتبر است. مع هذا نتیجه به دست آمده به راحتی برای اتصالهای دیگر مبدل های جریان قابل تعمیم است.

فرض کنیم که زاویه تأخیر آتش تیرستور ابتدا $\alpha = 152^\circ$ باشد. کموتاسیون به طور طبیعی با زاویه تداخل $\mu = 18^\circ$ (به شکل ۶-۴، منحنی با $I_h/I_c = 0.1$ مراجعه شود) و زاویه خاموشی $\gamma = 10^\circ$ انجام می شود. برای روشن کردن تیرستور T_p ، زاویه تأخیر آتش کمی افزایش می یابد و به عنوان مثال به مقدار $\alpha_p = 154^\circ$ می رسد. این زاویه برای همان جریان دایم، به زاویه تداخل $\mu = 26^\circ$ (شکل ۶-۴) و زاویه خاموشی $\gamma = 0^\circ$ مربوط می شود. چون فشار الکتریکی کموتاسیون کم است، جریان i_p در تیرستور T_p فقط برای $\alpha + \mu = 180^\circ$ به مقدار جریان دایم I_h می رسد. بدین ترتیب فشار الکتریکی کموتاسیون از صفر می گذرد و تغییر علامت می دهد. بنابراین در دو سر تیرستور T_p یک فشار الکتریکی مثبت ظاهر می شود. این تیرستور که زمان لازم خاموش شدن را در اختیار ندارد بدون اینکه قطع شود به هدایت خود ادامه می دهد. در نتیجه، به علت منفی بودن فشار الکتریکی کموتاسیون جریان i_p کاهش می یابد و جریان i_n دوباره شروع به زیاد شدن می کند. جریان i_p به صفر می رسد و کموتاسیون فاز ۱ به ۲ انجام نمی گیرد، در نتیجه فاز ۱ باز هم به هدایت جریان دایم I_h ادامه می دهد.

در این حالت، روند تغییرات جریان دایم I_h به القاگری L مدار جریان دایم بستگی دارد. مقدار لحظه ای فشار الکتریکی دایم u_h در خروجی مبدل جریان با u_n که مثبت می شود برابر است. تفاوت بین u_h و U_i که برای برقراری جریان I_h جاری از بار تعیین شده است، خیلی بالا می رود. در حالت تئوریک (نظری) که القاگری L بینهایت زیاد فرض می شود، جریان دایم ثابت می ماند (منحنی a در شکل ۶-۱۶). برای القاگرهای مشخص ولی نسبتاً بزرگ، جریان به کندی افزایش می یابد (منحنی b). معمولاً مقدار القاگری L طوری است که جریان دایم خیلی سریع افزایش پیدا می کند (منحنی c) تا به مقادیر



در حالت b که القاگری نسبتاً زیاد است، امکان ادامه کار اندولر بدون قطع وجود دارد. برای این منظور باید زاویه تأخیر آتش فاز ۲ به مقداری که، با در نظر گرفتن جریان دایم زیاد، کموتاسیون مطمئنی را از فاز ۱ به فاز ۲ ممکن می‌سازد کاهش داده شود. در شکل ۱۶-۶، $\alpha'_{\mu} = 136^{\circ}$ انتخاب شده است. در این صورت کموتاسیون با $\mu = 34^{\circ}$ و $\gamma = 10^{\circ}$ انجام می‌گیرد.

درموقع کاهش فشارالکتریکی متناوب تغذیه، پدیدهٔ کموتاسیون ناموفق مشابهی پیش می‌آید. درحالتی که فشار الکتریکی متناوب تغذیه ازبین برود، هیچ کموتاسیونی امکان‌پذیر نیست و جریان دایم به‌خاطر فشار الکتریکی U_i به‌سرعت افزایش پیدا می‌کند. دراین صورت لازم است تا مدار با جریان دایم به‌طور سریع قطع شود ویا تحریک‌منبع فشار الکتریکی، داخلی U_i ازبین برود.



فصل هفتم

مبدل‌های جریان: کارکرد واقعی

۱-۷ مقدمه

۱-۱-۷ کلیات

تا اینجا فرض بر این بود که جریان در مدار با جریان دایم جریانی کاملاً صاف است. این موضوع ایجاب می‌کند که القاگری بار بینهایت باشد. فرض فوق بررسی کارکرد مبدل جریان را ساده می‌کند و نظریهٔ مربوط، برپایه این سادگی بنا نهاده شده است. در حالت واقعی، القاگری بار مقدار معینی دارد و جریان دایم دارای تموج کم و بیش نمایانی است. در بند ۷-۲ روند تغییرات جریان دایم برای کار واقعی مورد مطالعه قرار خواهد گرفت. جریان دایم به دلیل تموج ممکن است، برای مقادیر متوسط کم، حالت کاملاً تناوبی به خود بگیرد. این پدیده در بند ۷-۳ تشریح خواهد شد. بالاخره در بند ۷-۴ رفتار مبدل جریان برای بار اهمی خالص مورد بررسی قرار خواهد گرفت و ملاحظه خواهد شد که رفتار مبدل جریان با آنچه برای حالت ایدئال ($L = \infty$) بیان شد، کاملاً متفاوت است.

۲-۱-۷ فرضهای بررسی کارکرد واقعی

در بررسی کارکرد واقعی مبدل جریان، فرضهای زیر به کار می‌روند:
- القاگری L بار با جریان دایم (به شکل ۵-۲ مراجعه شود) مقدار معینی دارد که حتی می‌تواند صفر باشد

$$L \geq 0$$

(۱-۷)

– القاگری L_c مدار کموتاسیون (به شکل ۲-۳ مراجعه شود) مقدار معینی دارد

$$L_c > 0 \quad (2-7)$$

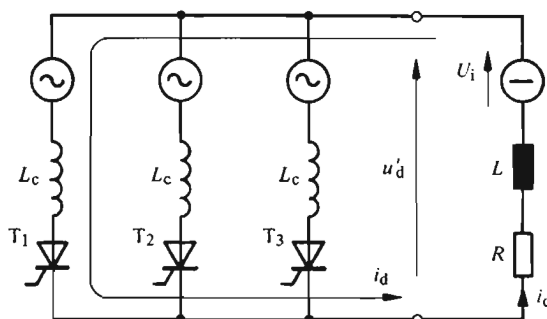
بنابر فرض اول: $L_c \geq 0$ ، جریان i_d روند تموجی دارد و این امر با حالات واقعی سازگار است.

فرض دوم یعنی $L_c > 0$ ، به حساب آمدن پدیده کموتاسیون را تضمین می‌کند. البته در بند ۴-۷، برای مطالعه رفتار با بار اهمی خالص، $L_c = 0$ فرض خواهد شد تا روابط مشخص کننده این کارکرد خاص، ساده تر شود.

۲-۷ روند تغییرات جریان دایم

۱-۲-۷ تعیین طرح واره (شمای) معادل برای اتصال ستاره سه فاز

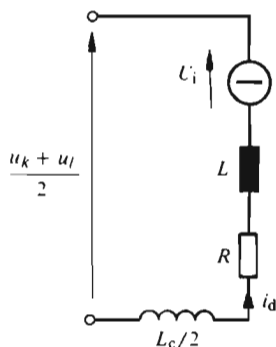
برای تعیین روند تغییرات جریان دایم، هنگامی که القاگری بار معین است، ابتدا طرح-واره (شمای) معادل اتصالهای گوناگون مبدل‌های جریان را به دست می‌آورند. در این زمینه از طرح واره (شمای) معادل اتصال ستاره سه فاز شروع می‌کنیم. طرح واره (شمای) یک مبدل جریان با اتصال ستاره سه فاز و بار با جریان دایم آن در شکل ۱-۷ نشان داده شده است. اگر فقط یک تیرستور هادی باشد، این طرح واره به صورت شکل ۲-۷ خلاصه می‌شود که در آن فاز k با فشار الکتریکی سینوسی u_k حامل جریان است. القاگری L_c در مدار با جریان متناوب باید به حساب آید، زیرا در فاصله زمانی، در نظر گرفته شده، جریان دایم i_d از آن می‌گذرد.



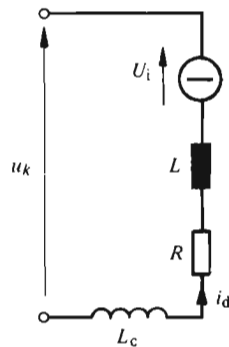
شکل ۱-۷ طرح واره (شمای) مبدل جریان با اتصال ستاره سه فاز و بار با جریان دایم.

در دوران کموتاسیون، طرح واره معادل نشان داده شده در شکل ۳-۷ معتبر خواهد

بود. فشار الکتریکی $(u_k + u_l)/2$ به‌دو فاز در حال کموتاسیون مربوط است. برای تعیین روند تغییرات جریان دائم i_d ، دو القاگری L_c موازی‌اند (به شکل ۲-۶ ب مراجعه شود)، یعنی القاگری معادل برابر $L_c/2$ است.



شکل ۲-۷ خلاصه شده طرح واره ۱-۷ در دوران کموتاسیون.

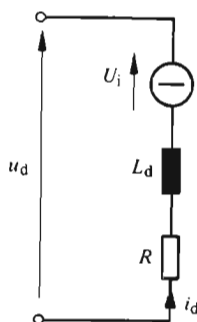


شکل ۳-۷ خلاصه شده طرح واره ۲-۷ در دوران کموتاسیون.

دو طرح واره فوق را می‌توان، مطابق شکل ۴-۷، بایک طرح واره معادل نشان داد. u_d فشار الکتریکی دائم لحظه‌ای است که در بند ۲-۴ با در نظر گرفتن پدیده تداخل تعیین شد (به شکل ۳-۶ مراجعه شود). L_d القاگری معادل است که دو مقدار دارد در بیرون دوران کموتاسیون

$$L_d = L + L_c \quad (3-7)$$

و در دوران کموتاسیون



شکل ۴-۷ طرح واره معادل برای شکل ۱-۷.

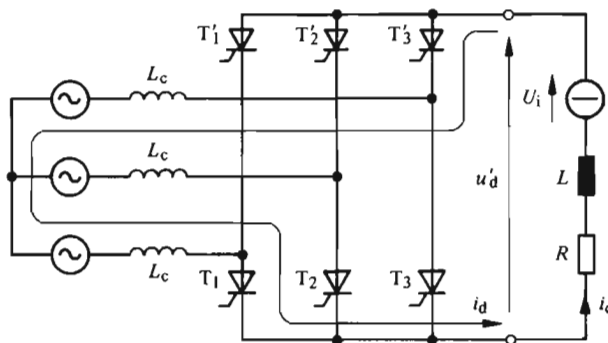
$$L_d = L + L_c/2$$

(۴-۷)

به علت وجود افت فشار الکتریکی در القاگرهای $L_c/2$ و L_c ، که در اثر $di_d/dt \neq 0$ پدید می آید، فشار الکتریکی دایم u'_d در دو سربار با فشار الکتریکی u_d متفاوت خواهد بود (به شکل ۷-۱ مراجعه شود).
طرح واره معادل شکل ۷-۴ با در نظر گرفتن اینکه دوره تناوب فشار الکتریکی دایم u_d برابر $2\pi/q$ است، برای هر اتصال ستاره دیگری نیز معتبر است.

۷-۲-۲ طرح واره (شمای) معادل برای اتصال پل سه فازه

طرح واره مبدل جریان با اتصال پل سه فازه و بار با جریان دایم در شکل ۷-۵ نشان داده شده است. اگر در هر نیمه از پل فقط یک تیرستور در حال هدایت باشد، طرح واره می تواند به صورت شکل ۷-۶ خلاصه شود. فشار الکتریکی متوجه $u_k - u'_m$ به فازهای تغذیه تیرستورهای در حال هدایت مربوط است. دوالقاری L_c مدار متناوب، که جریان i_d در این حالت از آنها می گذرد، باید متوالی با بار قرار داده شوند.
در دوران کموتاسیون طرح واره (شمای) معادل شکل ۷-۷ معتبر خواهد بود. بسته به تیرستورهایی که در حال کموتاسیون یا هدایت جریان دایم باشند، فشار الکتریکی مشخص کننده طرح واره معادل، $u'_m - (u_k + u_i)/2$ یا $-(u'_i + u'_m)/2$ است. گروه در حال کموتاسیون، القاگری $L_c/2$ را وارد مدار می کند و گروه دیگر القاگری L_c را. این دوالقاری را می توان در طرح واره (شمای) معادل شکل ۷-۸ با القاگری معادل واحدی نشان داد. روند تغییرات فشار الکتریکی u_d مطابق شکل ۷-۶ است. القاگری معادل L_d در بیرون دوران کموتاسیون



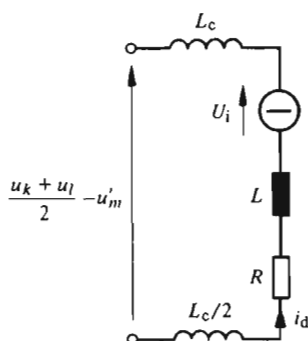
شکل ۷-۵ طرح واره مبدل جریان با اتصال پل سه فازه و بار با جریان دایم.

$$L_d = L + 2L_c \quad (5-7)$$

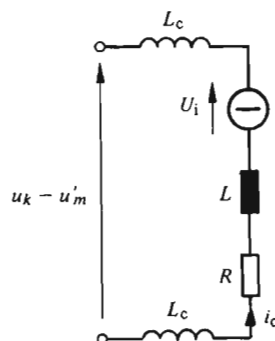
و در دوران کموتاسیون

$$L_d = L + \frac{3}{4}L_c \quad (6-7)$$

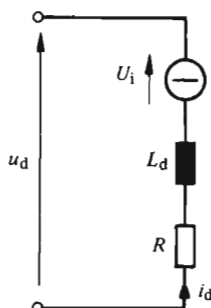
است. بدین ترتیب همان طرح واره (شمای) معادل ستاره سه فاز به دست می‌آید (به شکل ۴-۷ مراجعه شود). مهمترین تفاوت در این است که دوره تناوب فشار الکتریکی u_d در حالت پایا برای این اتصال $2\pi/p = \pi/3 = 60^\circ$ است.



شکل ۷-۷ خلاصه شده طرح واره شکل ۵-۷ در دوران کموتاسیون.



شکل ۶-۷ خلاصه شده طرح واره شکل ۵-۷ بیرون دوران کموتاسیون.



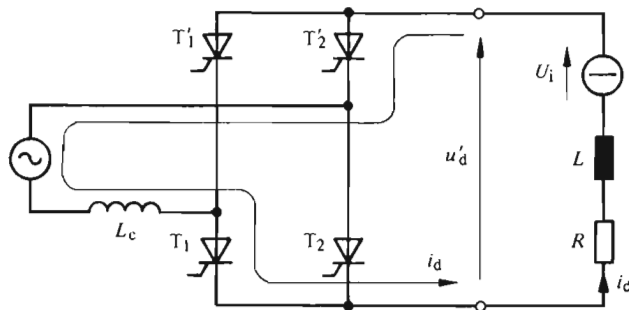
شکل ۸-۷ طرح واره معادل شکل ۵-۷.

۳-۲-۷ تعیین طرح واره معادل برای اتصال پل تک فازه

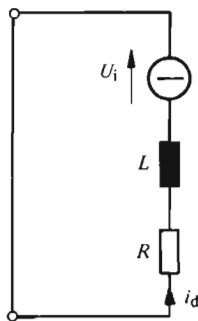
برای تعیین روند تغییرات جریان دایم i_d در حالت القاگری معین (غیر بینهایت) بار، فقط به بررسی اتصال پل تک فازه متقارن اکتفا خواهد شد.

مدار پل تک فازه و بار با جریان دایم در شکل ۷-۹ نشان داده شده است. در بیرون کموتاسیون، این مدار را می توان به طرح واره معادل شکل ۷-۱۰ خلاصه کرد. بسته به جفت تیرستورهای که در حال هدایت باشند فشار الکتریکی نتیجه، $+u$ یا $-u$ است. القاگری L_c متوالی با بار جریان دایم اثر می کند.

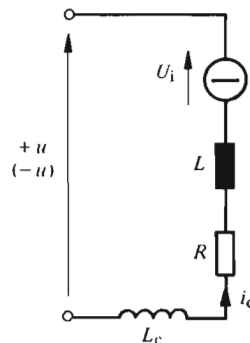
در دوران کموتاسیون، پل تک فازه، برای بار با جریان دایم، خود به صورت اتصال کوتاه عمل می کند. در این فاصله زمانی، القاگری کموتاسیون L_c خارج از مدار است و هیچ اثری بر جریان دایم i_d ندارد (به طرح واره معادل شکل ۷-۱۱ مراجعه شود).



شکل ۷-۹ مدار مبدل جریان در اتصال پل متقارن و بار با جریان دایم.



شکل ۷-۱۱ خلاصه شده مدار شکل ۷-۹ در دوران کموتاسیون.



شکل ۷-۱۰ خلاصه شده مدار شکل ۷-۹ بیرون کموتاسیون.

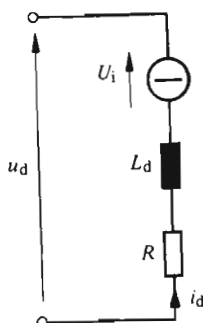
بازهم می‌توان طرح واره معادل واحدی را، چنانکه در شکل ۷-۱۲ نشان داده شده به دست آورد. فشار الکتریکی u_d همان روند تغییرات نشان داده شده در شکل ۶-۸ را دارد و القاگری معادل L_d بیرون دوران کموتاسیون

$$L_d = L + L_c \quad (7-7)$$

و در دوران کموتاسیون

$$L_d = L \quad (7-8)$$

است. ملاحظه می‌شود که طرح واره معادلی همانند حالت‌های قبلی به دست می‌آید. دوره تناوب فشار الکتریکی u_d در این حالت برابر π یا 180° است.



شکل ۷-۱۲ طرح واره معادل شکل ۷-۹.

۷-۳-۴ معادله دیفرانسیل عمومی

چنانکه دیدیم، برای تعیین جریان دائم i_d ، می‌توان از طرح واره معادلی مستقل از چگونگی اتصال مبدل جریان (به شکل‌های ۷-۴، ۷-۸ و ۷-۱۲ مراجعه شود) استفاده کرد. برای این مدار ترکیب یافته از یک مقاومت اهمی R ، یک القاگری L_d و یک فشار الکتریکی U_i ، معادله دیفرانسیل زیر معتبر است

$$L_d \frac{di_d}{dt} + Ri_d = u_d - U_i \quad (7-9)$$

فشار الکتریکی دائم u_d از چند قطعه فشار الکتریکی سینوسی تشکیل می‌شود که بسته به کارکرد در دوران یا بیرون دوران کموتاسیون متفاوت‌اند و همچنین به چگونگی اتصال مبدل جریان بستگی دارند.

۷-۲-۵ پاسخ عمومی معادله دیفرانسیل

فشار الکتریکی دایم را می‌توان به‌طور کلی به‌صورت زیر نوشت

$$u_d = \sqrt{2} U_q \cos(\omega\tau + \zeta) \quad (۷-۱۰)$$

که در آن U_q و ζ به اتصال مبدل جریان و به کارکرد بیرون دوران یا در دوران کموتاسیون بستگی دارند. این رابطه فقط برای کارکرد مورد بحث معتبر است. محور زمان جابه‌جا شده است، تا با متغیر جدید τ ، مطابق شکل ۷-۱۳ قطعه مورد نظر از $\tau = 0$ شروع شود.

پاسخ عمومی معادله دیفرانسیل (۷-۹) از سه مؤلفه تشکیل می‌شود که عبارتند از

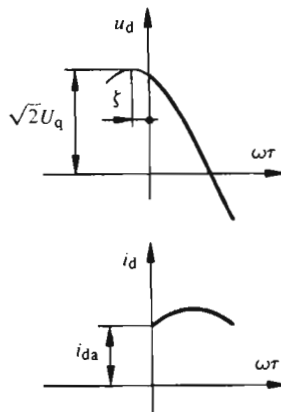
– مؤلفه متناوب $i_{d\sim}$ مربوط به فشار الکتریکی موجی u_d .

– مؤلفه دایم i_{d-} مربوط به فشار الکتریکی داخلی U_i .

– مؤلفه گذرای i_{dt} .

بنابراین، داریم

$$i_d = i_{d\sim} + i_{d-} + i_{dt} \quad (۷-۱۱)$$



شکل ۷-۱۳ فشار الکتریکی و جریان دایم برای پاسخ عمومی معادله دیفرانسیل.

مؤلفه متناوب، با استفاده از روش محاسبه جریان متناوب در حالت پایا، برای مدار

شکل ۷-۱۲ چنین به‌دست می‌آید

$$i_{d\sim} = \frac{\sqrt{2} U_q}{\sqrt{R^2 + (\omega L_d)^2}} \cos(\omega\tau + \zeta - \psi_d) \quad (۷-۱۲)$$

ψ_d ، اختلاف فاز در مدار RL برای پدیده متناوب پایاست

$$\psi_d = \arctan \frac{\omega L_d}{R} \quad (۱۳-۷)$$

مؤلفه دائم i_{d-} به راحتی به دست می آید زیرا $di_{d-}/dt = 0$ است. بنا براین، از معادله دیفرانسیل (۹-۷) با شرط $u_d = 0$ نتیجه می شود

$$i_{d-} = -\frac{U_i}{R} \quad (۱۴-۷)$$

بالاخره، با ثابت زمانی مدار RL

$$T_d = \frac{L_d}{R} \quad (۱۵-۷)$$

مؤلفه گذرای i_{dt} به صورت زیر خواهد بود

$$i_{dt} = i_{dta} e^{-\tau/T_d} = i_{dta} e^{-\omega \tau / \tan \psi_d} \quad (۱۶-۷)$$

ضریب i_{dta} باید چنان محاسبه شود که برای $\tau = 0$ جریان دائم i_d با شرط اولیه جریان یعنی i_{da} برابر باشد (به شکل ۱۳-۷ مراجعه شود). بنا به رابطه (۱۱-۷) داریم

$$i_{dta} = i_{da} - \frac{\sqrt{2} U_q}{\sqrt{R^2 + (\omega L_d)^2}} \cos(\zeta - \psi_d) + \frac{U_i}{R} \quad (۱۷-۷)$$

بدین ترتیب پاسخ عمومی به دست می آید

$$i_d = \frac{\sqrt{2} U_q}{\sqrt{R^2 + (\omega L_d)^2}} [\cos(\omega \tau + \zeta - \psi_d) - \cos(\zeta - \psi_d) e^{-\omega \tau / \tan \psi_d}] - \frac{U_i}{R} (1 - e^{-\omega \tau / \tan \psi_d}) + i_{da} e^{-\omega \tau / \tan \psi_d} \quad (۱۸-۷)$$

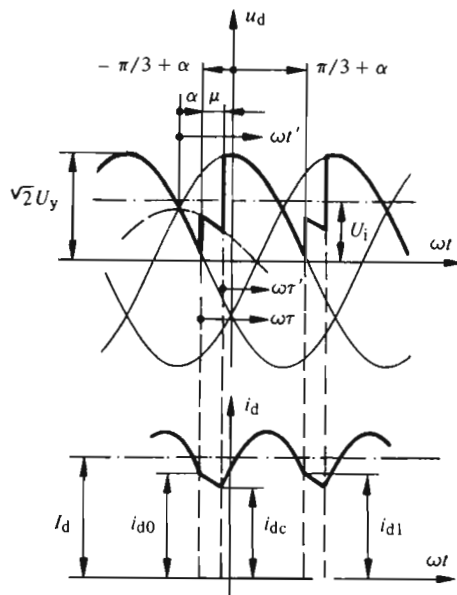
در صورت لزوم و برای محاسبه عددی می توان از تابع نمایی فاکتور گرفت.

۶-۲-۷ پاسخ خاص برای اتصال ستاره سه فاز

در اینجا به بررسی روش تعیین روند تغییرات جریان دایم ایدئال در حالت مبدل جریان با اتصال ستاره سه فاز می پردازیم.

شکل ۷-۱۴ روند تغییرات فشار الکتریکی دایم u_d را نشان می دهد. مبدأ محور زمان (ωt) منطبق برما گزیمم (بیشینه) فشار الکتریکی سینوسی در بیرون دوران کموتاسیون انتخاب شده است. مع هذا محاسبه جریان دایم باید از لحظه روشن شدن هر تیرستور، یعنی $\omega t = -\pi/3 + \alpha$ شروع شود. بنا بر این ابتدا باید دوران کموتاسیون را بررسی کرد. فشار الکتریکی را می توان، با استفاده از شکل ۷-۱۴ چنین نوشت

$$u_d = \frac{\sqrt{2} U_y}{\gamma} \cos\left(\omega t + \frac{\pi}{3}\right) \quad (7-19)$$



شکل ۷-۱۴ روند تغییرات فشار الکتریکی دایم u_d و جریان دایم i_d در اتصال ستاره سه فاز.

با جابه جا کردن مبدأ محور زمان، برای به کار بردن متغیر ωt و مقایسه با رابطه عمومی (۷-۱۰)، نتیجه می شود

$$U_q = \frac{U_y}{\gamma} \quad (7-20)$$

$$\zeta = \alpha \quad (21-7)$$

مقدار اولیه i_{da} جریان در پاسخ عمومی (۷-۱۸)، در اینجا برابر i_{d0} است (به شکل ۷-۱۴ مراجعه شود). مقدار i_{d0} به خودی خود معلوم نیست و از شرط تناوبی بودن نوسانات جریان دایم به دست می‌آید.

مقادیر فوق برای ζ و U_q ، در دوران کموتاسیون، یعنی برای $\mu \leq \omega t \leq \pi$ معتبرند که μ زاویه تداخل است. در بند ۷-۲-۷ توضیحات دقیق‌تری درباره μ داده خواهد شد. از رابطه (۷-۱۸) و برای $\omega t = \mu$ ، مقدار جریان دایم $i_d = i_{dc}$ را می‌توان به دست آورد (به شکل ۷-۱۴ مراجعه شود). یادآوری می‌کنیم که در اینجا محاسبات باید با $L_d = L_c/2$ انجام پذیرد.

پس از این مرحله باید بیرون دوران کموتاسیون مورد بررسی قرار گیرد. این مرحله از $\omega t = -\pi/3 + \alpha + \mu$ شروع می‌شود و فشار الکتریکی u_d با توجه به شکل ۷-۱۴ عبارت است از

$$u_d = \sqrt{2} U_y \cos \omega t \quad (22-7)$$

برای استفاده از پاسخهای عمومی بند ۷-۲-۵، لازم است جابه‌جایی دیگری در محور زمان، انجام گیرد و متغیر $\omega t'$ به کار رود (به شکل ۷-۱۴ مراجعه شود). در این شرایط پارامترها چنین به دست می‌آیند

$$U_q = U_y \quad (23-7)$$

و

$$\zeta = \alpha + \mu - \pi/3 \quad (24-7)$$

حال باید در پاسخ عمومی جریان (رابطه ۷-۱۸)، مقدار اولیه $i_{da} = i_{dc}$ در نظر گرفته شود. در این حالت القاگری L_d برابر $L + L_c$ است.

با این مقادیر می‌توان روند تغییرات جریان را در بیرون دوران کموتاسیون به طور کامل، یعنی تا $\omega t = \pi/3 + \alpha$ یا تا $\omega t' = 2\pi/3 - \mu$ حساب کرد. مقدار نهایی جریان دایم i_{d1} برابر i_{d0} است.

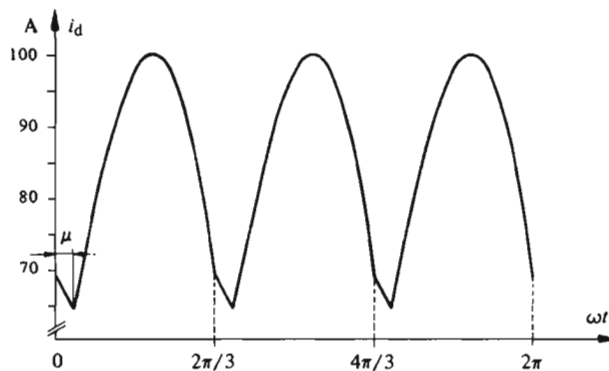
برای اینکه در حالت پایا، نوسانات جریان روند تناوبی با دوره تناوب $\omega t = 2\pi/3$ داشته باشد، لازم است مقدار نهایی i_{d1} برابر مقدار اولیه i_{d0} شود. محاسبه مستقیم مقدار i_{d0} امکان ندارد و باید از روش آزمون و خطا استفاده کرد. برای این منظور مقداری برای i_{d0} برمی‌گزینند و محاسبه را در یک مرحله کامل انجام می‌دهند. یعنی مقادیر i_{d0} و i_{d1} را



تعیین می‌کنند. سپس محاسبه را با مقدار $i_{d0} = i_{d1}$ دوباره انجام می‌دهند و این روش را آن قدر تکرار می‌کنند تا دو مقدار متوالی به دست آمده به اندازه کافی به هم نزدیک باشند. این محاسبه برای تعیین روند تغییرات واقعی جریان دایم i_d نسبتاً طولانی است و اغلب به ناچار آزمایشین حسابگر استفاده می‌کنند. برای این منظور فرمولها و روش بیان شده در بالا به صورت برنامه به ماشین داده می‌شود. پدیده‌های گذرا را نیز می‌توان به طریق مشابهی بررسی کرد.

روش به دست آوردن روند تغییرات واقعی جریان دایم برای اتصالهای دیگر مبدل‌های جریان نیز مانند روش فوق است. مهم، این است که برای فشار الکتریکی دایم μ_d در دوران و در بیرون دوران کموتاسیون، رابطه‌ای تحلیلی به دست آید و به صورت داده در رابطه (۷-۱۵) بیان شود.

شکل ۷-۱۵ روند تغییرات جریان دایم مبدل جریان با اتصال ستاره سه فازهای را، که به وسیله ماشین حسابگر به دست آمده است، نشان می‌دهد. دوران و بیرون دوران کموتاسیون به وضوح از هم تمیز داده می‌شوند. در حالت نمایش داده شده، ثابت زمانی بار $T = L/R = 0.33 \text{ sec}$ و نسبت القاگری کموتاسیون به القاگری بار $L_c/L = 0.3$ است. چنانکه ملاحظه می‌شود، موج جریان نسبتاً زیاد است و این موضوع به ویژه به ثابت زمانی بار بستگی دارد. هر چه این ثابت زمانی بیشتر باشد، موج جریان کمتر خواهد بود.



شکل ۷-۱۵ روند تغییرات واقعی جریان دایم، در مبدل جریان با اتصال ستاره سه فازهای که به توسط ماشین حسابگر محاسبه شده است.

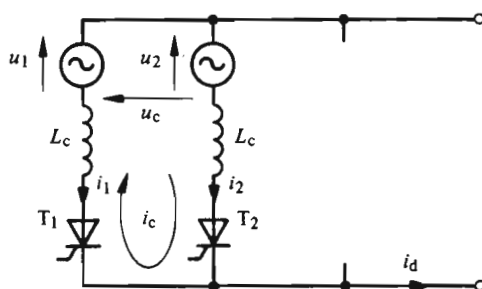
اگر به سبب کوچک بودن ثابت زمانی بار، موج جریان زیاد باشد، پیچک‌هایی را به نام «القاگر صاف کننده»^۱ متوالی با بار قرار می‌دهند. القاگری این پیچکها با القاگری بار جمع

1) self de lissage

می‌شود. البته باید دقت کرد که مقاومت اهمی این پیچکها نسبت به مقاومت بار کوچک باشد.

۷-۲-۷ زاویه تداخل

چنانکه در بند پیش دیدیم محاسبه زاویه تداخل μ هنگامی که القاگری بار معین است، احتیاج به دقت خاصی دارد. به کمک شکل ۷-۱۶ روابط مربوط را به دست می‌آوریم.



شکل ۷-۱۶ بررسی کموتاسیون.

در دوران کموتاسیون روابط زیر برقرارند

$$-L_c \frac{di_1}{dt} + L_c \frac{di_2}{dt} = u_c \quad (۷-۲۵)$$

و

$$i_1 + i_2 = i_d \quad (۷-۲۶)$$

با وارد کردن جریان اتصال کوتاه i_c همانند بند ۷-۲-۲ نتیجه می‌شود

$$i_2 = i_c \quad (۷-۲۷)$$

$$i_1 = i_d - i_c \quad (۷-۲۸)$$

تفاوتی که نسبت به نتیجه گیریهای بند ۷-۲-۲ وجود دارد این است که جریان i_d دیگر ثابت نیست و رابطه (۷-۲۵) چنین نوشته می‌شود

$$-L_c \frac{di_d}{dt} + 2L_c \frac{di_c}{dt} = u_c = \sqrt{2} U_c \sin \omega t' \quad (29-7)$$

در این رابطه به جای u_c ، رابطه (۴-۶) قرار داده شده و متغیر زمان، $\omega t'$ انتخاب شده در شکل ۱۴-۷ است. با انتگرال گیری از رابطه فوق و با در نظر گرفتن وضع اولیه که برای $i_c = 0$ و $i_d = i_{d0}$ ، $\omega t' = \alpha$ (به شکل ۱۴-۷ مراجعه شود)، داریم

$$-L_c (i_d - i_{d0}) + 2L_c i_c = -\frac{\sqrt{2} U_c}{\omega} (\cos \omega t' - \cos \alpha) \quad (30-7)$$

و از آن جریان اتصال کوتاه چنین به دست می آید

$$i_c = \frac{i_d - i_{d0}}{2} + \hat{I}_c (\cos \alpha - \cos \omega t') \quad (31-7)$$

که اوج (دامنه) \hat{I}_c مطابق رابطه (۸-۶) در آن وارد شده است. در پایان مرحله تداخل، یعنی برای $\omega t' = \alpha + \mu$ ، جریان اتصال کوتاه i_c با جریان دایم i_d که درست در این لحظه مساوی i_{dc} است برابر است (به شکل ۱۴-۷ مراجعه شود). بدین ترتیب برای تعیین زاویه تداخل می توان نوشت

$$\cos(\alpha + \mu) = \cos \alpha - \frac{i_{dc} + i_{d0}}{2 \hat{I}_c} \quad (32-7)$$

چون i_{dc} هم، از طریق رابطه غیر جبری جریان دایم، به μ بستگی دارد (به بند ۶-۲-۷ مراجعه شود)، زاویه تداخل μ را تنها از راه عددی و با استفاده از روش آزمون و خطا می توان محاسبه کرد.

برای جریانی که کاملاً صاف باشد، $i_{dc} = i_{d0} = i_d$ است و رابطه (۳۲-۷) به رابطه (۱۵-۶) که در بند ۶-۲-۲ در حالت ایدئال با القاگری بار بینهایت به دست آمده است خلاصه می شود.

شکل ۱۴-۷ نشان می دهد که جریانهای i_{dc} و i_{d0} که تعیین کننده مدت زمان کموتاسیون یا به عبارت دیگر زاویه تداخل μ هستند، از مقدار متوسط جریان دایم I_d کوچکترند. این مقدار متوسط باید بایک انتگرال گیری عددی به دست آید. در نتیجه مقدار واقعی μ از مقداری که با رابطه (۱۵-۶) و برای جریان I_d کاملاً صاف محاسبه می شود کوچکتر است.

۸-۲-۷ نتیجه گیری

با توجه به مطالب بیان شده در این بخش ملاحظه می شود که محاسبه دقیق روند تغییرات

جریان دایم مشکل طولانی است. دادن فرمول‌های کامل در هیچ مورد امکان‌پذیر نیست و نتایج فقط به روش‌های عددی که احتیاج به استفاده از ماشین‌های حسابگر دارند، به دست می‌آید.

از این رو در تئوری (نظریه) قراردادی مبدل‌های جریان، فرض القاگری بارینی‌هیت یعنی $L \rightarrow \infty$ به کار می‌رود. نتایجی که بدین ترتیب به دست می‌آید، معمولاً با روابط واقعی، به خصوص در آنچه به مشخصه بار مربوط می‌شود، تفاوت چندانی ندارد. به ویژه حالت خاص هدایت ناپیوسته نمی‌تواند با نظریه (تئوری) قراردادی در نظر گرفته شود. این حالت خاص را در بند آینده بررسی خواهیم کرد.

۳-۷ هدایت ناپیوسته

۱-۳-۷ کلیات

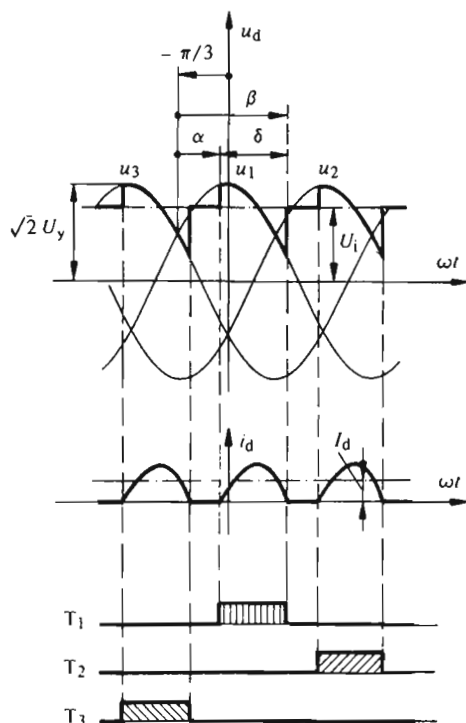
با در نظر گرفتن القاگری معین بار، جریان دایم مطابق شکل ۱۴-۷ حالتی تموجی پیدا می‌کند. برای مقادیر I کم، مقدار لحظه‌ای i که ممکن است قبل از روشن شدن فاز بعدی به صفر برسد، به علت مسدود بودن تیرستور مربوط نمی‌تواند منفی شود. در این صورت جریان دایم مدتی صفر می‌ماند و حالتی ناپیوسته پیدا می‌کند. مسائل مربوط به این حالت خاص که «هدایت ناپیوسته» نامیده می‌شود، در زیر بررسی خواهد شد. تعیین روند تغییرات جریان دایم، به توسط روابط دقیق، نسبتاً پیچیده است. برای سادگی محاسبه از مقاومت اهمی بار صرف نظر و $R = 0$ فرض می‌شود.

۲-۳-۷ شرایط کار در اتصال ستاره سه فاز

روند تغییرات فشار الکتریکی دایم u و جریان دایم i همچنین مدت هدایت تیرستورها، برای کارکرد با هدایت ناپیوسته در مبدل جریان با اتصال ستاره سه فاز در شکل ۱۷-۷ نشان داده شده است.

در لحظه روشن شدن، که با زاویه تأخیر آتش α مشخص می‌شود جریان دایم i صفر است. سپس این جریان افزایش پیدامی‌کند و پس از گذشت از یک ماگزیمم (بیشینه)، کاهش می‌یابد تا در پایان دوران هدایت، که با «زاویه هدایت δ » بیان می‌شود، دوباره به صفر برسد. در دوران هدایت، فشار الکتریکی دایم، قطعه‌ای از یک فشار الکتریکی سینوسی است. در طول انقطاع جریان، فشار الکتریکی برابر فشار الکتریکی داخلی بار U_i است، زیرا مبدل جریانی که فاقد تیرستور در حال هدایت است، هیچ گونه فشار الکتریکی را نمی‌تواند اعمال کند. شاخص ضربه فشار الکتریکی دایم $p = 3$ است.

هنگام هدایت جریان، القاگری مؤثر در مدار برابر $L_h = L + L_c$ است (به شکل ۱-۷ مراجعه شود).



شکل ۷-۱۲ هدایت ناپیوسته در اتصال ستاره سه فاز.

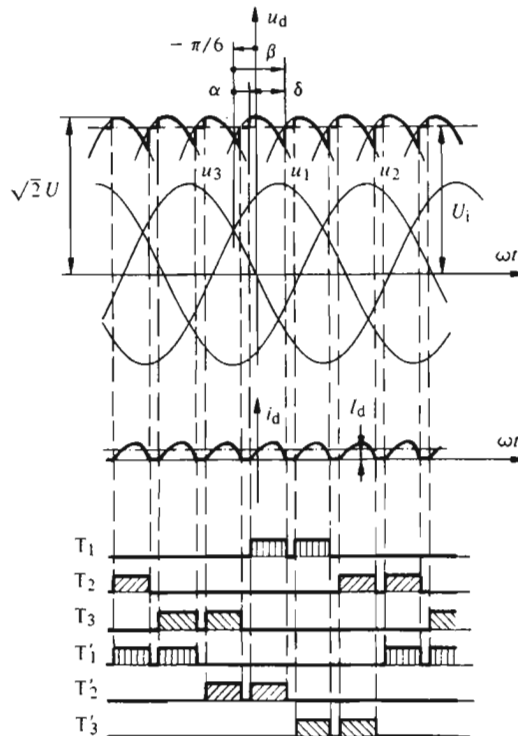
۳-۳-۷ شرایط کار در اتصال پل سه فاز

برای حالت هدایت ناپیوسته در مبدل جریان با اتصال پل سه فاز، روند تغییرات فشار الکتریکی دایم، روند تغییرات جریان دایم همچنین مدت هدایت تیریسورها در شکل ۷-۱۸ نشان داده شده اند.

فشار الکتریکی و جریان دایم روند تغییراتی همانند حالت اتصال ستاره سه فاز دارند با این تفاوت که شاخص ضربان در اینجا $p=6$ است.

اتصال پل سه فاز، درباره هدایت جریان از طریق تیریسورها، یک ویژگی از خود نشان می دهد. برای اینکه جریان دایم i_d بتواند جاری شود، لازم است تا در هر نیمه پل یک تیریسورهای باشد. بنابراین باید همواره دو تیریسور به طور همزمان روشن بشوند: T_1 و T'_2 ، T_2 و T'_3 ، T_3 و T'_1 ، T'_1 و T_2 ، T'_2 و T_3 ، T'_3 و T_1 ، T_1 و T'_3 ، T'_3 و T_2 ، T'_2 و T_1 ، T'_1 و T_3 ، T'_3 و T_2 ، T'_2 و T_1 و غیره. فرمان چکانده ها باید بتواند این سری تپها را تولید کند.

در طول هدایت جریان، القاگری مؤثر در مدار عبارت است از $L_d = L + L_c/2$ (به شکل ۵-۷ مراجعه شود).



شکل ۲-۱۸ هدایت ناپیوسته اتصال پل سه فاز.

۴-۳-۷ شرایط کار در اتصال پل تک فاز

شکل ۷-۱۹ روند تغییرات فشار الکتریکی و جریان دایم و همچنین مدت هدایت تیرستورها را برای هدایت ناپیوسته در مبدل جریان با اتصال پل تک فاز نشان می‌دهد. حتی در این حالت نیز تفاوت اساسی با دو مبدل جریان دیگر وجود ندارد، مگر در باره شاخص ضربه که در اینجا $p = 2$ است. چون حتی در کار دایمی لازم است یک تیرستور از هر نیمه پل به طور همزمان روشن باشد، حالت هدایت ناپیوسته هیچ مشکلی در باره روشن شدن تیرستورها ایجاد نمی‌کند.

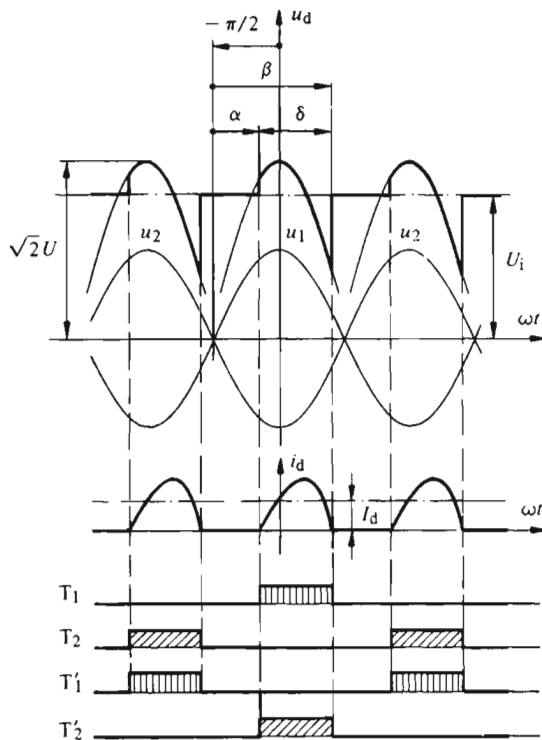
القاگری مؤثر در مدار، در طول هدایت جریان، مطابق شکل ۷-۹،

$$L_d = L + L_c, \quad \text{است.}$$

۵-۳-۷ محاسبه جریان دایم

هدایت ناپیوسته اتصالاتی گوناگون مبدل جریان را می توان به طور کلی و با فرض سیستمی با شاخص ضریب p بررسی کرد. با فرض ساده کننده $R = 0$ ، معادله دیفرانسیل (۷-۹) چنین خلاصه می شود

$$L_d \frac{di_d}{dt} = u_d - U_i \quad (۷-۳۳)$$



شکل ۷-۱۹ هدایت ناپیوسته اتصال پل تک فاز.

برای اینکه همه اتصالاتی گوناگون مبدل جریان را بتوان یکجا بررسی کرد، فشار الکتریکی لحظه ای u_d را چنین در نظر می گیریم

$$u_d = \sqrt{2} U_p \cos \omega t \quad (۷-۳۴)$$

$\sqrt{2} U_p$ دامنه فشار الکتریکی تعیین کننده در کار به صورت هدایت ناپیوسته است. رابطه بین U_p و فشار الکتریکی ساده U_y برای اتصال‌های اصلی در جدول ۷-۲۰ داده شده است. بادر نظر گرفتن این واقعیت که به ازای $\omega t = -\pi/p + \alpha$ ، جریان دایم i_d باید برابر صفر باشد، پاسخ زیر برای معادله دیفرانسیل (۷-۳۳) به دست می‌آید

$$i_d = \frac{\sqrt{2} U_p [\sin \omega t - \sin (\alpha - \pi/p)] - U_i (\omega t - \alpha + \pi/p)}{\omega L_d} \quad (7-35)$$

در لحظه نظیر $\omega t = -\pi/p + \beta$ ، جریان دایم i_d دوباره صفر می‌شود. این شرط، معادله دیگری به ما می‌دهد که محاسبه زاویه β را امکان پذیر می‌سازد.

$$\sqrt{2} U_p [\sin (\beta - \pi/p) - \sin (\alpha - \pi/p)] = U_i (\beta - \alpha) \quad (7-36)$$

از انتگرال گیری رابطه (۷-۳۵) بین دو حد $\omega t = -\pi/p + \alpha$ و $\omega t = -\pi/p + \beta$ و تقسیم آن به π/p ، مقدار متوسط جریان دایم I_d به دست می‌آید و با به کار بردن معادله (۷-۳۶) برای حذف فشار الکتریکی U_i ، نتیجه می‌شود

$$I_d = \frac{p \sqrt{2} U_p}{2 \pi \omega L_d} \left\{ \cos \left(\alpha - \frac{\pi}{p} \right) - \cos \left(\beta - \frac{\pi}{p} \right) - \frac{\beta - \alpha}{2} \left[\sin \left(\alpha - \frac{\pi}{p} \right) + \sin \left(\beta - \frac{\pi}{p} \right) \right] \right\} \quad (7-37)$$

اتصال	p	U_p	$U_p / U_{di} \circ$	$\omega L_d I_{dlim \max} / U_p$	$\omega L_d I_{dlim \max} / U_{di} \circ$
ستاره سه فازه	۳	U_y	۰.۸۵۵	۰.۴۶۲	۰.۳۹۵
ستاره تک فازه	۲	U_y	۱.۱۱۱	۰.۹۰۰	۱.۰۰۰
ستاره شش فازه	۶	U_y	۰.۷۴۱	۰.۱۲۶	۰.۰۹۳۳
پل سه فازه	۶	$U = \sqrt{3} U_y$	۰.۷۴۱	۰.۱۲۶	۰.۰۹۳۳
پل تک فازه	۲	$U = 2 U_y$	۱.۱۱۱	۰.۹۰۰	۱.۰۰۰

شکل ۷-۲۰ داده‌های تعیین کننده در هدایت ناپیوسته.

۷-۳-۶ حد هدایت ناپیوسته

«حد هدایت ناپیوسته» موقعی حاصل می‌شود که زاویه هدایت جریان $\delta = \beta - \alpha = 2\pi/p$ باشد. از رابطه (۷-۳۷) حد مقدار متوسط جریان دایم چنین به دست می‌آید

$$I_{d \text{ lim}} = \frac{p\sqrt{2}U_p}{\pi\omega L_d} \left(\sin \frac{\pi}{p} - \frac{\pi}{p} \cos \frac{\pi}{p} \right) \sin \alpha \quad (7-38)$$

هدایت برای $I_d < I_{d \text{ lim}}$ ناپیوسته و برای $I_d > I_{d \text{ lim}}$ پیوسته است. جریان حدهم برای $\alpha = 90^\circ$ ، ما گزیم (بیشینه) است یعنی

$$I_{d \text{ lim max}} = \frac{p\sqrt{2}U_p}{\pi\omega L_d} \left(\sin \frac{\pi}{p} - \frac{\pi}{p} \cos \frac{\pi}{p} \right) \quad (7-39)$$

و از آن نتیجه می‌شود

$$I_{d \text{ lim}} = I_{d \text{ lim max}} \sin \alpha \quad (7-40)$$

مقادیر عددی $I_{d \text{ lim max}} / U_p$ ، برای اتصالهای اصلی، در جدول شکل ۷-۲۰ داده شده است. ملاحظه می‌شود که با افزایش شاخص ضریب p ، حد هدایت ناپیوسته، کاهش می‌یابد. این بستگی، اگر به جای فشار الکتریکی U_p ، ما گزیم فشار الکتریکی دایم ایدئال U_{dio} به کار رود، روشنتر می‌شود (به جدول شکل ۷-۲۰ مراجعه شود). نسبت به اتصال تک فازه ($p=2$)، حد هدایت ناپیوسته که برای اتصال ستاره سه فازه تقریباً ۴۰٪ است، برای اتصال شش فازه تا مقدار ۹٪ تنزل می‌کند.

۷-۳-۷ فشار الکتریکی دایم

مقدار متوسط فشار الکتریکی دایم برابر U_i است و چون از مقاومت اهمی R بار صرف نظر شده است، افت فشار الکتریکی وجود ندارد. از آنجا که مساحت فشار الکتریکی - زمان u_d نسبت به U_i ، در طول هدایت، باید صفر شود در دوسر القاگری L نیز هیچ افت فشار الکتریکی دایم وجود ندارد. هنگامی که هدایت جریان قطع است فشار الکتریکی دایم u_d برابر U_i است و در واقع، مبدل جریان قطع شده، نمی‌تواند هیچ فشار الکتریکی را اعمال نماید. فشار الکتریکی U_i را می‌توان از معادله (۷-۳۶) به دست آورد و با توجه به $U_{d\alpha} = U_i$ خواهیم داشت

$$U_{d\alpha} = \frac{\sqrt{2}U_p}{\beta - \alpha} \left[\sin \left(\beta - \frac{\pi}{p} \right) - \sin \left(\alpha - \frac{\pi}{p} \right) \right] \quad (7-41)$$

برای حد هدایت ناپیوسته، یعنی به ازای $\delta = \beta - \alpha = 2\pi/p$ پس از یک تبدیل ساده مثلثاتی نتیجه می‌شود

$$U_{d\alpha} = \frac{P}{\pi} \sin \frac{\pi}{p} \sqrt{2} U_p \cos \alpha \quad (42-7)$$

و با در نظر گرفتن رابطه بین U_{di0} و U_p (به شکل ۷-۲۰ مراجعه شود) داریم

$$U_{d\alpha} = U_{di0} \cos \alpha \quad (43-7)$$

که البته نظیر رابطه (۵-۱۲) است. در واقع در حد هدایت ناپیوسته، پدیده کموتاسیون وجود ندارد و فشار الکتریکی داریم $U_{d\alpha}$ برابر مقدار ایدئال U_{di0} است. فشار الکتریکی حالت بی‌باری (یعنی برای $I_d \rightarrow 0$) از رابطه (۷-۴۱) وقتی $\beta \rightarrow \alpha$ میل کند، چنین به دست می‌آید

$$U_{d\alpha} = \sqrt{2} U_p \cos \left(\alpha - \frac{\pi}{p} \right) \quad (44-7)$$

به ازای $\alpha = \pi/p$ ، فشار الکتریکی به مقدار ماگزیمم (بیشینه) خود که برابر دامنه فشار الکتریکی متناوب یعنی $\sqrt{2} U_p$ است می‌رسد.

۷-۳-۸ شرایط روشن شدن

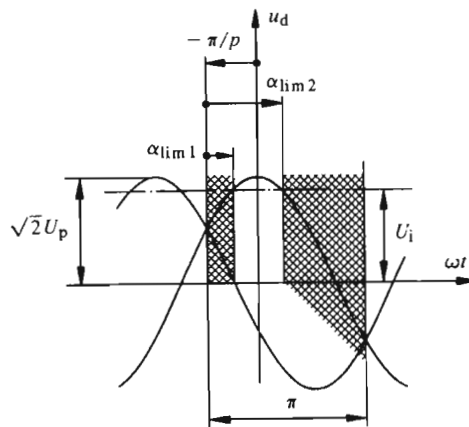
در ارتباط با فشار الکتریکی $U_{d\alpha} = U_i$ ، برای اینکه تیرستورها بتوانند روشن شوند محدوده‌ای برای زاویه تأخیر آتش α وجود دارد (به شکل ۷-۲۱ مراجعه شود). در لحظه روشن شدن، مقدار لحظه‌ای فشار الکتریکی فاز، یعنی $\sqrt{2} U_p \cos(-\pi/p + \alpha)$ ، باید بزرگتر یا دست‌کم برابر فشار الکتریکی U_i باشد. در غیر این صورت فشار الکتریکی آن‌ها به کاتد تیرستوری که باید روشن شود منفی است و تیرستور نمی‌تواند روشن شود. بنابراین مبدل جریان در حالت قطع می‌ماند و جریان داریم جاری نمی‌شود. زاویه حد از رابطه زیر به دست می‌آید

$$\sqrt{2} U_p \cos \left(-\frac{\pi}{p} + \alpha \right) = U_i \quad (45-7)$$

و بنابراین می‌توان نوشت

$$\cos\left(\frac{\pi}{p} - \alpha_{lim}\right) = \frac{U_i}{\sqrt{2} U_p} \quad (۷-۴۶)$$

این معادله دو پاسخ $\alpha_{lim 1}$ و $\alpha_{lim 2}$ دارد که نسبت به مبدأ مقارن اند (به شکل ۷-۲۱ مراجعه شود). چنانچه $\alpha < \alpha_{lim 1}$ یا $\alpha > \alpha_{lim 2}$ باشد، مبدل جریان روشن نمی شود.

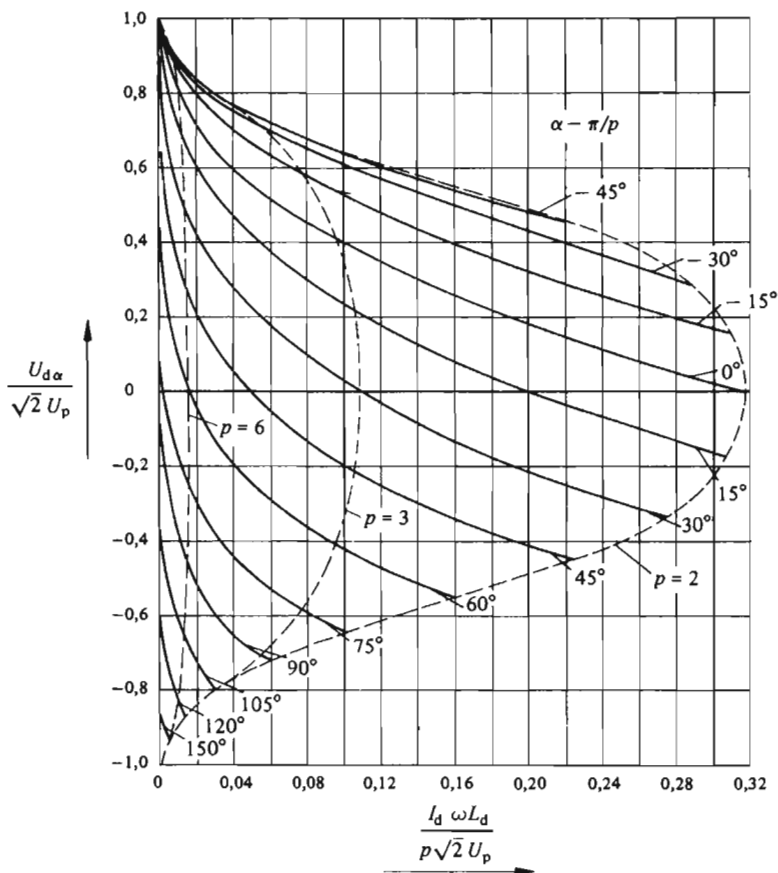


شکل ۷-۲۱ حدود روشن شدن در حالت هدایت ناپیوسته.

۷-۳-۹ مشخصه‌ها در کارکرد با هدایت ناپیوسته

«مشخصه‌های» مبدل جریان برای کار به صورت «هدایت ناپیوسته» در شکل ۷-۲۲ نشان داده شده است. بنا به چگونگی نمایش انتخاب شده، روند منحنیها مستقل از شاخص ضریب p است که فقط بر منحنی حد هدایت ناپیوسته (منحنیهای خط چین) اثر می گذارد. این مشخصه‌ها می توانند به راحتی از معادلات (۷-۳۷) و (۷-۴۱) برای هر زاویه تأخیر آتش α معین، با تغییر β از α تا $\alpha + \pi/2$ (حد هدایت ناپیوسته برای $p=2$) محاسبه شوند. هدایت ناپیوسته حتی برای کار به صورت اندولر (مقادیر منفی برای $U_{d\alpha}$) نیز امکان پذیر است.

از مشخصه‌های شکل ۷-۲۲ چنین برمی آید که شیب منحنیها، به عبارت دیگر مقاومت معادل داخلی، در کار به صورت هدایت ناپیوسته خیلی بالاست. این شیب یا مقاومت از مقاومت معادل داخلی برای حالت هدایت پیوسته که با رابطه (۶-۳۲) داده شده بیشتر است. این رفتار، برای مدارهای تنظیم اشکالاتی ایجاد می کند، زیرا لازم خواهد بود تا تنظیم کننده دوباره تطبیق داده شود. در عمل سعی بر این است که حتی الامکان با افزایش القاگری L_d ، محدوده هدایت ناپیوسته کاهش داده شود. این عمل در صورت لزوم با اضافه



شکل ۲۲-۷ مشخصه‌های مبدل جریان در کارکرد با هدایت ناپیوسته.

کردن القاگرهای صاف‌کننده‌ای که می‌توانند قابل اشباع نیز باشند انجام می‌پذیرد.

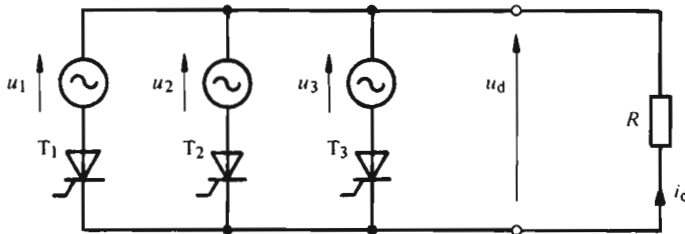
۴-۷ بار اهمی خالص

۴-۷-۱ کلیات

اینک کار مبدل جریان در حالت خاص دیگری را، که عبارت از بار اهمی خالص است، بررسی می‌کنیم. جهت ساده‌تر شدن مطالعه، $L_c = 0$ ، یعنی، القاگری کموتاسیون ناچیز فرض می‌شود. این موضوع کموتاسیون بینهایت سریع جریان را امکان‌پذیر می‌سازد. علاوه بر آن فشار الکتریکی داخلی U_i نیز صفر فرض می‌شود.



در این مطالعه به مبدل جریان با اتصال ستاره سه فاز، بر مبنای طرح واره نشان داده شده در شکل ۲۳-۷، اکتفا می‌کنیم. نتایج به دست آمده را می‌توان به راحتی برای اتصال‌های دیگر تعمیم داد.



شکل ۲۳-۷ طرح واره اتصال ستاره سه فاز با بار اهمی خالص.

۲-۳-۷ فشار الکتریکی دایم

برای تعیین روند تغییرات فشار الکتریکی دایم u_d ، باید رابطه بین فشار الکتریکی و جریان را در نظر گرفت.

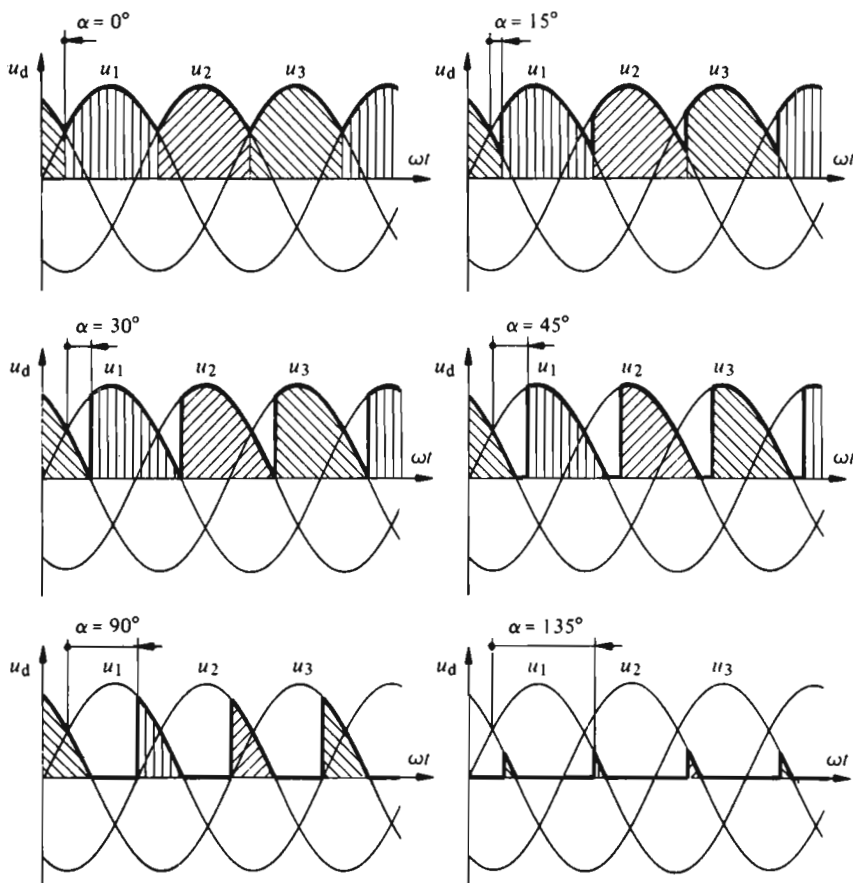
$$u_d = Ri_d \quad (۴۷-۷)$$

با توجه به اینکه جریان i_d فقط می‌تواند مثبت باشد، مقادیر لحظه‌ای فشار الکتریکی دایم نیز همواره مثبت خواهد بود.

شکل ۲۴-۷ روند تغییرات فشار الکتریکی دایم u_d را برای زوایای مختلف تأخیر آتش α نشان می‌دهد. برای $\alpha \leq 30^\circ$ ، روند تغییرات فشار الکتریکی درست همانند کار ایدئال است (به بند ۵-۹ مراجعه شود). مع‌هذا برای $\alpha \geq 30^\circ$ روند تغییرات فشار الکتریکی دایم با حالت ایدئال فرق می‌کند. به علت صفر شدن جریان، فشار الکتریکی دایم u_d در یک فاصله زمانی کم و بیش طولانی، صفر می‌شود. برای $\alpha = 150^\circ$ ، فشار الکتریکی دایم همواره صفر است و برای $\alpha > 150^\circ$ روشن شدن هیچ یک از تیرستورها امکان پذیر نیست.

جریان دایم i_d برای $\alpha > 30^\circ$ ناپیوسته است. بنابراین، پدیده تداخل (که در اینجا برای سهولت صرف نظر شده است) فقط در محدوده $0^\circ \leq \alpha \leq 30^\circ$ وجود دارد. در محاسبه مقدار متوسط فشار الکتریکی دایم، لازم است این دو محدوده از هم تمیز داده شوند. برای $0^\circ \leq \alpha \leq 30^\circ$ ، همانند حالت ایدئال، می‌توان نوشت

$$\begin{aligned} U_{di\alpha} &= \frac{3}{2\pi} \int_{-\pi/3+\alpha}^{\pi/3+\alpha} \sqrt{2} U_y \cos \omega t \, d\omega t = \frac{3\sqrt{6}}{2\pi} U_y \cos \alpha = \\ &= U_{di0} \cos \alpha \end{aligned} \quad (۴۸-۷)$$



شکل ۲۴-۷ روند تغییرات فشار الکتریکی دائم u_d برای بار اهمی خالص.

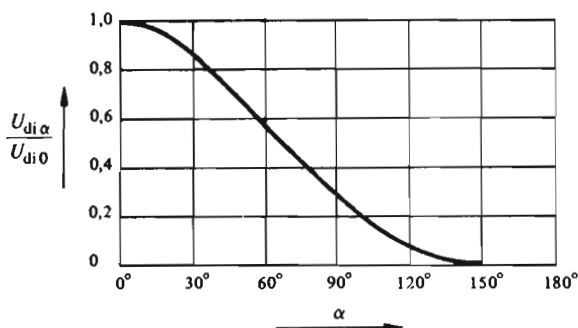
در این رابطه ماگزیمم (بیشینه) فشار الکتریکی دائم ایدئال U_{dio} با توجه به رابطه (۵-۱۰) جایگزین شده است. برای محدوده دیگری یعنی $30^\circ \leq \alpha \leq 150^\circ$ داریم

$$U_{di\alpha} = \frac{3}{2\pi} \int_{-\pi/3+\alpha}^{\pi/3} \sqrt{2} U_y \cos \omega t \, d\omega t = \frac{3\sqrt{2}}{2\pi} U_y [1 - \sin(-\pi/3 + \alpha)] =$$

$$= U_{dio} \frac{1 - \sin(\alpha - \pi/3)}{\sqrt{3}} \quad (۴۹-۷)$$

۳-۴-۷ مشخصه

مشخصه مبدل جریان با اتصال ستاره سه فاز به بار اهمی خالص را می توان به کمک دو رابطه (۴۸-۷) و (۴۹-۷) رسم کرد. این منحنی در شکل ۲۵-۷ نشان داده شده است. در اینجا باید دو نکته را تذکر داد: از طرفی فشار الکتریکی $U_{di\alpha}$ فقط مثبت است و از طرف دیگر، امنه تغییرات زاویه تأخیر آتش α بین 0° و 150° قرار دارد.



شکل ۲۵-۷ مشخصه مبدل جریان با بار اهمی خالص.

فصل هشتم

ترانسفورماتور برای مبدل‌های جریان

۸-۱ مقدمه

۸-۱-۱ کلیات

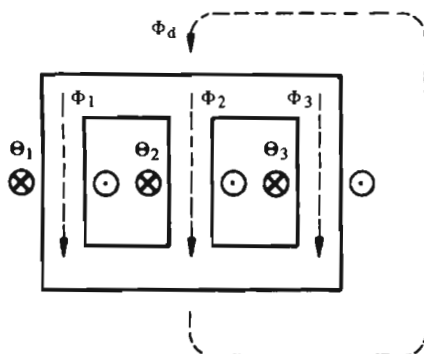
جریان‌های جاری در ترانسفورماتور مبدل‌های جریان، سینوسی نیستند بلکه مستطیلی و در اغلب موارد نامتعادل‌اند. بجز در مبدل‌های جریان با اتصال پل، جریان‌های ثانویه ترانسفورماتور، جریان‌هایی دایم‌اند. بنابراین درباره کارکرد این ترانسفورماتورها باید خصوصیات را در نظر گرفت. این خصوصیات در اینجا بررسی می‌شوند. خواهیم دید، که چگونگی اتصال بین سیم‌پیچها در کارکرد ترانسفورماتور تغذیه-کننده مبدل جریان اثری مهم دارد. بررسی را به مطالعه ترانسفورماتورهای سه فازه محدود می‌کنیم. ترانسفورماتورهای تک فازه هم می‌توانند به روشی مشابه بررسی بشوند.

۸-۱-۲ روابط بنیادی در ترانسفورماتور سه فازه

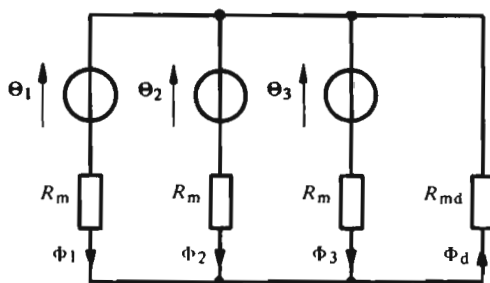
مدار مغناطیسی ترانسفورماتور سه فازه در شکل ۸-۱ نشان داده شده است. فورانهای Φ_1 ، Φ_2 و Φ_3 در سه هسته جاری می‌شوند. هنگامی که جریان ثانویه مؤلفه دایم داشته باشد، يك «فوران دایم Φ_h » بین دویوغ^۱ (فوران همپولر) به وجود می‌آید که از طریق هوا یا آهن محفظه احتمالی ترانسفورماتور عبور می‌کند. فوران Φ_h را نباید با فوران نشی^۲ که قسمتی از آن به توسط سیم‌پیچهای اولیه و ثانویه در بر گرفته می‌شوند، اشتباه کرد.

1) culasse

2) flux de fuite



شکل ۸-۱ مدار مغناطیسی در ترانسفورماتور سه فازه.



شکل ۸-۲ طرح واره معادل مدار مغناطیسی در ترانسفورماتور سه فازه.

برای مدار مغناطیسی فوق، طرح واره معادل نشان داده شده در شکل ۸-۲ را می توان در نظر گرفت که در آن R_m مقاومت مغناطیسی هر هسته و R_{md} مقاومت مغناطیسی مربوط به فوران Φ_d است. نسبت به R_m بسیار بزرگ است. با در نظر گرفتن نیروهای محرك مغناطیسی Θ_1 ، Θ_2 و Θ_3 در هر هسته، می توان نوشت

$$R_m \Phi_1 + R_{md} \Phi_d = \Theta_1 \quad (۱-۸)$$

$$R_m \Phi_2 + R_{md} \Phi_d = \Theta_2 \quad (۲-۸)$$

$$R_m \Phi_3 + R_{md} \Phi_d = \Theta_3 \quad (۳-۸)$$

برای فورانها هم شرط زیر برقرار است

$$\Phi_1 + \Phi_2 + \Phi_3 = \Phi_d \quad (4-8)$$

با جمع کردن روابط (۱-۸) تا (۳-۸) و در نظر گرفتن رابطه (۴-۸) برای فوران
دایم از يك يوغ به يوغ ديگر، نتیجه می‌شود

$$\Phi_d = \frac{1}{R_m + 3R_{md}} \sum_{i=1}^r \Theta_i \quad (5-8)$$

فوران در هر هسته (بازیر نویس ۳، ۲، ۱) می‌تواند چنین نوشته شود

$$\Phi_k = \frac{1}{R_m} \left(\Theta_k - \frac{R_{md}}{R_m + 3R_{md}} \sum_{i=1}^r \Theta_i \right) \quad (6-8)$$

و با انجام دادن تبدیل زیر

$$\frac{R_{md}}{R_m + 3R_{md}} = \frac{1}{3} \frac{3R_{md} + R_m - R_m}{R_m + 3R_{md}} = \frac{1}{3} - \frac{1}{3} \frac{R_m}{R_m + 3R_{md}} \quad (7-8)$$

و توجه به رابطه (۵-۸) خواهیم داشت

$$\Phi_k = \frac{1}{R_m} \left(\Theta_k - \frac{1}{3} \sum_{i=1}^r \Theta_i \right) + \frac{1}{3} \Phi_d \quad (8-8)$$

برای ساده کردن محاسبه از جریان مغناطیس کننده صرف نظر می‌شود. این موضوع
ایجاب می‌کند $R_m = 0$ باشد، که برای مدار مغناطیسی اشباع نشده، قابل قبول است.
فوران دایم از يك يوغ به يوغ ديگر به صورت زیر درمی‌آید

$$\Phi_d = \frac{1}{3R_{md}} \sum_{i=1}^r \Theta_i \quad (9-8)$$

برای اینکه فوران Φ_k هسته محدود بماند، لازم است جمله داخل پرانتز در معادله
(۸-۸) از بین برود. بدین ترتیب رابطه مهم زیر بین نیروهای محرك مغناطیسی به دست
می‌آید

$$\Theta_k = \frac{1}{3} \sum_{i=1}^r \Theta_i \quad (10-8)$$



نیروهای محرک مغناطیسی Θ_k به جریان در سیم پیچهای اولیه و ثانویه بستگی دارند. برای ساده تر کردن روابط، نسبت تبدیل بین دورهای اولیه N_p و دورهای ثانویه N_s را برابر واحد فرض می کنیم

$$\ddot{u} = \frac{N_p}{N_s} = 1 \quad (11-8)$$

اگر این شرط برقرار نباشد، به کمک روشهای شناخته شده در تئوری (نظریه) ترانسفورماتور، ابتدا باید کلیه کمیات طرف اولیه را به طرف ثانویه برد. با فرض $N_p = N_s = N$ ، نیروی محرک مغناطیسی هر هسته عبارت است از

$$\Theta_k = N(i_{pk} - i_{sk}) \quad (12-8)$$

در این رابطه i_{pk} و i_{sk} به ترتیب جریانهای سیم پیچهای اولیه و ثانویه واقع بر هسته k هستند. با بردن رابطه فوق در معادله (۸-۱۰)، جریانهای اولیه چنین نوشته می شوند

$$i_{pk} = i_{sk} + \frac{1}{3} \sum_{i=1}^3 (i_{pi} - i_{si}) \quad (13-8)$$

برای تعیین جریانهای اولیه و ثانویه، لازم است چگونگی اتصال بین سیم پیچهای ترانسفورماتور و همچنین چگونگی اتصال مبدل جریان در نظر گرفته شود. در بندهای آینده ترکیبهای مختلف این اتصالات بررسی خواهند شد.

۲-۸ ترانسفورماتور ستاره-ستاره تغذیه کننده

مبدل جریان با اتصال ستاره سه فاز

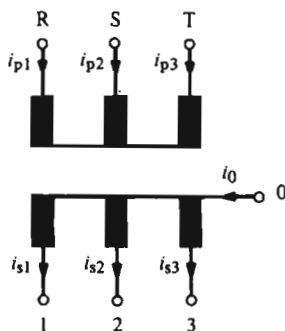
۱-۲-۸ روابط برای جریانها

ابتدا حالت ترانسفورماتور ستاره-ستاره ای را که طرح واره آن در شکل ۳-۸ نشان داده شده است، مطالعه خواهیم کرد.

اتصال ستاره بدون سیم صفر ایجاب می کند که مجموع جریانهای اولیه صفر باشد

$$\sum_{i=1}^3 i_{pi} = 0 \quad (14-8)$$

مجموع جریانهای ثانویه (در اتصال ستاره) با جریان i_0 که از سیم صفر می گذرد و به چگونگی اتصال مبدل جریان بستگی دارد، برابر است. چون در این حالت اتصال



شکل ۸-۳ ترانسفورماتور با اتصال ستاره - ستاره ای.

مبدل جریان به صورت ستاره سه فازه است، جریان i_0 با جریان دائم i_d برابر خواهد بود (به شکل ۵-۳ مراجعه شود)

$$\sum_{i=1}^3 i_{si} = i_d \quad (8-15)$$

از معادله عمومی (۸-۱۳) نتیجه می شود

$$i_{pk} = i_{sk} - \frac{1}{3} i_d \quad (8-16)$$

جریان ثانویه i_{sk} برابر است با جریان گذرنده از تیرستور شاخه مربوط، که در طول $1/3$ دوره تناوب همان جریان دائم i_d است. روند تغییرات جریان دائم i_d (که تموجی فرض شده) و همچنین روند تغییرات جریانهای i_{s1} و i_{p1} در سیم پیچهای ثانویه و اولیه هسته ۱، در شکل ۸-۴ نشان داده شده اند. روند تغییرات جریان در سیم پیچهای هسته های دیگر کاملاً مشابه i_{s1} و i_{p1} اند فقط به اندازه یک سوم دوره تناوب جابجاء شده اند. برای ساده شدن، از پدیده تداخل صرف نظر شده است.

۸-۲-۲ فوران دائم

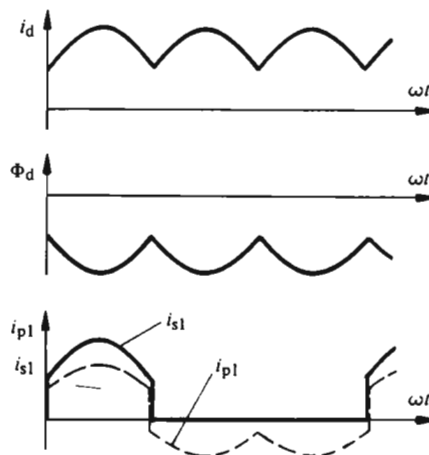
نیروی محرك مغناطیسی هر يك از هسته ها صفر نیست بلکه بنا به روابط (۸-۱۲) و (۸-۱۶) عبارت است از

$$\Theta_k = -\frac{N}{3} i_d \quad (8-17)$$

که باعث پیش‌مغناطیس‌شدگی هسته می‌شود.
در نتیجه، فوران دایم Φ_d از رابطه (۸-۹) چنین به‌دست می‌آید

$$\Phi_d = - \frac{N i_d}{3 R_{md}} \quad (۸-۱۸)$$

بنابراین، فوران دایم که از يك یوغ به یوغ دیگر بسته می‌شود با مقدار لحظه‌ای جریان دایم i_d متناسب است و اگر این جریان کاملاً صاف نباشد، Φ_d نیز تموجی خواهد بود. روند تغییرات فوران دایم Φ_d نیز در شکل ۸-۴ نشان داده شده است. این فوران، يك مؤلفه دایم و يك تموج سوار بر آن دارد. چون بنابر معادله (۸-۸)، $1/3$ فوران Φ_d از هر هسته ترانسفورماتور عبور می‌کند، فورانهای مربوط نیز مؤلفه دایمی خواهند داشت که باعث افزایش و تغییر شکل جریان مغناطیس‌کننده می‌شود. فرکانس (بسامد) تموج فوران Φ_d سه برابر فرکانس شبکه است. بنابراین تلفات اضافی بسیاری در اثر جریان فوکو^۱ در محفظه ترانسفورماتور به‌وجود می‌آید که باعث بیشتر گرم شدن آن می‌شود. از این رو، اتصال ستاره-ستاره‌ای به‌هیچ وجه نمی‌تواند برای تغذیه مبدل جریان با اتصال ستاره سه‌فاز به‌کار رود.



شکل ۸-۴ روند تغییرات جریانهای مختلف و فوران دایم Φ_d در ترانسفورماتور ستاره-ستاره‌ای.

۳-۸ ترانسفورماتور مثلث - ستاره‌ای تغذیه کننده

مبدل جریان با اتصال ستاره سه فاز

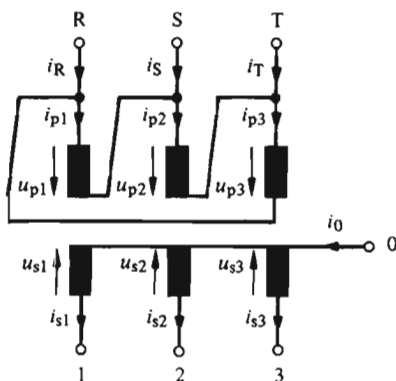
۱-۳-۸ روابط برای جریانها

در اینجا حالتی را بررسی می‌کنیم که ترانسفورماتور به صورت مثلث-ستاره بسته شده است. طرح وارده مربوط در شکل ۵-۸ نشان داده شده است. اتصال مثلث در اولیه، ایجاب می‌کند که مجموع فشارهای الکتریکی اولیه برابر صفر باشد.

$$\sum_{k=1}^3 u_{pk} = 0 \quad (۱۹-۸)$$

با صرف نظر کردن از فوران ناشی، فشار الکتریکی القا شده در اولیه برابر $u_{pk} = N d\Phi_k / dt$ است و در نتیجه می‌توان نوشت

$$\sum_{k=1}^3 \frac{d\Phi_k}{dt} = 0 \quad (۲۰-۸)$$



شکل ۵-۸ ترانسفورماتور با اتصال مثلث - ستاره.

که با استفاده از رابطه (۴-۸) به صورت زیر درمی‌آید

$$\frac{d\Phi_d}{dt} = 0 \quad (۲۱-۸)$$

و از انتگرال گیری آن نتیجه می شود

$$\Phi_d = \text{مقداری ثابت} \quad (22-8)$$

بنابراین، در ترانسفورماتوری که اولیه اش به صورت مثلث بسته شده است، فوران Φ_d باید ثابت بماند و ترانسفورماتور برای مؤلفه موجی Φ_d تشکیل اتصال کوتاه می دهد.

از معادله های (۹-۸) و (۱۲-۸) نتیجه می شود

$$\Phi_d = \frac{N}{3R_{md}} \sum_{i=1}^3 (i_{pi} - i_{si}) \quad (23-8)$$

چون Φ_d ثابت است، داریم

$$\sum_{i=1}^3 (i_{pi} - i_{si}) = c \quad (24-8)$$

که در آن c مقداری است ثابت. با استفاده از رابطه (۱۳-۸) برای جریانها به دست می آید

$$i_{pk} = i_{sk} + \frac{1}{3} c \quad (25-8)$$

برای تعیین مقدار ثابت c ، از دوطرف این معادله به طور جداگانه و بین دو حد $\omega t = 0$ و $\omega t = 2\pi$ انتگرال می گیریم. چون جریان اولیه جریانی متناوب است، انتگرال i_{pk} صفر می شود. در صورتی که انتگرال i_{sk} به چگونگی اتصال مبدل جریان بستگی دارد. بالاخره انتگرال مقدار ثابت c برابر $2\pi c$ می شود و داریم

$$0 = \int_0^{2\pi} i_{sk} d\omega t + \frac{1}{3} 2\pi c \quad (26-8)$$

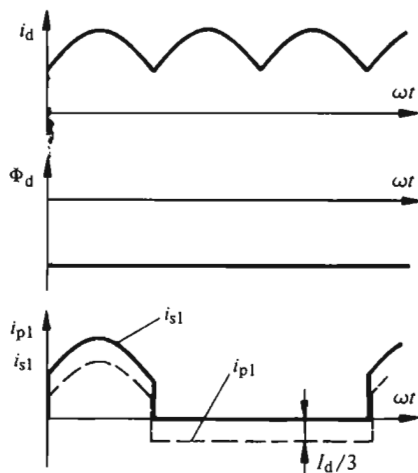
برای مبدل جریان با اتصال ستاره سه فاز می توان نوشت

$$\int_0^{2\pi} i_{sk} d\omega t = \frac{2\pi}{3} I_d \quad (27-8)$$

I_d مقدار متوسط جریان دایم است، که خود در واقع، حالت موجی دارد. بالاخره از معادله (۲۶-۸) نتیجه می شود $c = -I_d$ و با بردن این مقدار در معادله (۲۵-۸)، رابطه زیر به دست می آید

$$i_{pk} = i_{sk} - \frac{1}{3} I_d \quad (28-8)$$

تفاوت این رابطه با معادله (۸-۱۶) در این است که در اینجا به جای مقدار لحظه‌ای i_d ، مقدار متوسط جریان دائم I_d وارد می‌شود.



شکل ۸-۶ روند تغییرات جریانهای مختلف و فوران دائم Φ_d در ترانسفورماتور با اتصال مثلث-ستاره.

شکل ۸-۶ روند تغییرات جریان دائم i_d و جریانهای i_{p1} در اولیه و i_{s1} در ثانویه هسته ۱ را نشان می‌دهد. در اینجا نیز از پدیده کموتاسیون صرف نظر شده است.

۸-۳-۲ فوران دائم

نیروی محرکه مغناطیسی صفر نمی‌شود و بنا به روابط (۸-۱۲) و (۸-۲۸) برابر است با

$$\Theta_k = -\frac{N}{3} I_d \quad (29-8)$$

نیروی محرکه مغناطیسی Θ_k باعث می‌شود تا هسته به توسط یک جریان دائم، از پیش مغناطیس شود و جریان مغناطیس کننده ترانسفورماتور افزایش یابد. معمولاً این افزایش به حد قابل قبولی برای کار ترانسفورماتور، محدود می‌شود. مع هذا باید در تعیین ابعاد ترانسفورماتور



این موضوع را در نظر گرفت و نسبت به حالت معمولی چگالی فوران (اندوکسیون) کوچکتري انتخاب کرد.

فوران Φ_d از رابطه (۲۳-۸) به دست می آید و با توجه به رابطه (۲۸-۸) نتیجه می شود

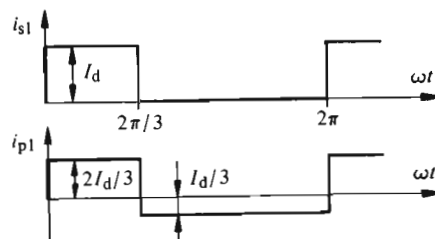
$$\Phi_d = - \frac{NI_d}{3R_{md}} \quad (30-8)$$

بنابراین، فوران Φ_d ثابت است و در محفظه ترانسفورماتور تلفات اضافی ایجاد نمی کند. روند تغییرات Φ_d نیز در شکل ۸-۶ نشان داده شده است.

اتصال مثلث-ستاره ترانسفورماتور، به علت پیش مغناطیس شدگی آن، فقط در قدرتهای نسبتاً پایین در حدود ۲۰ تا ۳۰ کیلووات به کار می رود.

۳-۳-۸ جریانهای مؤثر و قدرتهای ظاهری

برای تعیین مقدار مؤثر جریانها، در اولیه و ثانویه، فرض می کنیم که جریان دایم I_d کاملاً صاف باشد. این فرض ایجاب می کند که جریانها در اولیه و ثانویه مستطیلی باشند (شکل ۸-۷)



شکل ۸-۷ روند تغییرات جریان در اولیه و ثانویه ترانسفورماتور با اتصال مثلث-ستاره و با جریان دایم I_d صاف.

جریان مؤثر در ثانویه از رابطه زیر به دست می آید

$$I_{s\text{ eff}} = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \left(I_d^2 \frac{2\pi}{3} \right)} = \frac{1}{\sqrt{3}} I_d \quad (31-8)$$

در صورتی که برای جریان مؤثر در اولیه نتیجه می‌شود

$$I_{p\text{ eff}} = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \left[\left(\frac{2}{3} I_d \right)^2 \frac{2\pi}{3} + \left(\frac{1}{3} I_d \right)^2 \frac{4\pi}{3} \right]} = \frac{\sqrt{2}}{3} I_d \quad (32-8)$$

در نتیجه به ازای مقاومتهای مساوی، تلفات اکتیو در ثانویه ۵۰٪ بیشتر از تلفات اکتیو در اولیه است.

چون نسبت تبدیل ترانسفورماتور برابر واحد فرض شده است، فشارهای الکتریکی بین دو سر سیم پیچهای اولیه و ثانویه برابرند و قدرت ظاهری در ثانویه و اولیه به ترتیب عبارتند از

$$S_s = 3 U_y I_{s\text{ eff}} \quad (33-8)$$

$$S_p = 3 U_y I_{p\text{ eff}} \quad (34-8)$$

هرگاه U_y به توسط U_{dio} مطابق رابطه (۵-۱۰) با $s=1$ و $q=3$ جایگزین شود و به جای $I_{s\text{ eff}}$ و $I_{p\text{ eff}}$ مقادیرشان از روابط (۳۱-۸) و (۳۲-۸) قرار گیرد، نتیجه می‌شود

$$S_s = \frac{\pi \sqrt{2}}{3} U_{dio} I_d = 1.481 P_{dio} \quad (35-8)$$

و

$$S_p = \frac{2\pi}{3\sqrt{3}} U_{dio} I_d = 1.209 P_{dio} \quad (36-8)$$

P_{dio} یعنی «قدرت دایم ایدئال» برابر است با

$$P_{dio} = U_{dio} I_d \quad (37-8)$$

ابعاد ترانسفورماتور باید برای یک قدرت نوعی S_t تعیین شده باشد. «قدرت نوعی» عبارت از میانگین قدرت ظاهری در اولیه و ثانویه ترانسفورماتور است که در حالت فوق چنین می‌شود

$$S_t = \frac{S_s + S_p}{2} = \frac{\pi}{3} \left(\frac{1}{\sqrt{2}} + \frac{1}{\sqrt{3}} \right) P_{dio} = 1.345 P_{dio} \quad (38-8)$$

1) puissance typique

ابعاد ترانسفورماتوری که مبدل جریان با اتصال ستاره سه فاز را تغذیه می‌کند، چون جریانهای مستطیلی شکل، مؤلفه دایمی نیز در ثانویه دارند، باید برای قدرتی در حدود ۳۵٪ بیشتر از قدرت ایدئال دایم مبدل (P_{dio}) تعیین شوند. این امر، ابعاد و قیمت ترانسفورماتور را افزایش می‌دهد. در موقع تعیین ابعاد چنین ترانسفورماتوری شناخت تمامی این خصوصیات الزامی است. همچنین باید تلفات اضافی مربوط به هارمونیکها را، که به جهت اثر پوسته باعث افزایش مقاومت سیم پیچها می‌شود، در نظر گرفت.

۴-۸ ترانسفورماتور ستاره-زیگزاگ تغذیه کننده مبدل جریان با اتصال ستاره سه فاز

۱-۴-۸ روابط برای جریانها

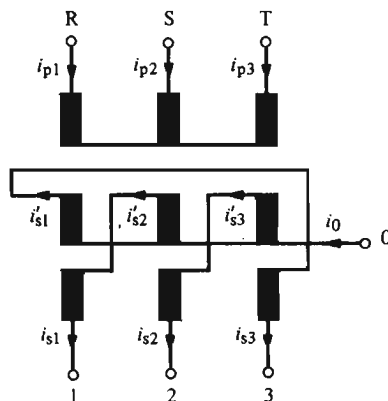
حالت يك ترانسفورماتور با اتصال ستاره-زیگزاگ، به كمك طرح واره نشان داده شده در شکل ۸-۸ بررسی خواهد شد.

روی هر هسته این ترانسفورماتور دو سیم پیچ ثانویه وجود دارد، بنا بر این لازم است رابطه (۱۲-۸) مربوط به نیروی محرك مغناطیسی تغییر یابد. با فرض اینکه تعداد دورهای کلیه سیم پیچها N است و با در نظر گرفتن جهت مغناطیس کنندگی جریانها می‌توان نوشت

$$\Theta_k = N (i_{pk} - i_{sk} + i'_{sk}) \quad (۳۹-۸)$$

و رابطه جریان اولیه به جای رابطه (۱۳-۸) به صورت زیر درمی آید

$$i_{pk} = i_{sk} - i'_{sk} + \frac{1}{3} \sum_{i=1}^3 (i_{pi} - i_{si} + i'_{si}) \quad (۴۰-۸)$$



شکل ۸-۸ ترانسفورماتور با اتصال ستاره-زیگزاگ.

نبودن سیم صفر در اولیه باعث می‌شود تا مجموع جریانهای اولیه برابر صفر باشد،

یعنی

$$\sum_{i=1}^r i_{pi} = 0 \quad (41-8)$$

مجموع جریانها در ثانویه با جریان i_o برابر است، و این جریان به نوبه خود، در مبدل جریان با اتصال ستاره سه فاز، برابر جریان دائم i_d است. بنابراین داریم

$$\sum_{i=1}^r i_{si} = \sum_{i=1}^r i'_{si} = i_d \quad (42-8)$$

بدین ترتیب معادله (40-8) به صورت زیر خلاصه می‌شود

$$i_{pk} = i_{sk} - i'_{sk} \quad (43-8)$$

در شکل ۹-۸ جریان دائم i_d ، جریان اولیه i_{p1} و جریان ثانویه i_{s1} (برای فاز ۱) نشان داده شده‌اند. برای سادگی، در اینجا نیز از پدیده کموتاسیون صرف نظر شده است.

۹-۴-۸ فوران دائم

ملاحظه می‌کنیم که بنا بر معادله (۳۹-۸)، نیروی محرکه مغناطیسی صفر می‌شود

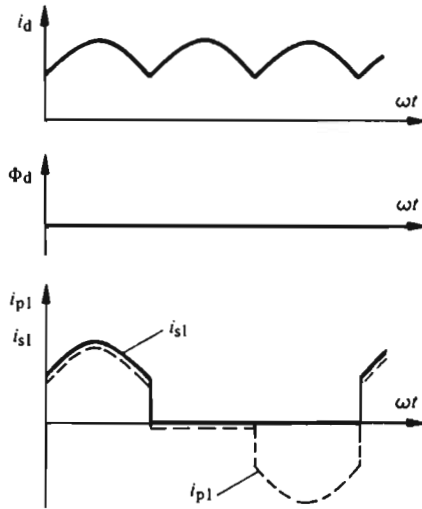
$$\Theta_k = 0 \quad (44-8)$$

بنابراین هیچ گونه پیش مغناطیس شدگی بر ترانسفورماتور اثر نمی‌کند و جریان مغناطیس-کننده ترانسفورماتور متحمل هیچ گونه افزایشی نمی‌شود از رابطه (۹-۸) نتیجه می‌شود

$$\Phi_d = 0 \quad (45-8)$$

بنابراین هیچ گونه فوران دائمی از یک یوغ به یوغ دیگر نمی‌گذرد (به شکل ۹-۸ مراجعه شود).

اتصال زیگززاگ در ثانویه، به خوبی برای تغذیه مبدل جریان با اتصال ستاره سه فاز مناسب است. در قدرتهای بالا باید الزاماً از این اتصال استفاده شود. در ضمن اتصال اولیه هیچ گونه اثری در رفتار ترانسفورماتور ندارد و حتی با اتصال مثلث در اولیه هم فوران دائم Φ_d صفر می‌شود.



شکل ۸-۹ روند تغییرات جریانهای مختلف و فوران دائم Φ_d در ترانسفورماتور با اتصال ستاره-زیگزاگه.

۸-۴-۳ جریانهای مؤثر و قدرتهای ظاهری

مقدار مؤثر جریانهای اولیه و ثانویه، باز هم برای جریان دائم I_d کاملاً صاف، تعیین می‌شود. بدین ترتیب، مطابق شکل ۸-۱۰، روند تغییرات جریان در اولیه و ثانویه مستطیلی است.

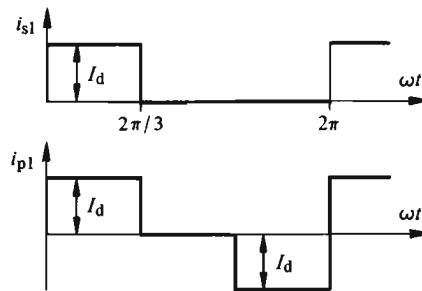
جریان مؤثر در ثانویه برابر است با

$$I_{s\text{ eff}} = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \left(I_d^2 \frac{2\pi}{3} \right)} = \frac{1}{\sqrt{3}} I_d \quad (۴۶-۸)$$

و برای جریان مؤثر در اولیه، می‌توان رابطه زیر را نوشت

$$I_{p\text{ eff}} = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \left[I_d^2 \frac{2\pi}{3} + (-I_d)^2 \frac{2\pi}{3} \right]} = \sqrt{\frac{2}{3}} I_d \quad (۴۷-۸)$$

قدرت ظاهری کل در ثانویه ترانسفورماتور بنا بر قرارداد، برابر مجموع قدرتهای ظاهری مربوط به تک تک شش سیم پیچ است



شکل ۸-۱۰ جریان در اولیه و ثانویه ترانسفورماتور با اتصال ستاره-زیگزاگ و جریان داریم کاملاً صاف.

$$S_s = \epsilon U_s I_{s \text{ eff}} \quad (48-8)$$

که در آن U_s مقدار مؤثر فشار الکتریکی تولید شده هر سیم پیچ ثانویه است. قدرت ظاهری در اولیه هم از رابطه زیر به دست می آید

$$S_p = 3 U_p I_{s \text{ eff}} \quad (49-8)$$

که در آن U_p فشار الکتریکی مؤثر هر سیم پیچ اولیه است. چون نسبت تبدیل بین سیم پیچهای مختلف برابر واحد فرض شده، $U_p = U_s$ است. فشار الکتریکی ساده U_y (بین سرهای ۱، ۲، ۳ ثانویه و نقطه خنثای ۰) که در مبدل جریان اثر می کند، برای اتصال زیگزاگ، عبارت است از

$$U_y = \sqrt{3} U_s \quad (50-8)$$

اگر به جای U_y مقدار U_{dio} ، از رابطه (۵۰-۱۰) با $s=1$ و $q=3$ ، قرار داده شود، می توان نوشت

$$S_s = \frac{4\pi}{3\sqrt{6}} U_{dio} I_d = 17710 P_{dio} \quad (51-8)$$

و

$$S_p = \frac{2\pi}{3\sqrt{3}} U_{dio} I_d = 17209 P_{dio} \quad (52-8)$$

در این روابط، P_{di0} قدرت ایدئال دایم است (به معادله ۸-۳۷ مراجعه شود).
برای مشخص کردن ابعاد ترانسفورماتور، قدرت نوعی تعیین کننده است و داریم

$$S_t = \frac{S_s + S_p}{2} = \frac{\pi}{3\sqrt{3}} (\sqrt{2} + 1) P_{di0} = 1.460 P_{di0} \quad (8-53)$$

ملاحظه می شود که قدرت نوعی S_t در اتصال زیگزآگ بزرگتر از قدرت نوعی در اتصال ثانویه ستاره است، زیرا، در این حالت، روی هر هسته سه سیم پیچ وجود دارد. عیب بالا بودن قدرت نوعی با این مزیت که در این اتصال، فوران دایم وجود ندارد، جبران می شود. بنابراین در مدار مغناطیسی می توان چگالی فوران (اندوکسیون) را معمولی انتخاب کرد.

۸-۵ ترانسفورماتور تغذیه کننده مبدل جریان با اتصال پل سه فازه

۸-۵-۱ فوران دایم

هر گاه ترانسفورماتوری مبدل جریان با اتصال پل سه فازه ای را تغذیه کند، جریان i که به طرف نقطه خنثای سیم پیچهای ثانویه جاری می شود صفر و در نتیجه فوران دایم نیز صفر است

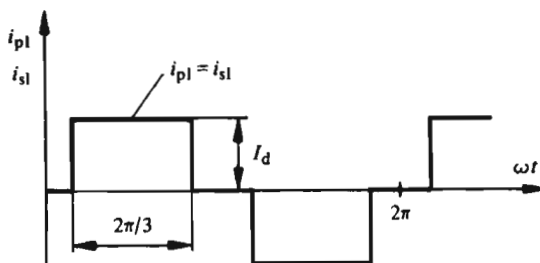
$$\Phi_d = 0 \quad (8-54)$$

این موضوع برای هر نوع اتصال سیم پیچهای اولیه صادق است. همین نتیجه با توجه به این امر که جریانهای جاری در خطوط تغذیه مبدل جریان، با اتصال پل سه فازه، جریانهای متناوب و بدون مؤلفه دایمی هستند، نیز حاصل می شود. بدین ترتیب، فوران دایم Φ_d پدید نمی آید و کارکرد ترانسفورماتور هیچ گونه مسئله ای ایجاد نمی کند.

۸-۵-۲ جریانهای مؤثر و قدرتهای ظاهری

روند تغییرات جریانهای مبدل جریان با اتصال پل سه فازه را تغذیه می کند در بند ۵-۳-۶ داده شده است (به شکل ۵-۱۶ مراجعه شود). این جریان برابر جریان اولیه و ثانویه ترانسفورماتور است. اگر از پدیده تداخل صرف نظر شود، مطابق شکل ۸-۱۱ این جریان روند تغییرات مستطیلی خواهد داشت و طی مدت زمان مربوط به $2\pi/3$ برابر I_d و $-I_d$ است. مقدار مؤثر این جریان از رابطه زیر به دست می آید

$$I_{\text{eff}} = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \left[I_d^2 \frac{2\pi}{3} + (-I_d)^2 \frac{2\pi}{3} \right]} = \sqrt{\frac{2}{3}} I_d \quad (55-8)$$



شکل ۸-۱۱ جریان در اولیه و ثانویه ترانسفورماتور تغذیه‌کننده مبدل جریان با اتصال پل سه‌فاز با فرض جریان دائم I_d کاملاً صاف.

برای ترانسفورماتور با اتصال ستاره - ستاره، قدرت ظاهری در اولیه و ثانویه عبارت است از

$$S_s = S_p = 3 U_y I_{\text{eff}} \quad (56-8)$$

با جایگزین کردن U_y به وسیله U_{dio} از رابطه (۵-۱۰) با $S = 2$ و $q = 3$ و با قراردادن مقدار I_{eff} مطابق رابطه (۵۵-۸)، نتیجه می‌شود

$$S_s = S_p = \frac{\pi}{3} U_{\text{dio}} I_d = ۱۰۴۷ P_{\text{dio}} \quad (57-8)$$

در این رابطه نیز P_{dio} قدرت ایدئال دائم است. ابعاد ترانسفورماتور باید برای قدرت نوعی که از رابطه زیر به دست می‌آید تعیین شود

$$S_t = \frac{S_s + S_p}{2} = \frac{\pi}{3} P_{\text{dio}} = ۱۰۴۷ P_{\text{dio}} \quad (58-8)$$

در حالت مبدل جریان با اتصال پل سه‌فاز، ابعاد ترانسفورماتور باید برای قدرتی که کمی بیشتر از قدرت ایدئال دائم است تعیین شوند. پس شرایط، از این لحاظ که جریان ثانویه فاقد هرگونه مؤلفه دائم است مناسبتر است.



فصل نهم

عکس العمل مبدل‌های جریان بر روی شبکه تغذیه

۹-۱ مقدمه

جریان‌های غیر سینوسی که از سه فاز تغذیه کننده مبدل جریان می‌گذرند موجب عکس-العملی بر روی شبکه تغذیه می‌شوند. در بند ۹-۲، ابتدا روند تغییرات جریان شبکه مطالعه می‌شود. برای این منظور و جهت تعیین هارمونیک‌های آن از بسط به سری فوریه^۱ استفاده خواهد شد. در این زمینه فقط به بررسی مبدل جریان با اتصال ستاره سه‌فاز و اتصال پل سه‌فاز اکتفا خواهد شد. به روشی مشابه می‌توان روند تغییرات جریان‌های شبکه را برای اتصال‌های دیگر مبدل‌های جریان تعیین کرد.

جریان‌های مستطیلی همچنین، باعث تغییر روند فشار الکتریکی تغذیه می‌شوند. مسائل مربوط به این پدیده در بند ۹-۳ بررسی خواهند شد.

در بند ۹-۴ خواهیم دید که مبدل جریان علاوه بر قدرت اکتیو مقداری نیز قدرت رثا کتیو که با نقطه کارکرد بستگی نزدیک دارد مصرف می‌کند. این قدرت رثا کتیو می‌تواند به سبب ایجاد افت فشارهای الکتریکی اضافی، بر شبکه تغذیه آثار نامناسبی بگذارد. بالاخره، در بند ۹-۵، فرمان مرحله‌ای دو مبدل جریان متوالی، تشریح خواهد شد که کاهش مصرف قدرت رثا کتیو را امکان‌پذیر می‌سازد.

۲-۹ جریانهای شبکه

۲-۹-۱ مبدل جریان با اتصال ستاره سه فاز تغذیه شده به وسیله ترانسفورماتور مثلث-ستاره ای

روند تغییرات فشارهای الکتریکی و جریانهای مختلف برای مبدل جریان با اتصال ستاره سه فاز در شکل ۱-۹ نشان داده شده است. به کمک فشارهای الکتریکی ساده شبکه تغذیه (u_T و u_S ، u_R) فشارهای الکتریکی مرکب u_{p1} و u_{p2} و u_{p3} که به سیم پیچهای اولیه ترانسفورماتور مثلث-ستاره ای مربوط اند، به دست می آیند. چون فشارهای الکتریکی ثانویه (u_{s1} ، u_{s2} و u_{s3} با فشارهای الکتریکی سیم پیچهای اولیه همفازند) (به شکل ۵-۸ مراجعه شود)، می توانند جهت اندازه گیری زاویه تأخیر آتش α به کار روند.

جریانهای i_{p1} ، i_{p2} و i_{p3} در اولیه ترانسفورماتور بنا بر ملاحظات بیان شده در بند ۸-۳-۱ رسم می شوند. این جریانها برای يك جریان دایم كاملاً صاف در شکل ۷-۸ نشان داده شده اند.

بالاخره جریانهای شبکه (i_T ، i_S ، i_R) از روابط زیر به دست می آیند (به شکل ۵-۸ مراجعه شود)

$$i_R = i_{p1} - i_{p2} \quad (۱-۹)$$

$$i_S = i_{p2} - i_{p1} \quad (۲-۹)$$

$$i_T = i_{p3} - i_{p2} \quad (۳-۹)$$

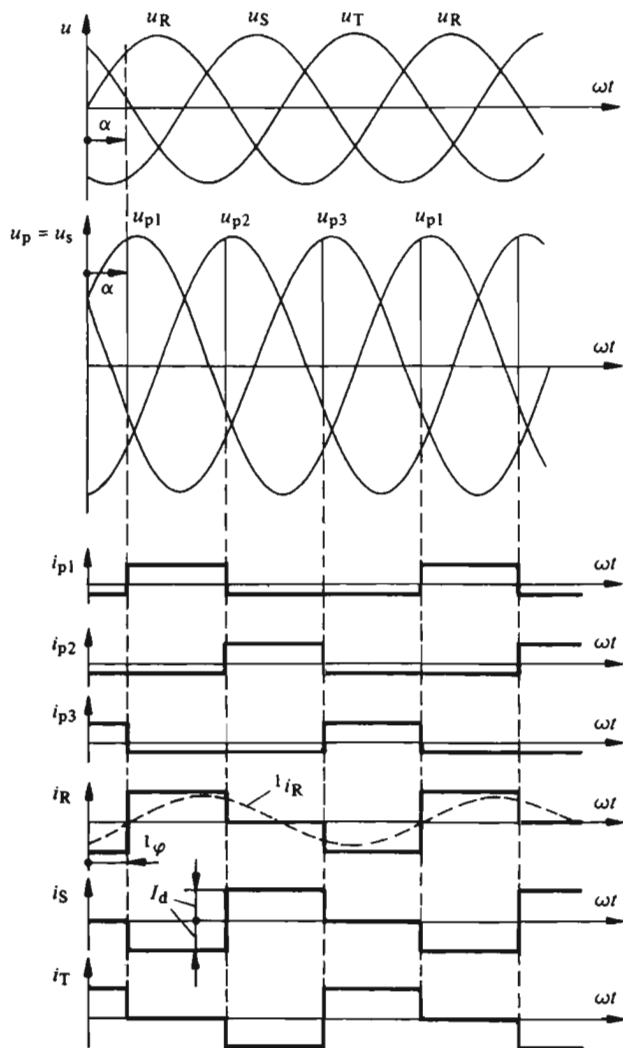
با فرض اینکه جریان دایم I_d كاملاً صاف و پدیده کموتاسیون صرف نظر کردنی است، روند تغییرات جریانهای فوق، مطابق شکل ۱-۹، مستطیلی خواهد بود. مقدار مؤثر جریانهای شبکه چنین به دست می آید

$$I_{eff} = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \left[I_d^2 \frac{2\pi}{3} + (-I_d)^2 \frac{2\pi}{3} \right]} = \sqrt{\frac{2}{3}} I_d \quad (۴-۹)$$

روند تغییرات جریانهای شبکه برای ترانسفورماتور مثلث-ستاره ای همانند روند تغییرات جریانهای اولیه در ترانسفورماتور ستاره-زیگزاگ است (به شکل ۸-۱۰ مراجعه شود). بنابراین نتایجی که در زیر به دست می آید برای این نوع اتصال ترانسفورماتور نیز معتبر است.

۲-۲-۹ بسط به سری فوریه در اتصال ستاره سه فاز

به کمک بسط به سری فوریه، جریان شبکه را می توان به يك موج اصلی و تعدادی هارمونیک

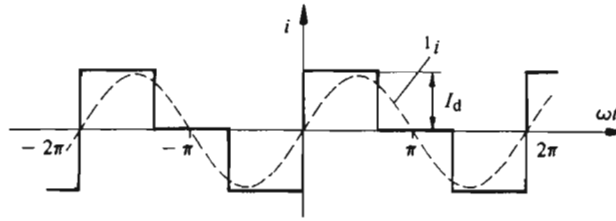


شکل ۹-۱ روند تغییرات فشارهای الکتریکی و جریان‌های شبکه در مبدل جریانی با اتصال ستاره سه‌فاز که با ترانسفورماتور مثلث-ستاره‌ای تغذیه می‌شود.

تجزیه کرد. برای این منظور مناسب‌تر است مبدأ محور زمان مطابق شکل ۹-۲ انتخاب شود. به دلیل وجود تقارن، سری فوریه فقط شامل جمله‌های سینوس است

$$i = \sum_{v=1}^{\infty} \hat{I} \sin v \omega t$$

(۹-۵)



شکل ۹-۲ روند تغییرات جریان شبکه برای بسط به سری فوریه.

دامنه‌های I^ν از رابطه زیر به دست می‌آیند

$$\begin{aligned}
 I^\nu &= \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} i \sin \nu \omega t \, d\omega t = \\
 &= \frac{1}{\pi} \left[\int_{-\pi/3}^{\pi/3} (-I_d) \sin \nu \omega t \, d\omega t + \int_{\pi/3}^{\pi} I_d \sin \nu \omega t \, d\omega t \right] = \\
 &= \frac{2}{\pi} \int_0^{\pi/3} I_d \sin \nu \omega t \, d\omega t = \frac{2}{\pi \nu} I_d \left(1 - \cos \nu \frac{\pi}{3} \right) \quad (9-6)
 \end{aligned}$$

و از این رابطه داریم

$$I^\nu = \frac{2}{\pi \nu} I_d \quad (\nu = 1, 2, 4, 5, 7, 8, 10, \dots \text{ برای }) \quad (9-7)$$

$$I^\nu = 0 \quad (\nu = 3, 6, 9, \dots \text{ برای }) \quad (9-8)$$

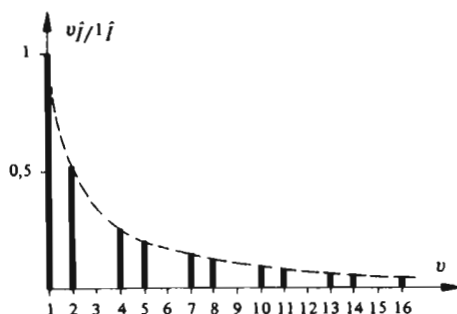
بنابراین دامنه موج اصلی جریان شبکه عبارت است از

$$I = \frac{2}{\pi} I_d = 0.955 I_d \quad (9-9)$$

که اندکی از مقدار جریان داریم I_d کوچکتر است.
 اختلاف فاز φ موج اصلی جریان شبکه نسبت به فشار الکتریکی ساده مربوط به آن،
 برابر زاویه تأخیر آتش α است

$$\varphi = \alpha \quad (9-10)$$

این رابطه را می‌توان از شکل ۹-۱ نتیجه گرفت. دامنه هارمونیک‌ها با مرتبه v نسبت عکس دارد. هارمونیک‌هایی که فرکانسشان مضربی از فرکانس شبکه تغذیه است ($v = 3, 6, 9, \dots$) حذف می‌شوند. در شکل ۹-۳، طیف هارمونیک‌ها نسبت به دامنه موج اصلی نشان داده شده است. لازم است به وجود هارمونیک‌های با مرتبه زوج توجه بشود.



شکل ۹-۳ طیف هارمونیک‌های جریان شبکه در اتصال ستاره سه‌فاز.

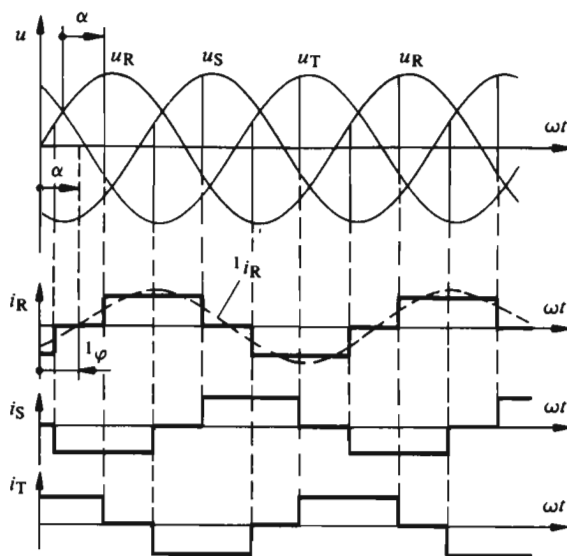
۹-۲-۳ مبدل جریان با اتصال پل سه‌فاز

در مبدل جریان با اتصال پل سه‌فاز، جریان‌های شبکه متناظر با جریان‌های ورودی پل هستند. همین شرایط با قراردادن ترانسفورماتور ستاره-ستاره‌ای نیز به دست می‌آید. روند تغییرات این جریان‌ها در بند ۵-۶-۳ به دست آمده است (به شکل ۵-۱۶ مراجعه شود). با در نظر گرفتن اینکه فشارهای الکتریکی ساده شبکه (u_T و u_S , u_R) همان فشارهای الکتریکی ساده در ورودی پل هستند، این جریان‌ها در شکل ۹-۴ نشان داده شده‌اند. در اینجا نیز از اثر کموتاسیون صرف نظر شده است. جریان مؤثر همان مقدار حالت قبل را دارد

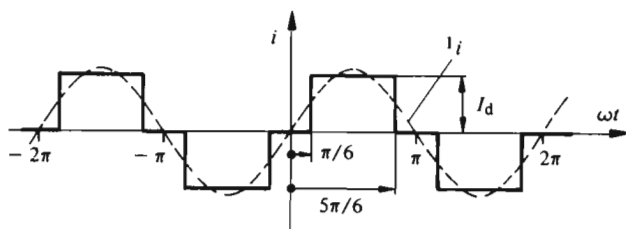
$$I_{eff} = \sqrt{\frac{2}{3}} I_d \quad (9-11)$$

۹-۲-۴ بسط به سری فوریه برای اتصال پل سه‌فاز

برای تجزیه جریان شبکه، مناسب‌تر است مبدأ زمان مطابق شکل ۹-۵ انتخاب شود. در این صورت، مطابق معادله (۹-۵)، سری فوریه فقط شامل جمله‌های سینوسی خواهد بود.



شکل ۹-۴ روند تغییرات فشارهای الکتریکی و جریانهای شبکه در مبدل جریان با اتصال پل سه فاز.



شکل ۹-۵ روند تغییرات جریان شبکه برای بسط به سری فوریه.

با در نظر گرفتن تقارن جریان، دامنه‌های i هارمونیکها به ترتیب زیر به دست می‌آیند

$$\begin{aligned} i &= \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} i \sin \nu \omega t \, d\omega t = \frac{2}{\pi} \int_{\pi/6}^{5\pi/6} I_d \sin \nu \omega t \, d\omega t = \\ &= \frac{2}{\pi \nu} I_d \sin \nu \frac{\pi}{6} \sin \nu \frac{\pi}{3} \end{aligned} \quad (9-12)$$

که از آن مقادیر خاص زیر نتیجه می‌شود

برای $\nu = 1, 5, 7, 11, 13, \dots$ داریم

$$\nu \hat{I} = \pm \frac{2\sqrt{3}}{\pi} I_d \quad (13-9)$$

و برای $\nu = 2, 3, 4, 6, 8, 9, \dots$ داریم

$$\nu \hat{I} = 0 \quad (14-9)$$

در رابطه (13-9) علامت مثبت برای $\nu = 1, 11, 13, \dots$ معتبر است و علامت منفی برای $\nu = 5, 7, 17, 19, \dots$

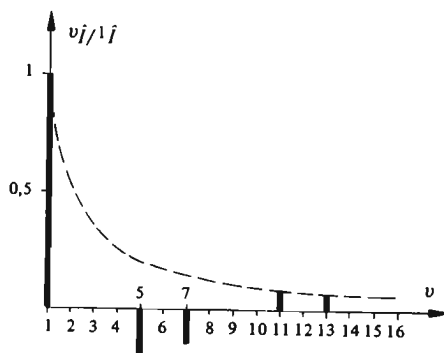
دامنه موج اصلی جریان شبکه عبارت است از

$$\nu \hat{I} = \frac{2\sqrt{3}}{\pi} I_d = 1.103 I_d \quad (15-9)$$

بنابراین، این مقدار حدود ۱۰ درصد از مقدار جریان دائم I_d بیشتر است. چنانکه از شکل ۹-۴ برمی‌آید، اختلاف فاز φ بین موج اصلی جریان شبکه و فشار الکتریکی ساده مربوط به آن، برابر زاویه تأخیر آتش α است

$$\varphi = \alpha \quad (16-9)$$

دامنه هارمونیکها با $1/\nu$ متناسب است. فقط هارمونیکهای از مرتبه ۵، ۷، ۱۱، ۱۳، ... موجودند و بقیه، یعنی هارمونیکهای از مرتبه زوج و مضرب ۳ حذف می‌شوند.



شکل ۹-۶ طیف هارمونیکهای جریان شبکه در اتصال پل سه‌فازه.



شکل ۹-۶ طیف هارمونیکها را به نسبت دامنه موج اصلی نشان می‌دهد. با توجه به علامت، هارمونیکهای مرتبه ۵ و ۷ به طرف پایین نشان داده شده‌اند. در مقایسه با مبدل جریان با اتصال ستاره سه فاز، ملاحظه می‌شود که مبدل جریان با اتصال پل سه فاز هارمونیکهای کمتری ایجاد می‌کند و مناسبتر است (شاخص ضربان $p=6$).

۹-۳-۵ اثر تداخل

تنها نتیجه حاصل از پدیده تداخل این است که جریانهای شبکه مستطیلی نمی‌مانند بلکه نزدیک به دوزنقه‌ای می‌شوند. اثر این موضوع بر دامنه موج اصلی و هارمونیکهای از مرتبه پایین معمولاً ناچیز است و می‌توان از آن صرف نظر کرد. مهمترین اثر، بر φ که اختلاف فاز بین موج اصلی جریان و فشار الکتریکی ساده مربوط به آن است ظاهر می‌شود. به علت تداخل، $\varphi > \alpha$ است. این مسئله در بند ۹-۴-۵، به هنگام بررسی قدرت رثاکتیو جذب شده توسط مبدل جریان، برای بار دوم در نظر گرفته خواهد شد.

۹-۳ اثر بر فشار الکتریکی تغذیه

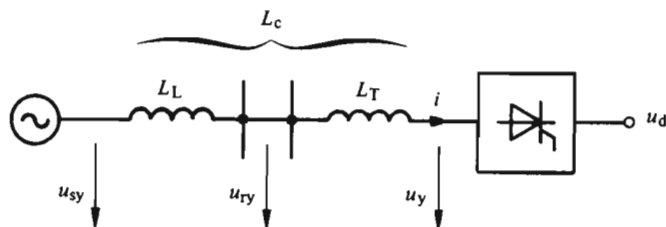
۹-۳-۱ کلیات

جریانهای شبکه که تقریباً مستطیلی هستند، اثری نامناسب بر شبکه وسایل تأسیسات الکتریکی می‌گذارند. هارمونیکهای جریان، در القاگری خط تغذیه، یک افت فشار الکتریکی اضافی ایجاد می‌کنند و باعث به وجود آمدن اعوجاجی در فشار الکتریکی سینوسی می‌شوند. همچنین ممکن است در بعضی از نقاط شبکه، تشدید می‌شود و به فرکانسهای هارمونیکها وجود داشته باشد.

این هارمونیکها حتی می‌توانند فشارهای الکتریکی اضافی پارازیتی در خطوط نزدیک به خطوط تغذیه القا کنند. به ویژه خطوط تلفنی یا خطوط علایم در مقابل این فشارهای الکتریکی مغشوش کننده، حساس‌اند. حتی ممکن است در وسایل تنظیم و فرمان، که همراه با مبدل جریان به فشار الکتریکی مغشوش متصل‌اند و از طریق آن تغذیه می‌شوند، اثری نامطلوب به وجود آید.

۹-۳-۲ اعوجاج در فشار الکتریکی

برای مطالعه اعوجاج در فشار الکتریکی تغذیه از شکل ۹-۷ استفاده می‌کنیم که طرح-واره معادل ساده شده شبکه سه فاز تغذیه کننده مبدل جریان را نشان می‌دهد. همه کمیات بر مبنای فشار الکتریکی ساده u_y در سرهای سه فاز مبدل جریان تبدیل شده‌اند.



شکل ۹-۲ طرح واره معادل برای مطالعه اعوجاج در فشار الکتریکی تغذیه.

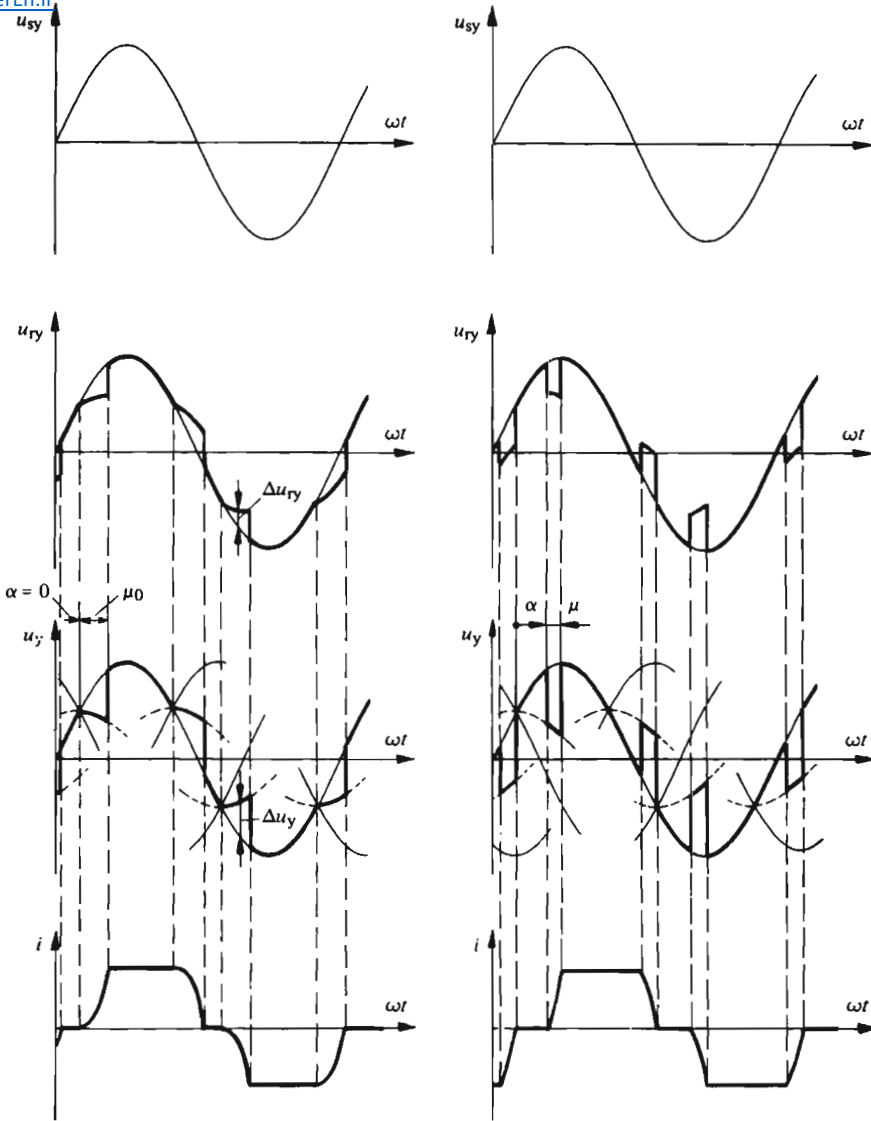
u_{sy} فشار الکتریکی ساده یک پست فرعی^۱ است که قدرت اتصال کوتاهش در مقابل قدرت اتصال کوتاه مبدل جریان بسیار زیاد است. بنابراین می‌توان فرض کرد که این فشار الکتریکی سینوسی است و مبدل جریان هیچ گونه اثری بر آن ندارد (به شکل ۹-۸ مراجعه شود). u_{ry} فشار الکتریکی شبکه‌ای است که مبدل جریان به آن وصل می‌شود. معمولاً در این نقطه مصرف‌کننده‌های دیگری نیز از قبیل موتورها، لامپها و غیره متشعب می‌شوند. بین پست فرعی و این نقطه، القاگری ظاهری L_L ۲ دارد (از مقاومت اهمی خط صرف نظر شده است). L_T القاگری اتصال کوتاه ترانسفورماتور است. مجموع $L_L + L_T$ القاگری کموتاسیون L_c مبدل جریان را تشکیل می‌دهد. در خط تغذیه و ترانسفورماتور، جریان شبکه مبدل جریان (i) جاری می‌شود.

روند تغییرات فشارهای الکتریکی u_{ry} و u_y و جریان شبکه i در مبدل جریان با اتصال پل سه فاز (به ازای دو مقدار از زاویه تأخیر آتش $\alpha = 0$ و $\alpha > 0$) در شکل ۹-۸ نشان داده شده است.

ساخت روند تغییرات فشار الکتریکی u_y ، در سری‌های متناوب مبدل، همانند ساخت روند تغییرات فشار الکتریکی دایم u_d است. در طول تداخل، u_y برابر نصف مجموع دو فشار الکتریکی ساده مربوط به فازهای در حال کموتاسیون است. این موضوع بسته به di/dt جریان شبکه، افزایش یا کاهش در فشار الکتریکی u_y پدید می‌آورد. اختلاف بین فشار الکتریکی u_y و روند تغییرات سینوسی مربوط به u_{sy} با Δu_y مشخص می‌شود. با توجه به اینکه L_L و L_T تقسیم‌کننده القایی فشار الکتریکی تشکیل می‌دهند، برای اختلاف Δu_{ry} بین فشار الکتریکی u_{ry} و فشار الکتریکی سینوسی u_{sy} داریم

$$\Delta u_{ry} = \frac{L_L}{L_L + L_T} \Delta u_y \quad (۹-۱۷)$$

بنابراین فشار الکتریکی u_{ry} شبکه تغییر شکل می‌یابد و تپهایی با تغییرات سریع



شکل ۹-۸ اعوجاج در فشارهای الکتریکی u_y و u_{ry} برای مبدل جریان با اتصال پل سه فاز.

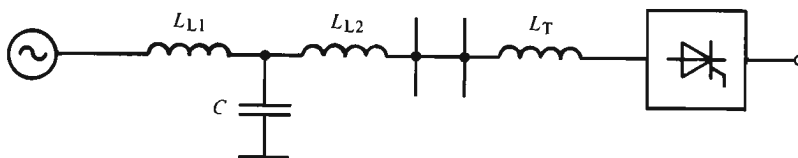
بر آن اضافه می‌شوند. هرچه L_T نسبت به L_L کوچکتر باشد این تغییر شکل بیشتر خواهد بود. اگر مبدل جریان (با اتصال پل سه فاز) مستقیماً و بدون ترانسفورماتور به شبکه وصل شده باشد، روند تغییرات u_{ry} شبیه روند تغییرات u_y خواهد بود. در این حالت، اغلب

پیچک‌های کموتاسیون را که جای L_T را می‌گیرند، بین شبکه تغذیه و مبدل جریان قرار می‌دهند تا اعوجاج فشار الکتریکی u_{ry} کاهش یابد.

تغییرات سریع فشار الکتریکی متناوب u_{ry} از طریق اتصالات خازنی، باعث به وجود آمدن اغتشاش در وسایل تنظیم و فرمان یا دیگر دستگاه‌های با جریان ضعیف می‌شوند.

۳-۳-۹ فیلترهای صاف‌کننده

چنانچه شبکه تغذیه شامل خازن‌هایی مانند خازن جبران‌کننده فاز باشد (به شکل ۹-۹-۹ مراجعه شود)، هارمونیک‌های موجود در فشار الکتریکی u_{ry} شبکه می‌توانند باعث به وجود آمدن تشدید در شبکه تغذیه شوند. برای جلوگیری از این پدیده، گاهی لازم است فیلترهایی در شبکه تغذیه قرار داد.



شکل ۹-۹ امکان به وجود آمدن تشدید در اثر خازن C .

برای مبدل‌های جریان شش فاز، پیش‌بینی سه فیلتر L و C متوالی، کافی است. فرکانس تشدید برای فیلتر اول ۵ برابر فرکانس شبکه و برای فیلتر دوم ۷ برابر فرکانس شبکه است. فیلتر سوم فرکانس تشدید ۱۲ برابر فرکانس شبکه دارد تا بتواند به طور همزمان هارمونیک‌های مرتبه ۱۱ و ۱۳ را تضعیف کند.

در موقع محاسبه این فیلترها باید اثر آنها را بر فرکانس‌های دیگر (موج اصلی، فرکانس‌های متوسط برای فرمان از دور) در نظر گرفت. در ضمن مستهلك شدن پدیده‌های گذرا نیز نباید فراموش شود.

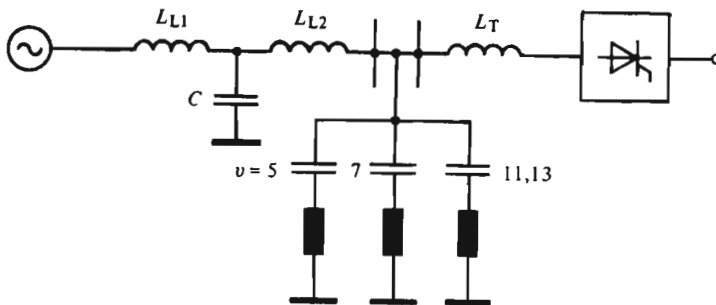
ترکیب فیلترهای صاف‌کننده در شکل ۹-۱۰ نشان داده شده است. این فیلترهای L و C متوالی، هارمونیک‌های جریان تولیدشده به وسیله مبدل جریان را جذب می‌کنند (به طیف شکل ۹-۶ مراجعه شود).

معمولاً به سبب به هم پیوستگی شبکه‌های تغذیه، استفاده از این فیلترها فقط در حالت‌های خاص الزامی است.

۴-۹ قدرت اکتیو و راکتیو

۱-۴-۹ روابط بنیادی

برای تعیین قدرت اکتیو و راکتیو مصرف شده توسط مبدل جریان، باید در نظر داشت



شکل ۹-۱۰ فیلترهای صاف کننده برای هارمونیکهای مرتبه‌های ۵، ۷ و ۱۱، ۱۳.

که جریانها سینوسی نیستند، در عوض با صرف نظر کردن از اعوجاج، فشار الکتریکی، سینوسی فرض می‌شود. این موضوع مانند این است که قدرت اتصال کوتاه شبکه تغذیه بینهایت بزرگ باشد. در این حالت، در تعیین قدرت اکتیو فقط موج اصلی جریان مؤثر است.

در سیستم سه فاز، با در نظر گرفتن موج اصلی جریان، قدرتها از رابطه‌های زیر به دست می‌آیند

$$P = 3 U_{ry} I \cos \varphi \quad (9-18)$$

$$Q = 3 U_{ry} I \sin \varphi \quad (9-19)$$

در این رابطه‌ها U_{ry} فشار الکتریکی ساده شبکه، $I = I/\sqrt{2}$ مقدار مؤثر موج اصلی جریان شبکه و φ اختلاف فاز موج اصلی جریان نسبت به فشار الکتریکی U_{ry} شبکه است. چون فشار الکتریکی سینوسی فرض شده است، هارمونیکهای جریان هیچ گونه اثری بر قدرت اکتیو ندارند. در عوض این هارمونیکها، علاوه بر «قدرت رثا اکتیو» Q' که از روی موج اصلی تعیین شده است، باعث به وجود آمدن «قدرت رثا اکتیو اعوجاج» نیز می‌شوند.

در مدل جریان با اتصال ستاره سه فاز و با ترانسفورماتور مثلث-ستاره‌ای، فشار الکتریکی ساده شبکه عبارت است از $U_{ry} = U_y/\sqrt{3}$ ، که U_y فشار الکتریکی ساده در ورودی مدل جریان است. به کمک معادله‌های (۵-۱۰) و (۹-۹) نتیجه می‌شود

$$3 U_{ry} I = 3 \frac{U_y}{\sqrt{3}} \frac{I}{\sqrt{2}} = \sqrt{3/2} \frac{2\pi}{3\sqrt{6}} U_{dio} \frac{3}{\pi} I_d = U_{dio} I_d \quad (9-20)$$

در حالت مبدل جریان با اتصال پل سه فازه، U_{ry} برابر U_y است و از معادله‌های (۱۵-۹) و (۱۵-۹) به دست می‌آید

$$3U_{ry}I = 3U_y \frac{I}{\sqrt{2}} = \frac{3}{\sqrt{2}} \frac{\pi}{2\sqrt{6}} U_{dio} \frac{2\sqrt{3}}{\pi} I_d = U_{dio} I_d \quad (21-9)$$

از رابطه‌های فوق ملاحظه می‌شود که، صرف نظر از چگونگی اتصال مبدل جریان، حاصل ضرب $3U_{ry}I$ برابر $U_{dio} I_d$ ، یعنی قدرت ایدئال دایم است. حتی در مبدل‌های جریان تک فازه نیز می‌توان ثابت کرد که رابطه $U_r I = U_{dio} I_d$ برقرار است. در مطالب فوق، از تلفات در مبدل جریان و در ترانسفورماتور صرف نظر شده است. تلفات اخیر معمولاً خیلی کوچک‌اند.

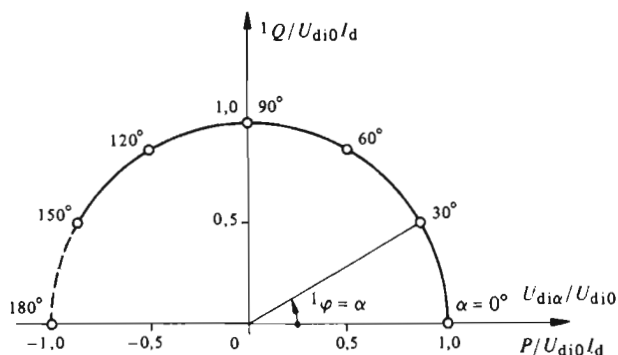
۲-۴-۹ اثر زاویه تأخیر آتش

از شکل‌های ۱-۹ و ۴-۹ یا معادله‌های (۱۵-۹) و (۱۶-۹) می‌توان نتیجه گرفت که اختلاف فاز موج اصلی جریان (φ) برابر زاویه تأخیر آتش α است. بنابراین، ابتدا با صرف نظر کردن از پدیده تداخل، رفتار ایدئال در نظر گرفته می‌شود. برای قدرتهای اکتیو و رثاکتیو می‌توان نوشت

$$P = U_{dio} I_d \cos \alpha \quad (22-9)$$

$$Q = U_{dio} I_d \sin \alpha \quad (23-9)$$

با توجه به $U_{dio} = U_{dio} \cos \alpha$ ، نتیجه می‌شود که قدرت اکتیو P با فشار الکتریکی ایدئال دایم متناسب است. رابطه بین قدرت رثاکتیو Q و قدرت اکتیو P را می‌توان به وسیله یک نمودار دایره‌ای نشان داد (به شکل ۱۱-۹ مراجعه شود).



شکل ۱۱-۹ قدرت اکتیو و رثاکتیو در مبدل جریان با رفتار ایدئال.



قدرت اکتیو P با فشار الکتریکی ایدئال داریم $U_{di\alpha}$ متناسب است. قدرت رثا اکتیو Q برای $\alpha = 0^\circ$ ($U_{di\alpha} = U_{dio}$) صفر است و با افزایش زاویه تأخیر آتش، به سرعت افزایش می‌یابد تا در $\alpha = 90^\circ$ ($U_{di\alpha} = 0$) به ماکزیممی برابر $Q = U_{dio} I_d$ برسد. برای $\alpha > 90^\circ$ ، قدرت رثا اکتیو دو باره کاهش می‌یابد و در حالت ایدئال به ازای $\alpha = 180^\circ$ ($U_{di\alpha} = U_{dio}$) به صفر می‌رسد. قدرت رثا اکتیو Q زیاد، در قدرتهای اکتیو کم ($\alpha \approx 90^\circ$) به‌طور نامطلوبی بر شبکه تغذیه تأثیر می‌گذارد. چون قدرت رثا اکتیو به‌زاویه تأخیر آتش α ، یعنی کمیت فرمان بستگی دارد، Q را «قدرت رثا اکتیو مربوط به فرمان» نیز می‌نامند.

۳-۴-۹ ضریب قدرت

قدرت ظاهری از رابطه زیر به‌دست می‌آید

$$S = 3 U_{ry} I_{eff} \quad (24-9)$$

که در آن I_{eff} مقدار مؤثر جریان شبکه است. «ضریب قدرت» با رابطه زیر تعریف می‌شود

$$\lambda = \frac{P}{S} = \frac{I}{I_{eff}} \cos \varphi = g \cos \varphi \quad (25-9)$$

که در آن

$$g = \frac{I}{I_{eff}} \quad (26-9)$$

برای مبدل جریان با اتصال ستاره نتیجه می‌شود که

$$g = \frac{\sqrt{3}}{2\pi} = 0.2827 \quad (27-9)$$

و برای اتصال پل سه‌فازه

$$g = \frac{3}{\pi} = 0.955 \quad (28-9)$$

ضریب قدرت در مبدل جریان برابر $\cos \varphi$ نیست بلکه، به دلیل وجود هارمونیکها، از آن کوچکتر است. از این رو مقدار مؤثر جریان شبکه I_{eff} بزرگتر از مقدار مؤثر موج اصلی و در نتیجه $g < 1$ است.

۴-۴-۹ اثر کموتاسیون

تا اینجا از اثر کموتاسیون صرف نظر کرده ایم. در هنگام تداخل، ثانویه ترانسفورماتور اتصال کوتاه می شود و شبکه باید یک مقدار قدرت رثا کتیو اضافی تأمین کند. قدرتهای اکتیو و رثا کتیو را ممکن بود با تعیین موج اصلی، از روی روند تغییرات واقعی جریان شبکه، تعیین کرد و دامنه و اختلاف فاز آن را به دست آورد. این محاسبه نسبتاً پیچیده است. ملاحظه می شود که دامنه موج اصلی بسیار کم تغییر می کند و می تواند برابر مقدار آن در حالت ایدئال فرض شود. اختلاف فاز موج اصلی را می توان به ترتیب زیر که تقریب خوبی دارد به دست آورد.

با در نظر گرفتن پدیده تداخل، فشار الکتریکی داریم با توجه به معادله (۳۴-۶)

عبارت است از

$$U_{d\alpha} = U_{dio} (\cos \alpha - d_x) \quad (29-9)$$

از این رابطه برای قدرت اکتیو نتیجه می شود

$$P = U_{d\alpha} I_d = U_{dio} I_d (\cos \alpha - d_x) \quad (30-9)$$

مقایسه این رابطه با رابطه (۲۲-۹) نشان می دهد که به جای $\cos \alpha$ ، باید $\cos \alpha - d_x$ قرار داده شود. بنابراین اختلاف فاز مربوط به قدرت اکتیو از رابطه زیر به دست می آید

$$\cos \varphi = \cos \alpha - d_x \quad (31-9)$$

بدین ترتیب برای قدرت رثا کتیو موج اصلی نتیجه می شود

$$Q = U_{dio} I_d \sin \varphi \quad (32-9)$$

و با توجه به $\sin^2(\varphi) = 1 - \cos^2(\varphi)$ می توان نوشت

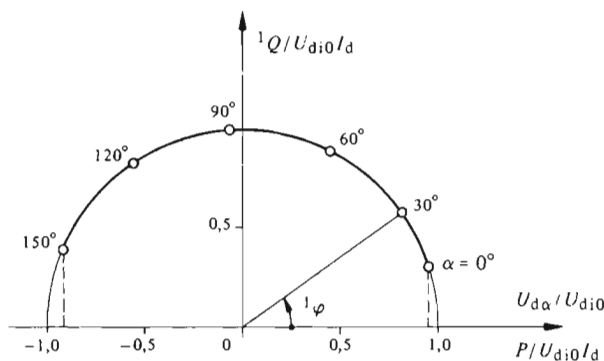
$$Q = U_{dio} I_d \sqrt{1 - (\cos \alpha - d_x)^2} \quad (33-9)$$

برای $\alpha = 0^\circ$ ، پس از ساده کردن خواهیم داشت

$$Q_o = U_{di0} I_d \sqrt{d_x(2 - d_x)} \quad (34-9)$$

ملاحظه می شود که حتی برای زاویه تأخیر آتش $\alpha = 0^\circ$ مبدل جریان قدرت رثا کتیوی مصرف می کند که به افت فشار الکتریکی القایی نسبی (d_x) بستگی دارد. بنا بر معادله (۶-۲۸) این افت، با جریان دایم I_d متناسب است. این قدرت رثا کتیو، «قدرت رثا کتیو کموتاسیون» نامیده می شود.

مطابق شکل های ۹-۱۲ و ۹-۱۳ نمودار دایره ای قدرت رثا کتیو به قسمتی از یک نیم دایره مربوط می شود. برای هر زاویه تأخیر آتش α معین، هرچه افت فشار الکتریکی القایی نسبی بزرگتر باشد، قدرت رثا کتیو Q در کار به صورت یکسو کننده بزرگتر و در کار به صورت اندولر کوچکتر می شود. شکل ۹-۱۲ برای $d_x = 0.05$ رسم شده است و شکل ۹-۱۳ برای $d_x = 0.1$.



شکل ۹-۱۲ قدرتهای اکتیو و رثا کتیو در مبدل جریان با در نظر گرفتن کموتاسیون و $d_x = 0.05$.

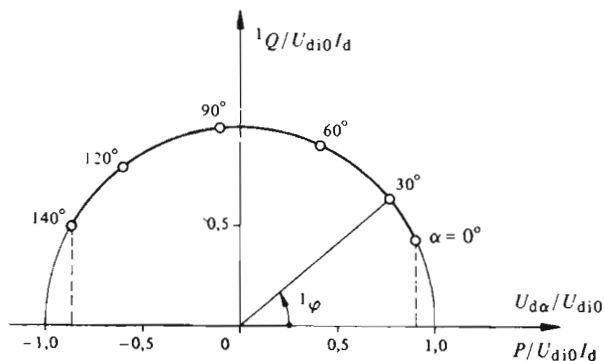
۹-۴-۵ اختلاف فاز موج اصلی

اگر در رابطه (۹-۳۱)، d_x با رابطه (۶-۲۹) جایگزین شود، نتیجه می شود

$$\cos \varphi = \frac{\cos \alpha + \cos(\alpha + \mu)}{2} \quad (35-9)$$

به کمک یک تبدیل مثلثاتی، معادله فوق را می توان به صورت زیر نوشت

$$\cos \varphi = \cos \left(\alpha + \frac{\mu}{2} \right) \cos \frac{\mu}{2} \quad (9-36)$$



شکل ۹-۱۳ قدرتهای اکتیو و رثا کتیو در مبدل جریان با در نظر گرفتن کموتاسیون و $d_x = 0$.

که رابطه‌ای است بین اختلاف فاز φ موج اصلی جریان شبکه، زاویه تأخیر آتش α و زاویه تداخل μ . برای مقادیر کوچک μ ، $\cos \mu/2$ را می‌توان برابر واحد فرض کرد و نوشت

$$\varphi \cong \alpha + \frac{\mu}{2} \quad (9-37)$$

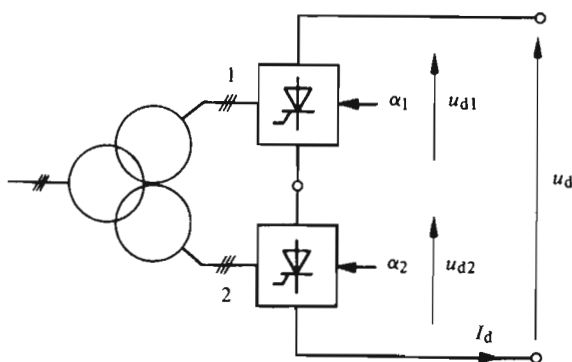
بدین ترتیب ملاحظه می‌شود که موج اصلی تقریباً به اندازه نصف زاویه تداخل μ بیشتر از زاویه تأخیر آتش α ، اختلاف فاز پیدا می‌کند.

۹-۵ فرمان مرحله‌ای

۹-۵-۱ اتصال

مطابق شکل ۹-۱۴، برای کاهش مصرف خیلی زیاد قدرت رثا کتیو می‌توان دو یا چند مبدل جریان را متوالی به هم وصل کرد. هر یک از مبدل‌ها باید از طریق سیم پیچ ثانویه جداگانه‌ای به ترانسفورماتور متصل گردد تا از اتصال کوتاه بین آنها جلوگیری شود.

مبدل‌های جریان، مستقل از یکدیگر فرمان داده می‌شوند. به عنوان مبدل جریان می‌توان از هر نوع اتصال استفاده کرد. مع‌هذا اغلب از اتصال‌های پل سه فاز یا تک فاز استفاده می‌شود.



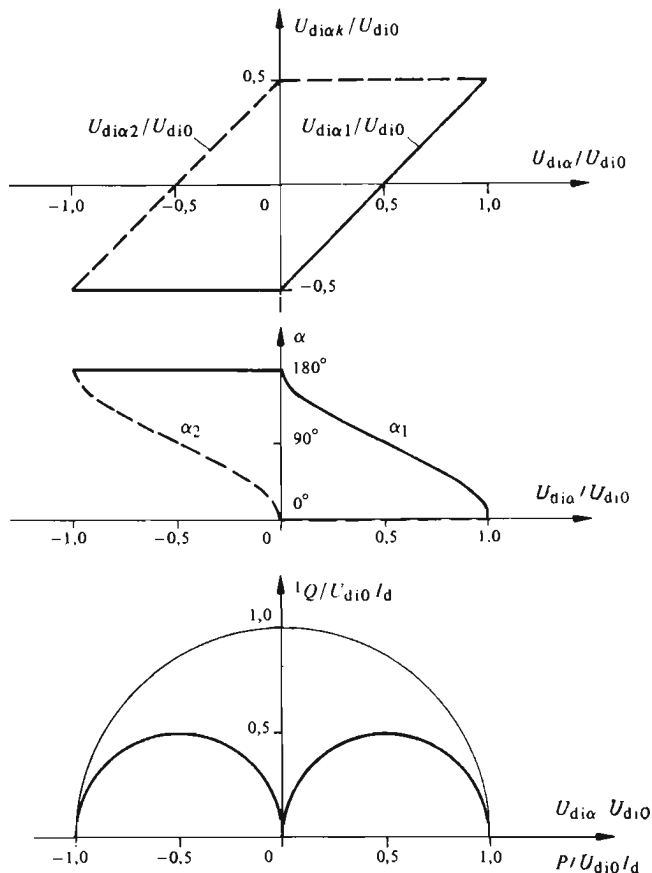
شکل ۹-۱۴ اتصال متوالی دو مبدل جریان برای فرمان مرحله‌ای.

۹-۵-۲ کارکرد ایدئال

ابتدا، کارکرد ایدئال «فرمان مرحله‌ای» را با صرف نظر کردن از پدیده تداخل مطالعه خواهیم کرد. برای این منظور به اتصال متوالی دو مبدل جریان اکتفا می‌شود. هر مبدل، مطابق شکل ۹-۱۵، به‌طور مرحله‌ای فرمان داده می‌شود. برای کاهش فشار الکتریکی دایم کل مدار، ابتدا با ثابت نگهداشتن زاویه تأخیر آتش $\alpha_p = 0^\circ$ ، زاویه تأخیر آتش α_1 را از 0° تا 180° تغییر می‌دهند (از دامنه اطمینان کار به‌صورت اندولر صرف نظر می‌شود). فشار الکتریکی ایدئال دایم مبدل ۱ از $U_{dio}/2$ به $-U_{dio}/2$ تغییر می‌کند که U_{dio} ماگزیم فشار الکتریکی دایم اتصال متوالی دو مبدل جریان است. بدین ترتیب فشار الکتریکی دایم ایدئال کل $U_{dia} = U_{dia1} + U_{dia2}$ صفر می‌شود. قدرت رثا کتیو Q روی یک نیم دایره تغییر می‌کند و مقدار ماگزیممش برابر نصف $U_{dio} I_d$ است.

سپس با α_1 ثابت و برابر 180° زاویه تأخیر آتش α_2 از 0° تا 180° افزایش می‌یابد. در نتیجه فشار الکتریکی ایدئال دایم U_{dia} منفی می‌شود. مبدل جریان ۱ برای $-U_{dio} \geq U_{dia} \geq U_{dio}/2$ و مبدل جریان ۲ برای $-U_{dio} \geq U_{dia} \geq -U_{dio}/2$ به‌صورت اندولر کار می‌کنند. به کمک فرمان مرحله‌ای دو مبدل جریان، ماگزیم قدرت رثا کتیو نصف قدرت ایدئال دایم $U_{dio} I_d$ می‌شود. با سه مبدل جریان متوالی، قدرت رثا کتیو یک‌سوم می‌شود و به همین ترتیب الی آخر.

اتصال‌های پل مختلط که در بند ۵-۸ تشریح شدند، اصولاً با فرمان مرحله‌ای کار می‌کنند با این خصوصیت که در یک نیمه پل همواره $\alpha_p = 0^\circ$ نگه داشته می‌شود. بنابراین، این اتصال‌ها نیز کاهش قدرت رثا کتیو مصرف شده را ممکن می‌سازند.



شکل ۹-۱۵ مشخصه‌های فرمان مرحله‌ای دو مبدل جریان، رفتار ایدئال.

۹-۵-۳ اثر کموتاسیون

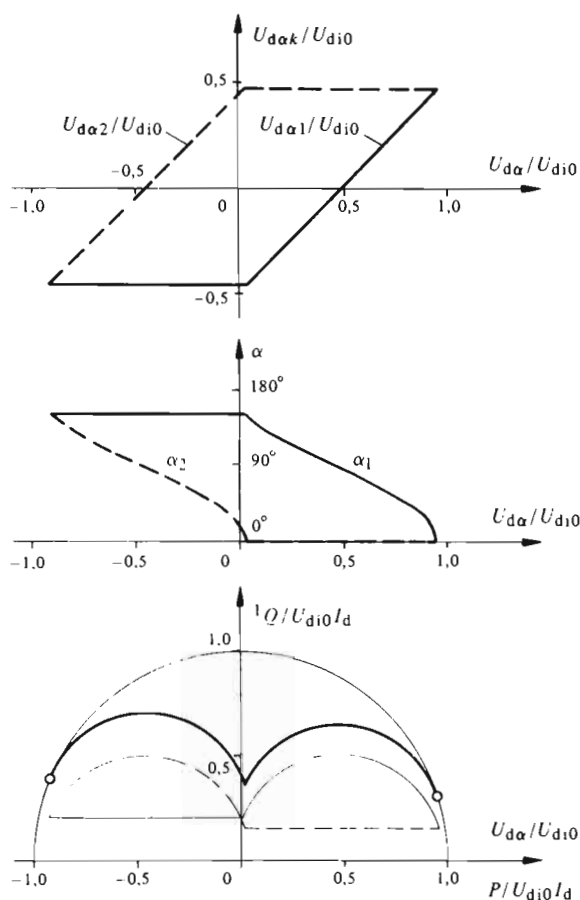
کموتاسیون، بر مشخصه‌های مبدل جریان با فرمان مرحله‌ای نیز اثر دارد. این اثر در مصرف قدرت رثاکتیو اهمیت ویژه‌ای پیدا می‌کند.

شکل ۹-۱۶ روابط مربوط به حالت اتصال متوالی دو مبدل جریان (به شکل ۹-۱۴ مراجعه شود) را نشان می‌دهد. این منحنیها برای افت فشار الکتریکی القایی نسبی $d_x = 0.05$ معتبرند.

ملاحظه می‌شود که دامنه تغییرات فشار الکتریکی دایم $U_{d\alpha}$ نسبت به حالت ایدئال (شکل ۹-۱۵) محدودتر است. زیرا باید در نظر داشت که در واقع تغییرات زاویه تأخیر آتش α ، این فشار الکتریکی را در حالت کار به صورت اندولر محدود می‌کند. علاوه بر این،



پدیده تداخل باعث افزایش قدرت رثا کتیو Q می‌شود. از این رو اتصال متوالی سه مبدل جریان یا بیشتر، جالب نیست، چون اثر قدرت رثا کتیو کموتاسیون بیشتر است و متوالی شدن چندین مبدل جریان نسبت به حالت دو مبدل هیچ گونه صرفه جویی به دنبال ندارد.



شکل ۹-۱۶ مشخصه‌های فرمان مرحله‌ای دو مبدل جریان با در نظر گرفتن کموتاسیون و با $\mu_x = 0.05$.

فصل دهم

مبدل‌های جریان دو طرفه

۱-۱۰ مقدمه

۱-۱۰-۱ کلیات

ویژگی اساسی مبدل‌های جریانی که در فصل‌های ۵ تا ۹ بررسی شدند، این است که در آنها جریان خروجی (جریان دایم) نمی‌تواند تغییر علامت دهد و فقط علامت فشار الکتریکی خروجی (فشار الکتریکی دایم) می‌تواند عوض بشود. این فشار الکتریکی در حالت کار به صورت اندولر منفی می‌شود. بنابراین، این مبدل‌های جریان در دو ربع صفحه مختصات (I_s, U_s) (شکل ۹-۲) کار می‌کنند.

در کاربردهای گوناگون، به‌ویژه برای تغذیه قابل برگشت موتورهای جریان دایم لازم است جریان دایم نیز بتواند تغییر علامت بدهد و منفی شود. پس مبدل‌های جریانی باید بتوانند در هر چهار ربع صفحه مختصات کار کنند (شکل ۱۰-۲).

اتصالی که انجام این امر را ممکن می‌سازند مبدل‌های جریانی دو طرفه نامیده می‌شوند و اصولاً از دو مبدل جریان که به صورت موازی معکوس اتصال می‌یابند و فرمان مناسبی دریافت می‌کنند تشکیل می‌شوند. در بندهای زیر نحوه اتصالها و امکانات مختلف فرمان تشریح خواهند شد.

۱-۱۰-۲ فرض‌های بررسی کارکرد

فرض‌های زیر به عنوان مبنای مطالعه کارکرد مبدل‌های جریانی دو طرفه در نظر گرفته

خواهند شد:

– القاگری L بار با جریان دایم (به شکل ۵-۲ مراجعه شود) بینهایت است

$$L = \infty \quad (۱-۱۵)$$

– القاگری L_c در مدار کموتاسیون (به شکل ۲-۳ مراجعه شود) قابل اغماض است

$$L_c = 0 \quad (۲-۱۵)$$

این فرضها، مشابیه فرضهای بررسی کارکرد ایدئال مبدل‌های جریان هستند (به فصل پنجم مراجعه شود). پدیده تداخل و کارکرد واقعی در مبدل‌های جریان دو طرفه همانند حالت مبدل‌های جریان معمولی است.

۲-۱۵ اتصال‌های با جریان گردش

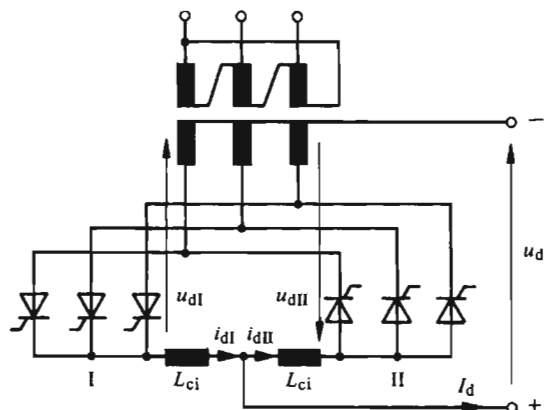
۱-۲-۱۵ کلیات

امکان‌های متنوع اتصال دو مبدل جریان، دستیابی به جریانی قابل برگشت را میسر می‌سازد. در این زمینه می‌توان اتصال موازی معکوس، اتصال متقاطع و اتصال H را از یکدیگر تمیز داد. ویژگی مشترک همگی این اتصال‌ها این است که جریان می‌تواند بدون گذشتن از بار، از یک مبدل جریان به مبدل جریان دیگر به گردش درآید. از این رو از «جریان گردش» صحبت می‌شود که چگونگی آن در بند ۱۵-۳ بررسی خواهد شد. چنانکه نشان داده خواهد شد، فشارهای الکتریکی متناوبی که کاملاً جبران نمی‌شوند، منشأ جریان گردش هستند. برای محدود کردن جریان گردش لازم است تا پیچک‌های القاگر بین دو مبدل جریان قرار بگیرند. این پیچک‌ها «پیچک‌های جریان گردش» نامیده می‌شوند. در اینجا به تشریح اتصال‌های مختلف سه فازه اکتفا خواهیم کرد. ساخت و بررسی کارکرد اتصال‌های تک فازه نیز به ترتیبی مشابه امکان پذیر است.

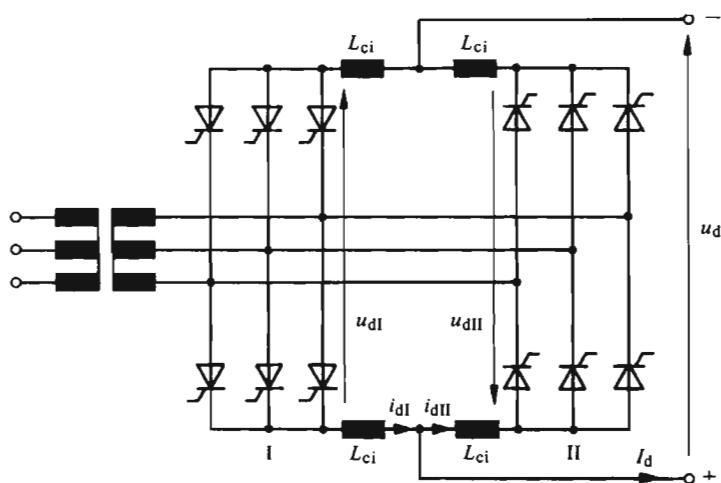
۲-۲-۱۵ اتصال موازی معکوس

شکل‌های ۱-۱۵ و ۲-۱۵ طرح واره «اتصال موازی معکوس» دو مبدل جریان I و II را به ترتیب با اتصال ستاره سه فازه (شکل ۱-۱۵) و با اتصال پل سه فازه (شکل ۲-۱۵) نشان می‌دهند. به ویژه در حالت دوم، اتصال موازی معکوس دو مبدل جریان با جهت هدایت وارونه به روشنی دیده می‌شود. L_c پیچک‌های جریان گردش هستند.

با توجه به اینکه مقدار متوسط فشار الکتریکی بین سرهای پیچک‌های گردش باید



شکل ۱۰-۱ اتصال موازی معکوس دو مبدل جریان با اتصال ستاره سه فاز.



شکل ۱۰-۲ اتصال موازی معکوس دو مبدل جریان با اتصال پل سه فاز.

صفر باشد، لازم است مقادیر متوسط دو فشار الکتریکی U_{dI} و U_{dII} برابر و لسی متقابل باشند

$$U_{dI} = -U_{dII} \quad (۳-۱۰)$$

و بنا بر رابطه عمومی (۵-۱۲) داریم

$$U_{dio} \cos \alpha_I = -U_{dio} \cos \alpha_{II} \quad (۴-۱۰)$$

در نتیجه، در حالت ایدئال، باید رابطه زیر بین زاویه تأخیر آتش دو مبدل جریان برقرار باشد

$$\alpha_{II} = 180^\circ - \alpha_I \quad (5-10)$$

از این شرط چنین نتیجه می‌شود که از دو مبدل جریان، یکی به صورت یکسو کننده کار می‌کند و دیگری به صورت اندولر. فشار الکتریکی داریم U_d بین دو سر خروجی اتصال موازی معکوس (بسته به زاویه تأخیر آتش α_I) می‌تواند بین مقادیر مثبت و منفی تغییر کند. با صرف نظر کردن از پدیده تداخل می‌توان نوشت

$$U_{di\alpha} = U_{di0} \cos \alpha_I \quad (6-10)$$

ملاحظه می‌شود که، برای رعایت حد کار به صورت اندولر، α_I فقط می‌تواند تقریباً بین 30° و 150° تغییر کند. این مسئله مقدار ماگزیمم (یشینه) فشار الکتریکی داریم حاصل از مبدل جریان دوطرفه را محدود می‌سازد. برای جریان داریم

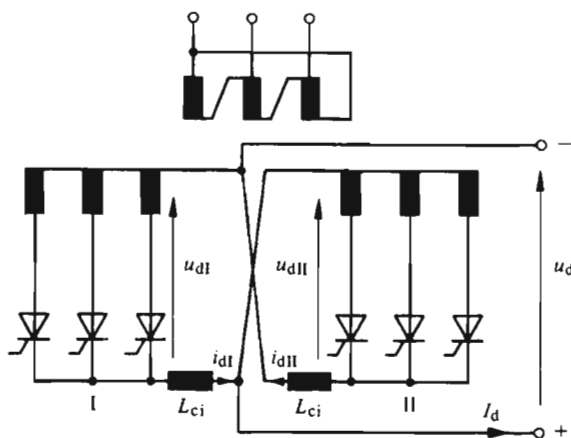
$$I_d = i_{dI} - i_{dII} \quad (7-10)$$

جریان خروجی I_d بسته به اینکه $i_{dI} > i_{dII}$ یا $i_{dI} < i_{dII}$ باشد، مثبت یا منفی است و با فرض القاگری بار (L) بینهایت، صاف خواهد بود. در عوض چنانکه در بند ۳-۱۰ نشان داده شده، جریانهای i_{dI} و i_{dII} به دلیل تموجی بودن جریان گردش، تموج خواهند داشت.

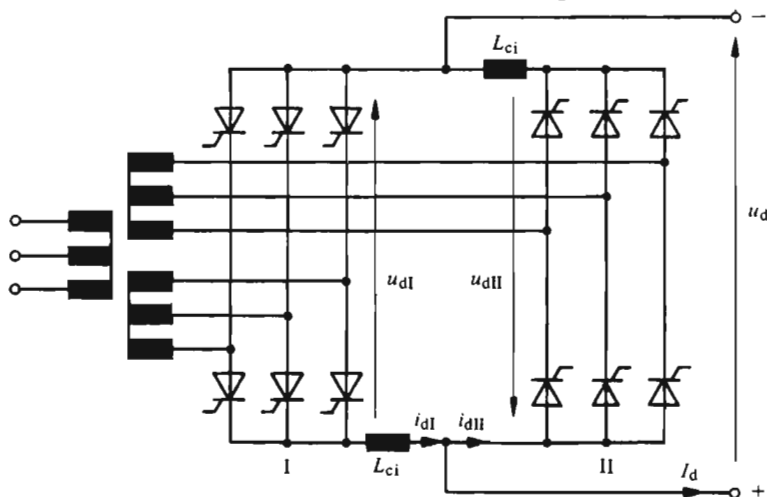
۳-۲-۱۰ اتصال متقاطع

«اتصال متقاطع» دو مبدل جریان در شکل ۳-۱۰ برای دو اتصال ستاره سه فاز و در شکل ۳-۱۰ برای دو اتصال پل سه فاز نشان داده شده است. برای دو اتصال ستاره، تقاطع اتصالاً به روشنی مشهود است. اتصال متقاطع با اتصال موازی معکوس این تفاوت را دارد که، برای تغذیه هر مبدل، ترانسفورماتور باید سیم پیچهای ثانویه مجزایی داشته باشد.

چنانکه در بند ۳-۳-۱ نشان داده خواهد شد، برای جریان گردش مشخصی، اتصال متقاطع دو مبدل جریان با اتصال پل سه فاز می‌تواند دارای پیچکهای جریان گردش کوچکتری باشد. علاوه بر این، این اتصال فقط به دو پیچک جریان گردش احتیاج دارد. رابطه‌هایی که در بند پیش درباره فشار الکتریکی و جریان داریم و همچنین شرایط فرمان بیان شد در اینجا هم معتبرند.



شکل ۱۰-۳ اتصال متقاطع دو مبدل جریان با اتصال ستاره سه فاز.



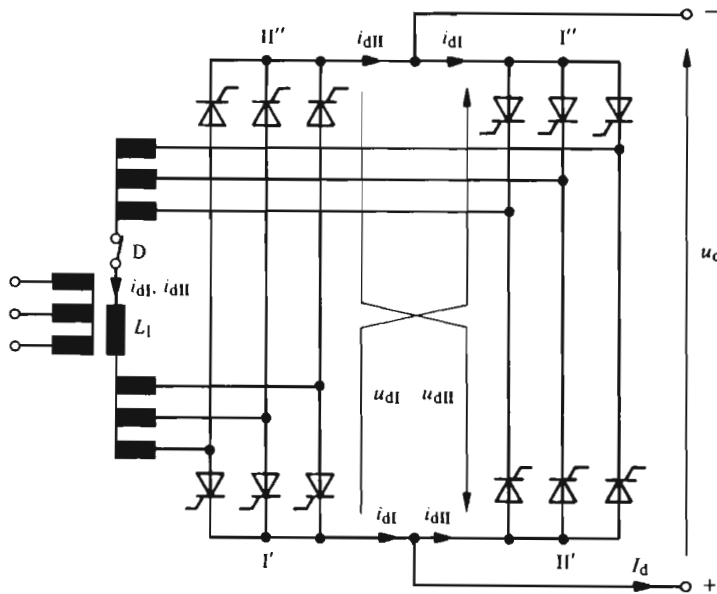
شکل ۱۰-۴ اتصال متقاطع دو مبدل جریان با اتصال پل سه فاز.

۴-۲-۱۰ اتصال به صورت H

امکان دیگر ساخت مبدل جریان دوطرفه «اتصال به صورت H» است که در شکل ۱۰-۵ نشان داده شده. نام این اتصال از چگونگی خاص قرار گرفتن گروه‌های کموتاسیون گرفته شده است.

این اتصال اصولاً از چهار مبدل جریان با اتصال ستاره سه فاز ساخته می‌شود که هر کدام يك گروه کموتاسیون می‌سازند و به توسط دو دسته سیم‌پیچ ثانویه تغذیه

می‌شوند. نقاط خنثای ثانویه‌ها با پیچک القاگر L_1 به هم اتصال می‌یابند. در این اتصال همچنین یک دیژنکتور (گشاینده) D قرار می‌گیرد که کارش بعداً توضیح داده خواهد شد. برای $I_d > 0$ گروه‌های کموتاسیون I' و I'' و برای $I_d < 0$ گروه‌های کموتاسیون II' و II'' هدایت جریان بار را به عهده می‌گیرند. جریان گردش از گروه‌های کموتاسیونی که جریان بار را هدایت نمی‌کنند می‌گذرد. اما جریان دایم I_d همواره از القاگر L_1 که مسیر جریان گردش نیز هست، عبور می‌کند.



شکل ۵-۱۰ اتصال به صورت H.

بنابراین پیچک القاگر L_1 دو وظیفه دارد که عبارتند از صاف کردن جریان دایم I_d و محدود ساختن جریان‌های گردش. چون در اغلب موارد وجود پیچک صاف کننده اجتناب ناپذیر است، اتصال به صورت H نیازی به پیچک‌های القاگر اضافی ندارد. اتصال به صورت H در حالت عیب‌های داخلی (به عنوان مثال در موقع روشن شدن بی‌موقع یا اتصال کوتاه شدن تیرستورها) نیز دارای مزیت‌هایی است. تمامی جریان‌های اتصال کوتاه مربوط به عیب داخلی اجباراً از طریق پیچک القاگر L_1 عبور می‌کنند. در نتیجه این پیچک سرعت افزایش جریان اتصال کوتاه را نیز محدود می‌سازد. جریان اتصال کوتاه به وسیله دیژنکتور (گشاینده) سریع D قطع می‌شود. برای تضمین حفاظت در

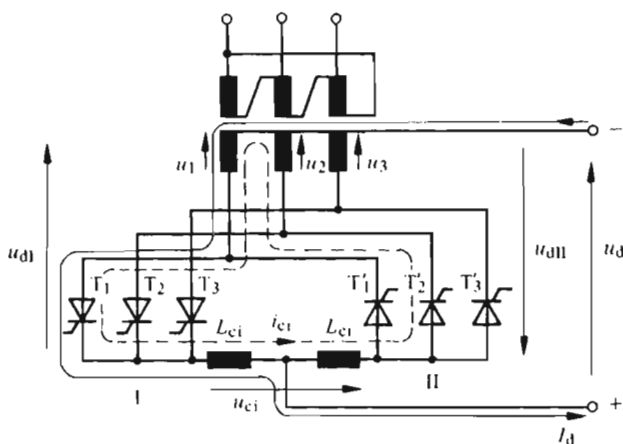
اتصالیهای تشریح شده در بندهای پیشین به وجود دو دیژنکتور (گشاینده) سریع نیاز هست.

استفاده از اتصال به صورت H فقط در قدرتهای بالا قابل توجیه است.

۳-۱۰ جریان گردشی

۱-۳-۱۰ کلیات

برای مطالعه پدیده مربوط به جریان گردشی از شکلهای ۶-۱۰ و ۷-۱۰، که باهم اتصال موازی معکوس دو مبدل جریان با اتصال ستاره سه فاز را نشان می دهند، استفاده می کنیم.

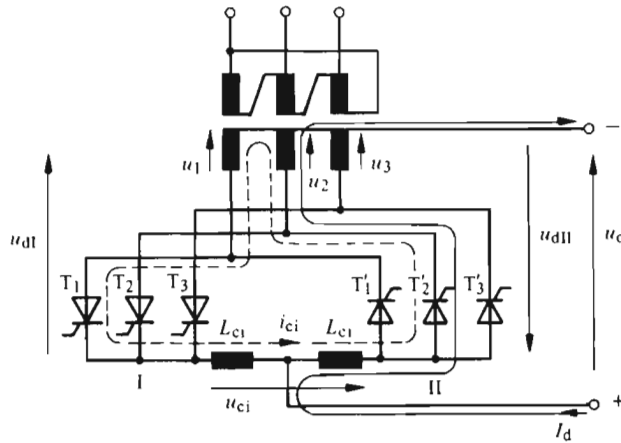


شکل ۶-۱۰ جریان دایم I_d و جریان گردشی i_{ci} در اتصال موازی معکوس برای $I_d > 0$.

شکل ۶-۱۰ از طرفی مسیر عبور جریان دایم I_d و از طرف دیگر مسیر عبور جریان گردشی i_{ci} برای $I_d > 0$ را نشان می دهد. جریان بار I_d از طریق مبدل جریان I عبور می کند. فرض شده است که، در هر لحظه معین، جریان I_d از تیرستور T_1 و جریان گردشی i_{ci} از تیرستورهای T_1 و T_4 می گذرند. بنابراین از تیرستور T_1 مجموع I_d و i_{ci} عبور می کند.

بنابراین برای $I_d < 0$ ، از مبدل جریان II، جریان بار می گذرد. در صورتی که از مبدل جریان I فقط جریان گردشی عبور می کند.

فشار الکتریکی بین سرهای دو پیچک جریان گردشی $u_{ci} = u_1 - u_4$ است و u_1 و u_4 فشارهای الکتریکی متناوب دوفازی هستند که جریان گردشی را هدایت می کنند. با استفاده



شکل ۷-۱۰ جریان دایم I_d و جریان گردش I_{ci} در اتصال موازی معکوس برای $I_d < 0$.

از دو فشار الکتریکی دایم u_{dI} و u_{dII} ، به طریق کلی تری برای «فشار الکتریکی گردش» نتیجه می شود

$$u_{ci} = u_{dI} + u_{dII} \quad (۸-۱۰)$$

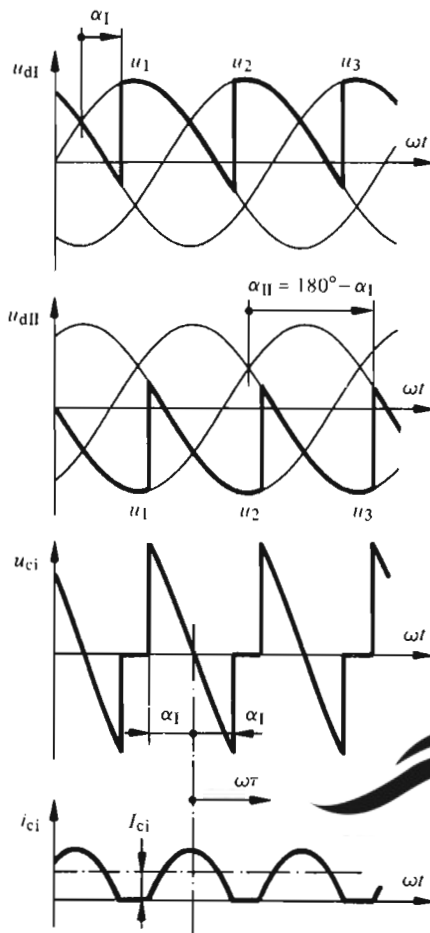
در حالت $I_d > 0$ (شکل ۷-۱۰) بسته به زاویه تأخیر آتش α_I ، مجموع جریانهای $I_d + i_{ci}$ از تیرستور T_1 به تیرستور T_2 سپس به تیرستور T_3 منتقل می شود. جریان گردش i_{ci} هم در ارتباط با زاویه تأخیر آتش α_{II} ، از تیرستور T'_3 به T'_2 و T'_1 می گذرد.

۲-۳-۱۰ جریان گردش در اتصال موازی معکوس دو مبدل جریان با اتصال ستاره سه فاز

در حالت اتصال موازی معکوس دو مبدل جریان با اتصال ستاره سه فاز، روند تغییرات فشارهای الکتریکی u_{dI} ، u_{dII} و u_{ci} برای سه زاویه تأخیر آتش ۷۵° و ۶۰° و ۴۵° با شرط $\alpha_{II} = ۱۸۰^\circ - \alpha_I$ و با فرض اینکه مبدل I، جریان بار را تأمین می کند، در شکلهای ۸-۱۰ تا ۱۰-۱۰ نشان داده شده اند. از پدیده تداخل صرف نظر شده است.

برای $\alpha_I = ۴۵^\circ$ (به شکل ۸-۱۰ مراجعه شود) فشار الکتریکی گردش، u_{ci} گاهی صفر و گاهی برابر فشارهای الکتریکی مرکب $u_1 - u_2$ ، $u_2 - u_3$ یا $u_3 - u_1$ است. با مبدأ جدید ωt که در شکل ۸-۱۰ تعریف شده است، نتیجه می شود

$$u_{ci} = -\sqrt{2} U_c \sin \omega t \quad (۹-۱۰)$$



شکل ۸-۱۰ روند تغییرات فشارهای الکتریکی u_{dII} ، u_{ci} و جریان i_{ci} در اتصال موازی معکوس برای $\alpha_I = 45^\circ$ و $\alpha_{II} = 135^\circ$.

که در آن $U_c = \sqrt{3} U_y$ است.
با صرف نظر کردن از مقاومت اهمی، جریان گردشی در معادله دیفرانسیل زیر صدق می‌کند

$$L_{ct} \frac{di_{ci}}{dt} = u_{ci} \quad (10-10)$$



L_{ci} القاگری کل در مدار جریان گردشی است که از القاگری اتصال کوتاه ($2L_c$) ترانسفورماتور (معمولاً قابل اغماض) و القاگری دو پیچک جریان گردشی تشکیل می‌شود. باید دانست که معمولاً، برای محدود کردن ابعاد پیچکهای جریان گردشی، این پیچکها قابل اشباع‌اند و القاگری آنها به جریان بستگی دارد؛ یعنی، در جریانهای کم، القاگری زیاد و در جریانهای زیاد، القاگری کم دارند. ابعاد این پیچکها معمولاً طوری تعیین می‌شود که برای جریان دایم اسمی، اشباع شده باشند و در مقابل جریان گردشی، ماگزیم القاگری خود را نشان بدهند. در این صورت L_{ci} عملاً با القاگری L_{ci} اشباع نشده یکی از پیچکها برابر است، زیرا، پیچک هادی جریان دایم I_d ، القاگری بسیار کوچکی از خود نشان می‌دهد.

با در نظر گرفتن وضع اولیه $i_{ci} = 0$ برای $\alpha_I = -\omega\tau$ ، جریان گردشی را می‌توان به کمک معادله‌های (۹-۱۰) و (۱۰-۱۰) تعیین کرد

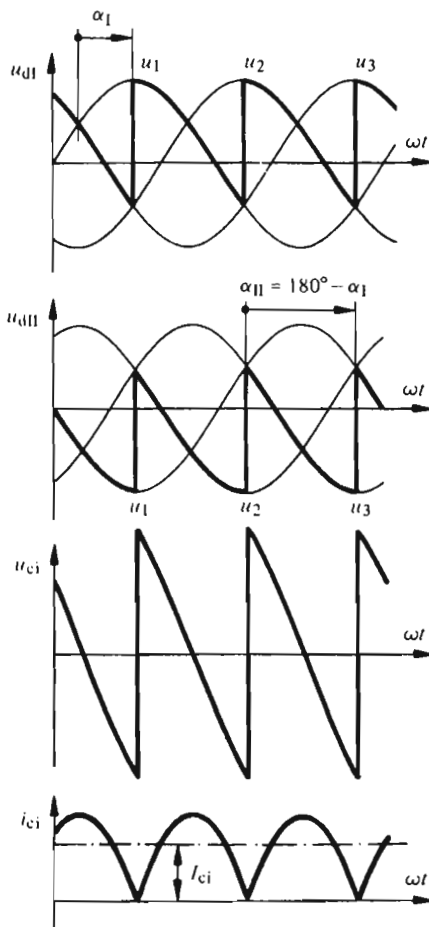
$$i_{ci} = \frac{\sqrt{2}U_c}{\omega L_{ci}} (\cos \omega\tau - \cos \alpha_I) \quad (10-11)$$

در شکل ۸-۱۰ روند تغییرات جریان i_{ci} نیز نشان داده شده است. جریان گردشی در لحظه مربوط به $\alpha_I = +\omega\tau$ ، صفر می‌شود، بنابراین ناپیوسته است. شاخص ضربان فشار الکتریکی گردشی u_{ci} ، $p = 3$ است. مقدار متوسط جریان گردشی از انتگرال گیری رابطه (۱۰-۱۱) بین دوحد $-\alpha_I$ و $+\alpha_I$ به دست می‌آید

$$\begin{aligned} I_{ci} &= \frac{3}{2\pi} \frac{\sqrt{2}U_c}{\omega L_{ci}} \int_{-\alpha_I}^{\alpha_I} (\cos \omega\tau - \cos \alpha_I) d\omega\tau = \\ &= \frac{3\sqrt{2}U_c}{\pi \omega L_{ci}} (\sin \alpha_I - \alpha_I \cos \alpha_I) \end{aligned} \quad (10-12)$$

مطابق شکل ۹-۱۰ برای $\alpha_I = 60^\circ$ و با رعایت شرط $\alpha_{II} = 180^\circ - \alpha_I$ ، جریان گردشی در حد هدایت ناپیوسته قرار می‌گیرد.

با افزایش α_I به مقادیری بیشتر از 60° ، جریان i_{ci} در حد هدایت ناپیوسته باقی می‌ماند و در واقع پدیده نشان داده شده در شکل ۱۰-۱۰، به وجود می‌آید. در این حالت جریان از دو قله سینوسی تشکیل می‌شود. با انتخاب محورهای زمان $\omega\tau$ و $\omega\tau'$ مطابق شکل ۱۰-۱۰ برای $(2\pi/3 - \alpha_I) \leq \omega\tau \leq (2\pi/3 - \alpha_I)$ ، داریم

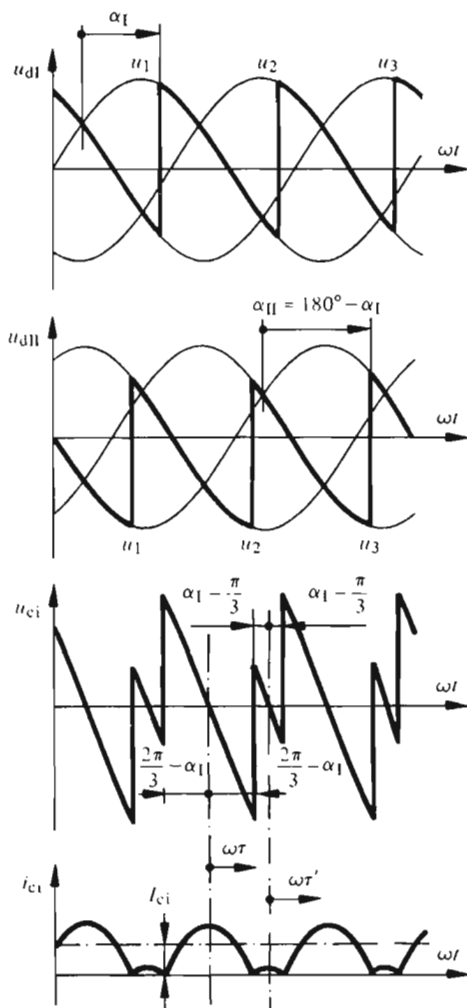


شکل ۹-۱۰ روند تغییرات فشارهای الکتریکی u_{dI} ، u_{dII} ، u_{dIII} و جریان i_{ci} در اتصال موازی معکوس برای $\alpha_I = 60^\circ$ و $\alpha_{II} = 120^\circ$.

$$i_{ci} = \frac{\sqrt{2} U_c}{\omega L_{ct}} \left[\cos \omega \tau - \cos \left(\frac{2\pi}{3} - \alpha_I \right) \right] \quad (13-10)$$

و برای $(\alpha_I - \pi/3) \leq \omega \tau' \leq (\alpha_I - \pi/3) + \pi$ ، داریم

$$i_{ci} = \frac{\sqrt{2} U_c}{\omega L_{ct}} \left[\cos \omega \tau' - \cos \left(\alpha_I - \frac{\pi}{3} \right) \right] \quad (14-10)$$



شکل ۱۰-۱۰ روند تغییرات فشارهای الکتریکی u_{dI} ، u_{dII} ، u_{ci} و جریان i_{ci} در اتصال موازی معکوس برای $\alpha_I = 75^\circ$ و $\alpha_{II} = 105^\circ$.

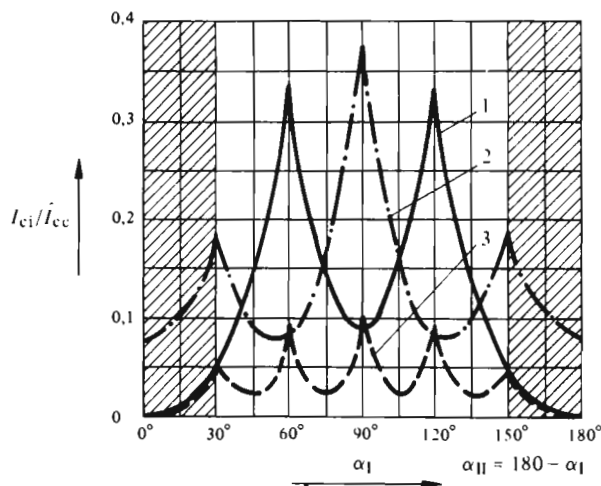
بنابراین، مقدار متوسط جریان گردش به ترتیب زیر به دست می آید

$$I_{ci} = \frac{3}{2\pi} \frac{\sqrt{2} U_c}{\omega L_{ct}} \left\{ \int_{-(\frac{\pi}{2} - \alpha_I)}^{\frac{\pi}{2} - \alpha_I} \left[\cos \omega \tau - \cos \left(\frac{\pi}{2} - \alpha_I \right) \right] d\omega \tau + \right. \\ \left. + \int_{-(\alpha_I - \frac{\pi}{2})}^{\alpha_I - \frac{\pi}{2}} \left[\cos \omega \tau' - \cos \left(\alpha_I - \frac{\pi}{2} \right) \right] d\omega \tau' \right\} = \\ = \frac{3\sqrt{2} U_c}{\pi \omega L_{ct}} \left[\left(1 - \frac{\pi}{2} \frac{\sqrt{2}}{2} \right) \sin \alpha_I + \left(\frac{\pi}{2} - \alpha_I \right) \cos \alpha_I \right] \quad (15-10)$$

مقدار متوسط جریان گردش I_{ci} بر حسب زاویه تأخیر آتش α_I در شکل ۱۰-۱۱ (منحنی ۱) نشان داده شده است که نسبت به $\alpha_I = \pi/2$ تقارن دارد. در این شکل، I_{ci} نسبت به

$$\hat{I}_{cc} = \frac{\sqrt{2} U_c}{\omega L_{ct}} \quad (16-10)$$

یعنی دامنه مؤلفه متناوب i_{ci} که در حالت اتصال کوتاه دایمی مدار مورد نظر پدید می‌آید، آورده شده است.



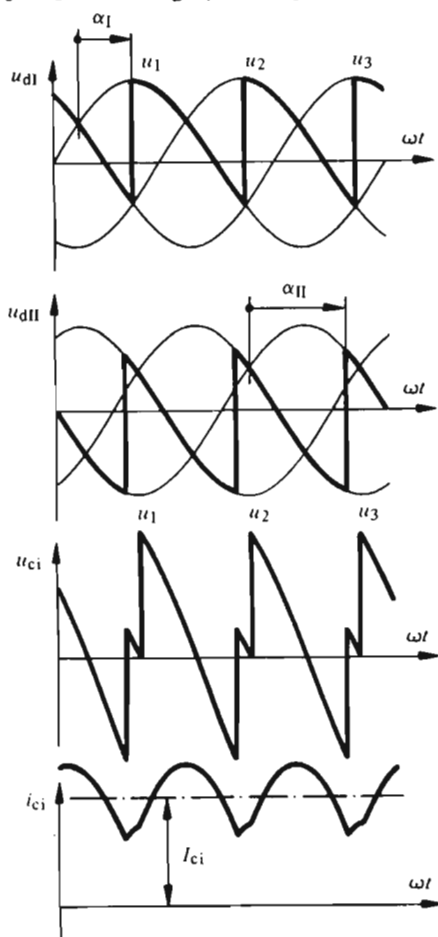
شکل ۱۰-۱۱ جریان گردش I_{ci} بر حسب زاویه تأخیر آتش α_I .

- ۱- اتصال موازی معکوس (ستاره سه فاز و پل سه فاز)؛
- ۲- اتصال متقاطع (ستاره سه فاز)؛
- ۳- اتصال متقاطع (پل سه فاز).



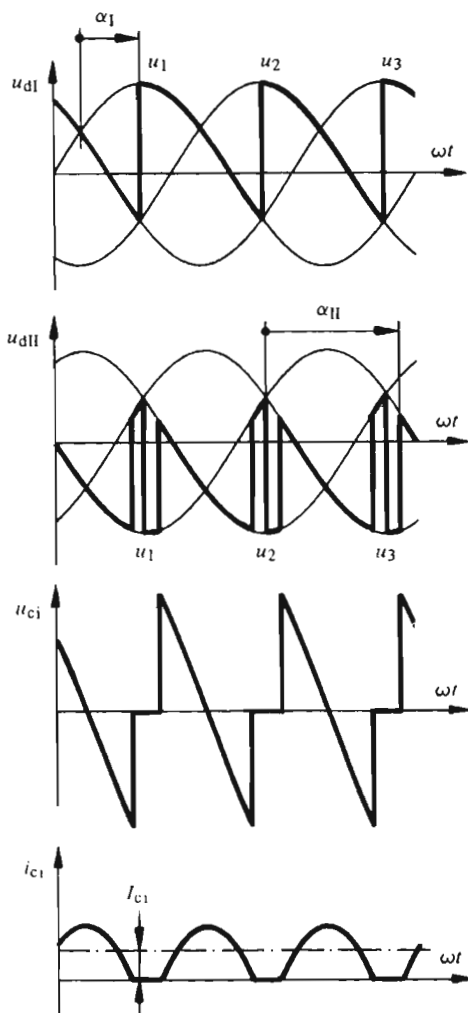
ابعاد پیچک جریان گردش معمولاً طوری تعیین می‌شود که جریان گردش، در بدترین حالت، به مقادیری در حدود ۱۰ تا ۲۰ درصد جریان دایم اسمی برسد. روند تغییرات جریان گردش در حالتی که شرط $\alpha_{II} = 180^\circ - \alpha_I$ برقرار نباشد، در شکل‌های ۱۰-۱۲ تا ۱۴-۱۰ نشان داده شده است.

برای $\alpha_{II} < 180^\circ - \alpha_I$ فشار الکتریکی گردش u_{ci} يك مؤلفه دایمی دارد (به شکل ۱۰-۱۲ مراجعه شود). این مؤلفه باعث به وجود آمدن يك مؤلفه دایمی بسیار مهم در جریان گردش می‌شود که فقط مقاومتهای اهمی كوچك مدار، آن را محدود می‌کنند. حتی انحرافات خیلی جزئی α_{II} در زیر مقدار $\alpha_I - 180^\circ$ ، جریانهای گردش بسیار شدیدی را باعث می‌شوند. بنابراین باید از به وجود آمدن چنین حالت کاری جلوگیری کرد.



شکل ۱۰-۱۲ روند تغییرات فشارهای الکتریکی u_{dI} ، u_{dII} ، u_{ci} و جریان گردش i_{ci} در اتصال موازی معکوس برای $\alpha_I = 60^\circ$ و $\alpha_{II} = 105^\circ$.

در عوض اگر $\alpha_I - \alpha_{II} > 180^\circ$ بشود، جریان گردش حالت ناپيوسته پيدا می‌کند و مقدار متوسطش کاهش می‌یابد (به شکل‌های ۱۰-۱۳ و ۱۰-۱۴ مراجعه شود). در فاصله زمانی مربوط به عدم هدایت جریان گردش، فشار الکتریکی داریم u_{dII} از فشار الکتریکی داریم $-u_{dI}$ ، یعنی فشار الکتریکی مبدلی که جریان داریم I_d بار را می‌دهد، تبعیت می‌کند. بدین ترتیب، شرط برابری مقادیر متوسط $U_{dI} = -U_{dII}$ رعایت می‌شود. این حالت کار می‌تواند برای تقلیل جریان گردش به کار رود.

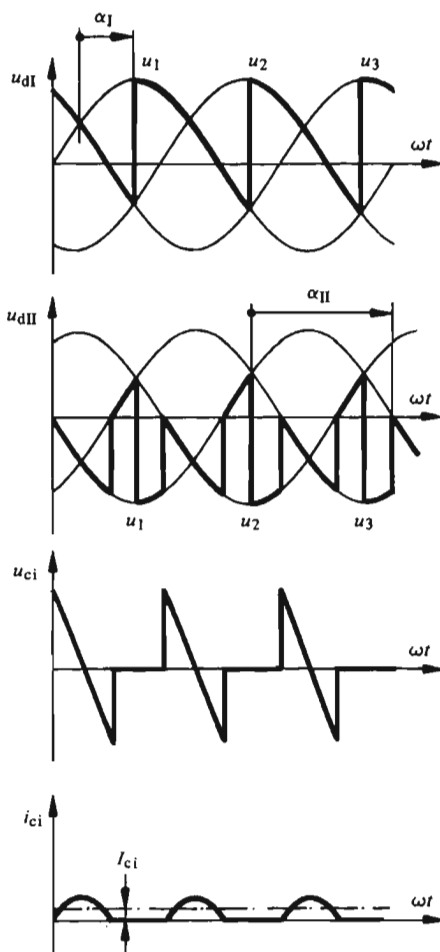


شکل ۱۰-۱۳ روند تغییرات فشارهای الکتریکی u_{dI} ، u_{dII} ، u_{C1} و جریان گردش i_{C1} در اتصال موازی معکوس برای $\alpha_I = 60^\circ$ و $\alpha_{II} = 135^\circ$.

۳-۳-۱۵ جریان گردشی در اتصالات دیگر

روند تغییرات جریان گردشی در اتصالات دیگر مبدل جریانهای دو طرفه را، می توان به طریقی مشابه با آنچه که در بالا گفته شده به دست آورد. در اینجا از آوردن جزئیات بیشتر آنها خودداری می شود.

ویژگی اتصال موازی معکوس دو پل سه فاز (به شکل ۱۰-۲ مراجعه شود) در وجود دو جریان گردشی است که یکی در نیمه های پایینی و دیگری در نیمه های بالایی پلهای I و II دور می زند. برای هر یک از این جریانهای گردشی همان شرایط حالت دو اتصال ستاره سه فاز وجود دارد. بنابراین شاخص ضریبان فشار الکتریکی گردشی $p=3$ است،



شکل ۱۰-۱۴ روند تغییرات فشارهای الکتریکی u_{dI} ، u_{dII} ، u_{ci} و جریان گردشی i_{ci} در اتصال موازی معکوس برای $\alpha_I = 60^\circ$ و $\alpha_{II} = 150^\circ$.

هرچند که فشار الکتریکی دایم u_d دارای شاخص ضربان $p=6$ باشد. نتایج به دست آمده در بند پیش، به ویژه منحنی ۱ در شکل ۱۰-۱۱، برای این حالت نیز معتبرند. در اتصال متقاطع دو مبدل جریان ستاره‌ای سه فاز مطابق شکل ۱۰-۳، اختلاف فاز بین فشارهای الکتریکی متناوب دو مبدل، با حالت اتصال موازی معکوس تفاوت دارد. در نتیجه، تغییرات مقدار متوسط جریان گردش، بر حسب زاویه تأخیر آتش، متفاوت است و از منحنی ۲ در شکل ۱۰-۱۱ تبعیت می‌کند. برای فشار الکتریکی گردش با $p=3$ است.

در اتصال متقاطع دوپل سه فاز (به شکل ۱۰-۴ مراجعه شود) ملاحظه می‌شود که جریان گردش به طور کامل در هر دوپل عبور می‌کند. بنابراین فشار الکتریکی گردش روند تغییراتی با شاخص ضربان $p=6$ دارد. مقدار متوسط جریان گردش I_{ei} بر حسب α_I به وسیله منحنی ۳ در شکل ۱۰-۱۱ داده شده است. دیده می‌شود که جریان گردش به طور محسوسی کاهش یافته است. از طرف دیگر برای هر جریان گردش معین القاگری پمپجک جریان گردش تقریباً یک سوم مقدارش در اتصالهای دیگر با $p=3$ است. بنابراین این اتصال، از این نظر، بسیار مناسب است.

مطابق شکل ۱۰-۵، اتصال به صورت H نیز فشار الکتریکی گردش با شاخص ضربان $p=3$ دارد. شرایط این اتصال مشابه شرایط اتصال متقاطع دو مبدل جریان ستاره‌ای سه فاز است.

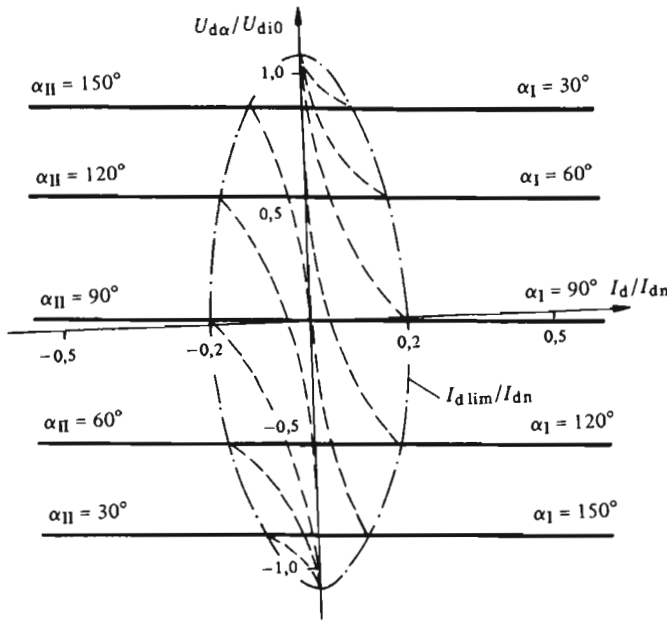
۱۰-۳-۴ مشخصه‌های بار

مشخصه‌های بار مبدل جریان دو طرفه، با در نظر گرفتن افت فشار الکتریکی القایی مربوط به کموتاسیون طبیعی، در شکل ۱۰-۱۵ نشان داده شده‌اند. این مشخصه‌ها تغییرات فشار الکتریکی دایم $U_{d\alpha}$ را بر حسب جریان دایم I_d (به عنوان متغیر) و زوایای تأخیر آتش α_I و α_{II} (به عنوان پارامتر) نشان می‌دهند.

منحنیهای معتبر برای کارکرد بدون جریان گردش، مربوط به ناحیه هدایت ناپیوسته برای جریانهای دایم ضعیف (به بند ۷-۳ مراجعه شود)، به طور خط‌چین مشخص شده‌اند. بنا بر این اثر وجودی جریان گردش در این است که مشخصه‌ها در حوالی جریان $I_d=0$ نیز خطی می‌مانند. برای این منظور، لازم است برای مقادیر کوچک جریان دایم I_d ، جریان گردش ناپیوسته نباشد.

پیوسته بودن این مشخصه‌ها، برای تنظیم مقادیر کوچک جریان دایم و عبور از صفر آن بسیار مناسب است.

برای جریانهای دایم I_d بزرگتر از جریان حد هدایت ناپیوسته $(I_{d\lim})$ ، جریان گردش می‌تواند ناپیوسته باشد، و حتی با قراردادن $\alpha_I - 180^\circ > \alpha_{II}$ کاهش داده شود.



شکل ۱۰-۱۵ مشخصه‌های بار در مبدل جریان دوطرفه با جریان گردش.

۱۰-۳-۵ تنظیم جریان گردش

چنانکه دیدیم، جریان گردش به شدت نسبت به زوایای تأخیر آتش α_{II} کوچکتر از $\alpha_I - 180^\circ$ حساس است. در عوض اگر α_{II} از این مقدار نظری بیشتر باشد، جریان گردش ناپیوسته و برای مشخصه‌های نزدیک $I_d = 0$ نامناسب می‌شود. کموتاسیون مبدل جریانی که جریان دایم را هدایت می‌کند نیز بر روی رابطه بین α_I و α_{II} تأثیر اضافی می‌گذارد. معمولاً فرمان زوایای تأخیر آتش دومبدل جریان، بر طبق قانون $\alpha_{II} = 180^\circ - \alpha_I$ ، کافی نیست و ضرورت دارد، برای تنظیم جریان گردش در یک مقدار معین، مدار تنظیم-کننده‌ای به کار رود.

۱۰-۴-۱۰ اتصالهای بدون جریان گردش

۱۰-۴-۱۰ کلیات

جریان گردش دارای این مزیت است، که خطی بودن مشخصه بار برای جریانهای دایم ضعیف (در حوالی $I_d = 0$) را تضمین می‌کند. به عنوان عیب، باید لزوم پیچکهای محدود-

کننده جریان گردشی را در نظر گرفت. علاوه بر آن، زاویه تأخیر آتش مبدل جریانی که به صورت یکسو کننده کار می کند نمی تواند از $\alpha = 30^\circ$ کمتر باشد بنا بر این، مقدار ماگزیمم (بیشینه) فشار الکتریکی دایم تولید شده در مبدل جریان، با این مقدار α محدود می شود. این محدودیت در زاویه تأخیر آتش، باعث افزایش قدرت رثا کتیو جذب شده به توسط مبدل جریان نیز می شود.

در تأسیسات با قدرتهای بالا، بهتر است جریان گردشی وجود نداشته باشد. برای این منظور لازم است تا تپهای چکانده ها در مبدلی که جریان بار I_h را هدیت نمی کند به کلی حذف شوند.

هر گاه با قطع یکی از مبدل‌های جریان، از عبور جریان گردشی جلوگیری کنیم، پیچکهای جریان گردشی می توانند حذف شوند. علاوه بر این، مبدل جریانی که به صورت یکسو کننده کار می کند، می تواند با زاویه تأخیر آتشی که تا $\alpha = 0$ تغییر می کند فرمان داده شود. بدین ترتیب مقدار ماگزیمم (بیشینه) فشار الکتریکی دایم، افزایش و مصرف قدرت رثا کتیو کاهش می یابد.

ایرادی که برای کارکرد بدون جریان گردشی، می توان بیان کرد، ناپیوسته بودن مشخصه های بار در حوالی $I_h = 0$ (به منحنیهای خط چین در شکل ۱۵-۱۰ مراجعه شود) است.

برای کارکرد بدون جریان گردشی می توان از اتصالهای بیان شده در بندهای ۲-۲-۱۰ تا ۴-۲-۱۰، یعنی اتصال موازی معکوس، اتصال متقاطع (البته بدون پیچکهای جریان گردشی) و اتصال به صورت H، استفاده کرد. علاوه بر این، برای این شیوه کارکرد، می توان اتصال موازی معکوس تیرستورها رانیز که مزایای بیشتری دارد و در زیر تشریح می شود، به کار برد.

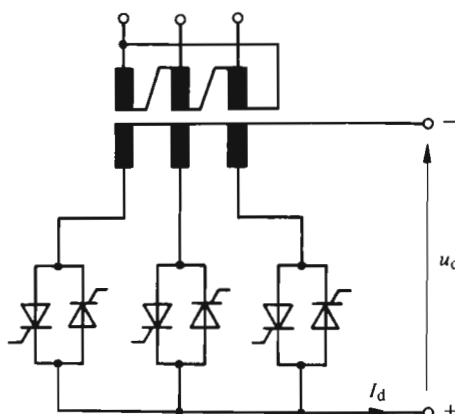
۲-۴-۱۰ اتصال موازی معکوس تیرستورها

ویژگی «اتصال موازی معکوس تیرستورها» چنانکه شکل‌های ۱۰-۱۶ و ۱۰-۱۷ نشان می دهند، در این است که در هر شاخه مبدل جریان (با اتصال ستاره یا با اتصال پل)، دو تیرستور مستقیماً به صورت موازی معکوس (سریه ته) سوار شده اند.

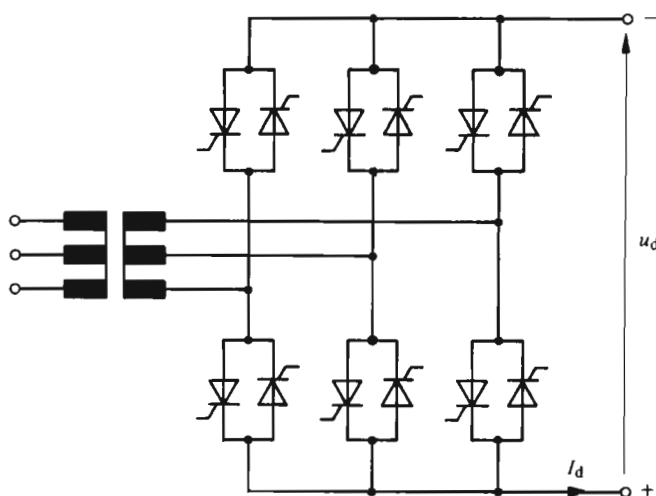
برای هر جهت مورد نظر جریان دایم I_h ، باید تیرستورهای را روشن کرد که بتوانند عبور این جریان را میسر سازند. در هیچ حالتی روشن شدن دو تیرستوری که به دو جهت هدایت مخالف هم مربوط می شوند قابل قبول نیست، زیرا در این صورت يك اتصال کوتاه داخلی در مبدل جریان رخ خواهد داد.

۳-۴-۱۰ کنترل اتصالهای بدون جریان گردشی

اتصالهای مبدل‌های جریان دو طرفه بدون جریان گردشی احتیاج به کنترلی دارند که بسته



شکل ۱۵-۱۶ اتصال موازی معکوس تیرستورها در اتصال ستاره سه فاز.



شکل ۱۵-۱۷ اتصال موازی معکوس تیرستورها در اتصال پل سه فاز.

بودن مطمئن یکی از مبدل‌های جریان را تضمین کند. این کنترل از یک مدار تنظیم جریان و یک قسمت فرمان رقیمی تشکیل می‌شود.

برای تعویض جهت جریان داریم I_d ، ابتدا باید مقدار آن را کاهش داد. این عمل را تنظیم‌کننده جریان، که زاویه تأخیر آتش مبدل جریان در حال هدایت را به طرف کار به صورت اندولر جابه‌جا می‌کند، انجام می‌دهد. به محض صفر شدن جریان، تپ‌های روشن‌کننده این

مبدل جریان حذف خواهند شد. پس از گذشت زمان مرده کوچکی در حدود یک میلی-ثانیه (برای اطمینان از قطع شدن تیرستورهای مبدل، این زمان مرده باید به اندازه کافی از زمان خاموش شدن t_q تیرستورها بیشتر باشد)، تپهای روشن کننده به دومین مبدل جریان اعمال می شود. به کمک تنظیم کننده جریان، جریان دائم افزایش می یابد تا به مقدار خواسته شده در جهت مخالف برسد.



فصل یازدهم

مبدل‌های فرکانس با کموتاسیون طبیعی

۱-۱۱ مقدمه

۱-۱۱-۱ کلیات

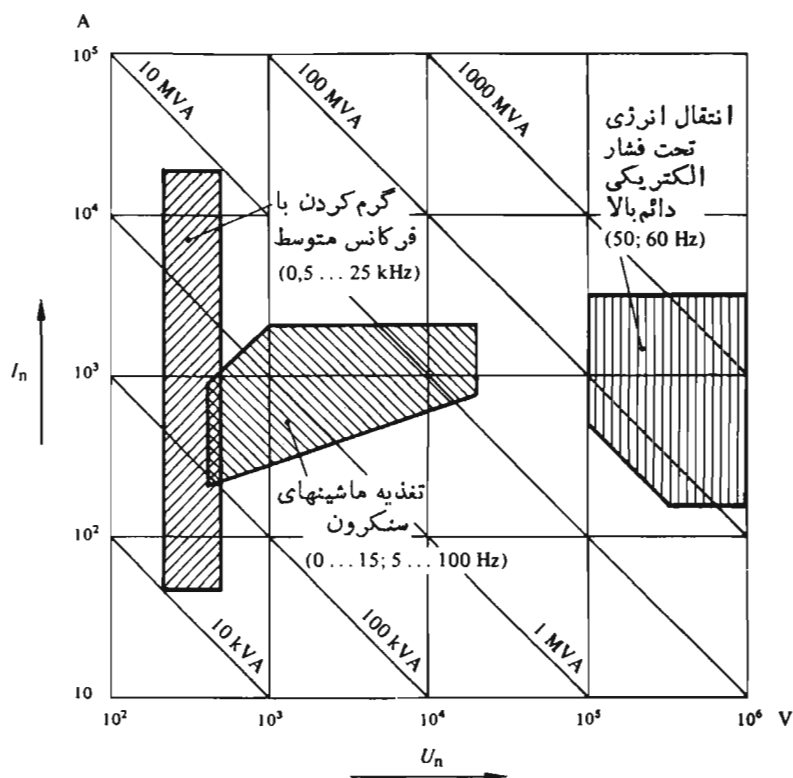
مبدل فرکانس، تبدیل شبکه متناوب تغذیه با فرکانس ثابتی را به شبکه متناوب دیگری با فرکانس عموماً متغیر امکان پذیر می‌سازد. مبدل‌های فرکانس بر دو نوعند: مبدل‌های فرکانس مستقیم و مبدل‌های فرکانس با مدار میانجی. مبدل‌های فرکانس با تبدیل مستقیم به کمک مبدل‌های جریان دوطرفه‌ای که در فصل دهم بررسی کردیم ساخته می‌شوند و فقط از نظر فرمان، با این مبدل‌ها اندکی تفاوت دارند. این نوع مبدل در بند ۱-۱۱-۲ تشریح خواهد شد. مبدل‌های فرکانس با مدار میانجی اصولاً از اتصال زنجیره‌ای دو مبدل جریان ساخته می‌شوند. شبکه متناوب اولیه ابتدا به یک شبکه میانجی دایم و سپس به یک شبکه متناوب ثانویه تبدیل می‌شود. مبدل فرکانس با مدار جریان دایم میانجی در بند ۱-۱۱-۳ بررسی خواهد شد، در صورتی که بند ۱-۱۱-۴ به تشریح مبدل‌های فرکانس با بار نوسانگر اختصاص خواهد داشت. کلیه مبدل‌های فرکانسی که در این فصل بررسی می‌شوند با کموتاسیون طبیعی کار می‌کنند.

۱-۱۱-۲ کاربردهای مبدل‌های فرکانس با کموتاسیون طبیعی

دامنه کاربرد مبدل‌های فرکانس با کموتاسیون طبیعی بسیار وسیع است. شکل ۱-۱۱، به طور



طرح‌وار مهمترین این کاربردها را نشان می‌دهد و در آن فشارهای الکتریکی، جریانه‌ها و قدرتهای اسمی متداول در این گونه تأسیسات نیز مشخص شده‌اند.



شکل ۱-۱۱ کاربردهای مبدل‌های فرکانس با کموتاسیون طبیعی.

مبدل‌های فرکانس مستقیم اساساً برای تغذیهٔ موتورهای سنکرونی به کار می‌روند که فرکانس تغذیه‌شان نسبتاً پایین است و دامنه‌ای از صفر تا ۱۵ هرتز دارند. مبدل‌های فرکانس با مدار میانجی نیز برای تغذیهٔ ماشینهای سنکرون به کار می‌روند. در این حالت دامنهٔ تغییر فرکانس تقریباً بین ۵ تا ۱۰۰ هرتز است و قدرتهای مورد استفاده تا حدود ۵۰ MVA می‌رسد. این نوع مبدل فرکانس همچنین برای راه‌اندازی جبران‌کننده‌های سنکرون یا آلترناتورهای سنکرونی که به توسط توربینهای گازی چرخانده می‌شوند، و نمی‌توانند با امکانات خودشان راه بیفتند، مورد استفاده قرار می‌گیرند. حوزهٔ دیگر کاربرد مبدل فرکانس با مدار میانجی، در اتصال قابل انعطاف بین دو شبکهٔ متناوب توأم با انتقال انرژی تحت فشار الکتریکی بالا و دایم است. در اینجا فشارهای

الکتریکی تا 1 MV می‌رسند و قدرتهای اسمی از 2000 MVA نیز تجاوز می‌کنند. PowerEn.ir
مبدل‌های فرکانس با بار نوسانگر در تأسیسات گرم کننده با فرکانس متوسط
($25\text{ kHz} \dots 500\text{ Hz}$) برای گرم کردن، سخت کردن و ذوب فلزات به کار می‌روند.

۱-۱-۳ مفروضات مطالعه کارکرد

در مطالعه کارکرد مبدل‌های فرکانس با کموتاسیون طبیعی، القاگری L_c در مدار کموتاسیون
(به شکل ۲-۳ مراجعه شود) قابل اغماض فرض می‌شود

$$L_c = 0 \quad (1-11)$$

این فرض ایجاب می‌کند تا مطابق کارکرد ایدئال مبدل‌های جریان، زاویه تداخل
صفر شود. در حقیقت زمان تداخل، مدتی مشخص دارد و کموتاسیون مبدل‌های فرکانس
مشابه کموتاسیون مبدل‌های جریان است.
القاگری بار، بسته به نوع مبدل فرکانس مقداری مشخص فرض می‌شود.

۱-۱-۲ مبدل‌های فرکانس مستقیم

۱-۲-۱ کلیات

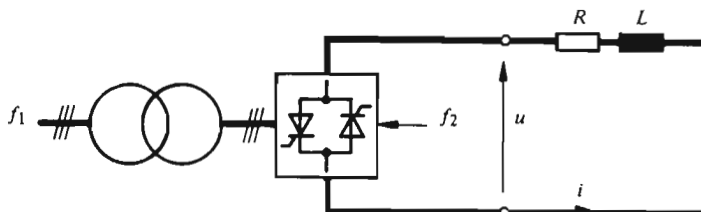
مبدل‌های جریان دوطرفه که در فصل دهم تشریح شدند، تعویض جهت جریان دایم را امکان-
پذیر می‌سازند. اگر این تعویض جهت جریان به طور دوره‌ای انجام پذیرد، در خروجی
مبدل جریان، جریانی متناوب پدید می‌آید. بدین ترتیب مبدل جریان دو طرفه به صورت
مبدل فرکانس کار می‌کند. اصولاً می‌توان کلیه اتصال‌های یاد شده در فصل دهم را، چه با
جریان گردشی چه بدون آن، برای این منظور به کار برد. اتصالاتی که بیش از همه به کار
می‌رود، اتصال موازی معکوس با دو پل سه فاز است که بدون جریان گردشی کار می‌کند.
این نوع مبدل عمل تبدیل فرکانس ورودی به فرکانس خروجی را به طور مستقیم و بدون
تبدیل به یک سیستم دایم میانجی، انجام می‌دهد و مبدل فرکانس مستقیم نامیده می‌شود.
این مبدل‌های فرکانس اغلب مبدل سیکل^۱ نیز گفته شده‌اند.

۱-۲-۲ مدار تک فاز

در شکل ۱-۲، مبدل فرکانس مستقیمی به طور طرح وار نشان داده شده که خروجی اش سیستم
تک فازه‌ای با فرکانس عموماً متغیر f_r است. در عوض، ورودی سیستمی است سه فازه و با
فرکانس ثابت f_s .
چون سیستم متناوب با فرکانس f_r ، از تغییرات پیوسته زاویه تأخیر آتش مبدل جریان

1) cycloconvertisseur

دو طرفه به دست آمده است، فرکانس f فقط می تواند تقریباً بین 0 و $f/2$ تغییر کند. فرکانسهای بالاتر از $f/2$ به علت تأخیرهای در ارتباط با کارکرد مبدل های جریان نمی توانند به دست آیند.



شکل ۱۱-۲ نمایش طرح وار مبدل فرکانس مستقیم تک فازه.

مقدار متوسط لغزان (تعیین شده در مدت زمان T/p) فشار الکتریکی u و جریان i ، با فرکانس f تغییر تناوبی دارند. قدرت رثا کتیو مربوط به جا به جایی تپهای روشن کننده و کموتاسیون جریان کلا^۲ از طریق شبکه تغذیه با فرکانس f تأمین می شود. این قدرت همانند قدرت اکتیو، با دو برابر فرکانس f تغییر می کند.

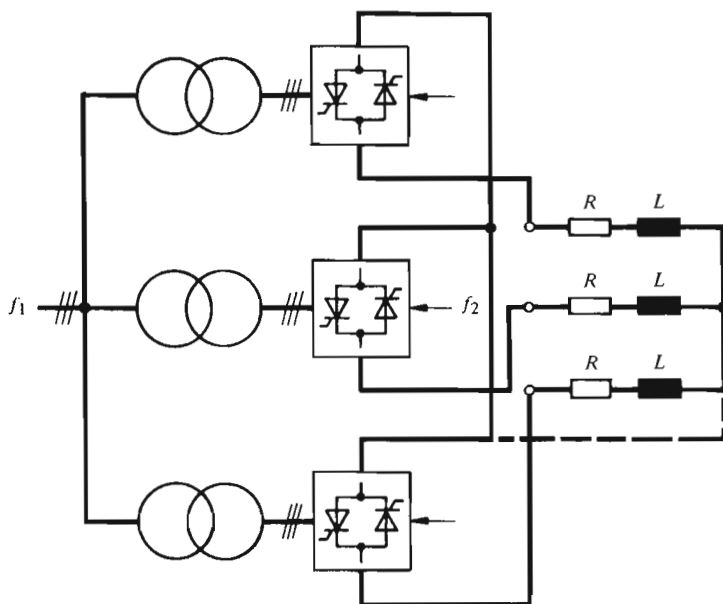
۱۱-۳-۳ مدار سه فازه

چنانکه شکل ۱۱-۳ نشان می دهد، مبدل فرکانس مستقیم با خروجی سه فازه احتیاج به سه مبدل جریان دو طرفه دارد.

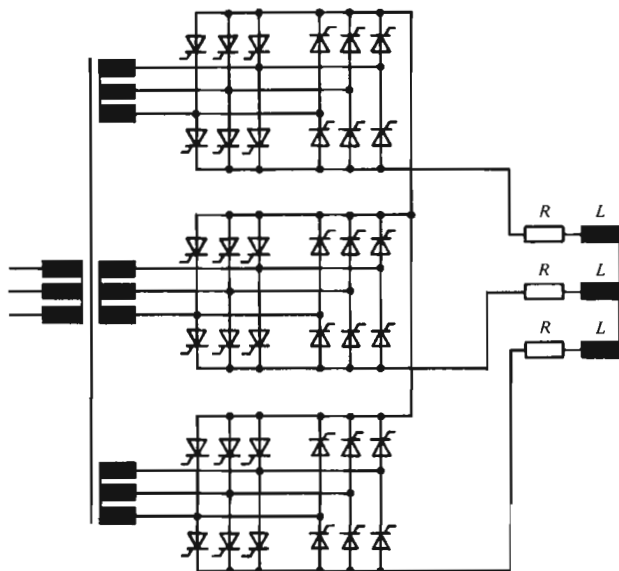
سه مبدل جریان دو طرفه همواره ستاره ای بسته می شوند. معمولاً بار نیز با اتصال ستاره است. دو نقطه خنثی می توانند به هم متصل باشند (اتصال خط چین). این اتصال در هر حال برای شروع کار مبدل فرکانس اجتناب ناپذیر است، تا عبور جریان را تنها از طریق یک مبدل جریان دو طرفه، هنگامی که تپهای روشن کننده سه مبدل جریان همزمان نیستند، تضمین کنند. این اتصال می تواند پس از استقرار حالت پایا حذف شود. در این حالت جریان حداقل از طریق دو مبدل جریان دو طرفه عبور می کند. پس از حذف این اتصال، جریان در هر فاز، دیگر دارای هارمونیکهای مرتبه ۳ و مضرب ۳ فرکانس f نخواهد بود.

سه مبدل جریان دو طرفه باید چنان کنترل شوند که فشارهای الکتریکی سیستم سه فازه با فرکانس f ، اختلاف فازی برابر 120° بین فازها داشته باشند.

مصابیح و عناصر به کار رفته برای این مبدل فرکانس و همچنین برای مدارهای تنظیم و کنترل نسبتاً زیادند. با توجه به اینکه سه مبدل جریان دو طرفه اتصال پل سه فازه دارند، مبدل فرکانس مستقیم، حداقل به ۳۶ تیریسور احتیاج دارد (شکل ۱۱-۴).



شکل ۱۱-۳ نمایش طرح وار مبدل فرکانس مستقیم سه فازه.



شکل ۱۱-۴ طرح واره مبدل فرکانس مستقیم سه فازه متشکل از چند اتصال پل موازی معکوس.



بنا بر این، کاربرد این مبدل فرکانس به قدرتهای بالا و برای تغذیه موتورهای سنکرون کم سرعت محدود می شود. بدین ترتیب، فرکانس f_p که فقط بین صفر و ۵ تا ۱۵ هرتز تغییر می کند، ساده تر شدن ساختمان ماشینهای سنکرون را امکان پذیر می سازد. در نتیجه تعداد جفت قطبهای این ماشینها نسبتاً کم خواهد بود.

کنترل مبدلهای فرکانس مستقیم، به دو روش: کنترل دوزنقه ای و کنترل سینوسی امکان دارد. در بندهای بعد، این دو روش کنترل فقط برای یک فاز تنها بررسی خواهند شد.

۱۱-۲-۴ کنترل دوزنقه ای

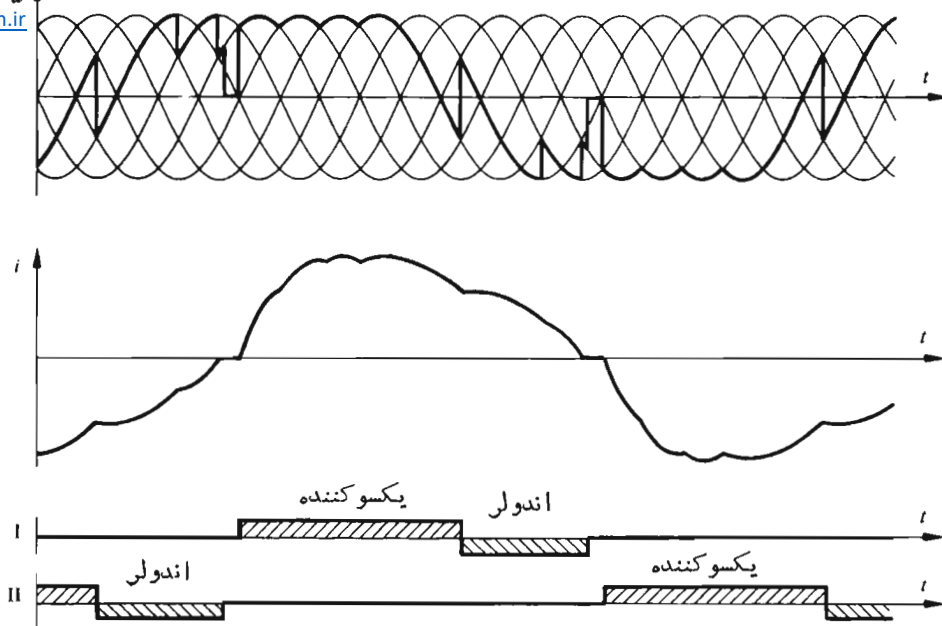
ویژگی «کنترل دوزنقه ای» این است که فشار الکتریکی در خروجی مبدل فرکانس (مخصوصاً برای فرکانسهای $f_p/2 \dots f_p/4$) صورت دوزنقه ای دارد. برای فرکانسهای $f_p \ll f_1$ ، این فشار الکتریکی بیشتر مستطیلی شکل می شود.

این کنترل، برحسب اینکه مبدلهای جریان دو طرفه به کار رفته با، یا بدون جریان گردشی کار کنند، متفاوت خواهد بود. عموماً استفاده از مبدلهای جریان دو طرفه بدون جریان گردشی ترجیح داده می شود. در واقع این مبدلها مزایایی دارند که بعداً بیان خواهند شد.

شکل ۱۱-۵ روند تغییرات فشار الکتریکی u و جریان i برای فرکانس $f_1 = 333f_p$ و باری اهمی و القایی را نشان می دهد. علاوه بر این، در این شکل، کار دو مبدل جریان I و II که مبدل جریان دو طرفه یک فاز را تشکیل می دهند، به صورت یکسو کننده یا اندولر مشخص شده است.

در کارکرد به صورت یکسو کننده، زاویه تأخیر آتش α می تواند تا صفر کاهش داده شود؛ در صورتی که در کارکرد به صورت اندولر، حد این زاویه $\alpha = 150^\circ$ است. با به کار بردن مبدلهای جریان دو طرفه با جریان گردشی، زاویه تأخیر آتش در مبدلی که به صورت یکسو کننده کار می کند، به خاطر مبدل دیگر که به صورت اندولر عمل می کند، در $\alpha = 30^\circ$ محدود می شود. این محدودیت α ، فشار الکتریکی قابل استفاده را کاهش و مصرف قدرت رثاکتیو را افزایش می دهد. از این رو مبدلهای جریان دو طرفه بدون جریان گردشی مناسب ترند. دوران کوتاهی که در طول آن جریان صفر می ماند، معمولاً اشکالی ایجاد نمی کند.

برای تعیین روند تغییرات جریان i ، در خروجی مبدل فرکانس مستقیم، باید از روابط کار واقعی مبدل جریان (به فصل هفتم مراجعه شود) استفاده کرد. جریان i ، روند تغییرات دوزنقه ای نسبتاً نامتقارنی دارد که نوساناتی با فرکانس $f_p/6$ بر آن اضافه شده است. این عدم تقارن به این جهت است که عبور از حالت یکسو کننده به اندولر در طول فشار الکتریکی با فرکانس f_p صورت می پذیرد، در صورتی که عبور از حالت اندولر به



شکل ۵-۱۱ کنترل دوزنقه‌ای با بار اهمی القایی.

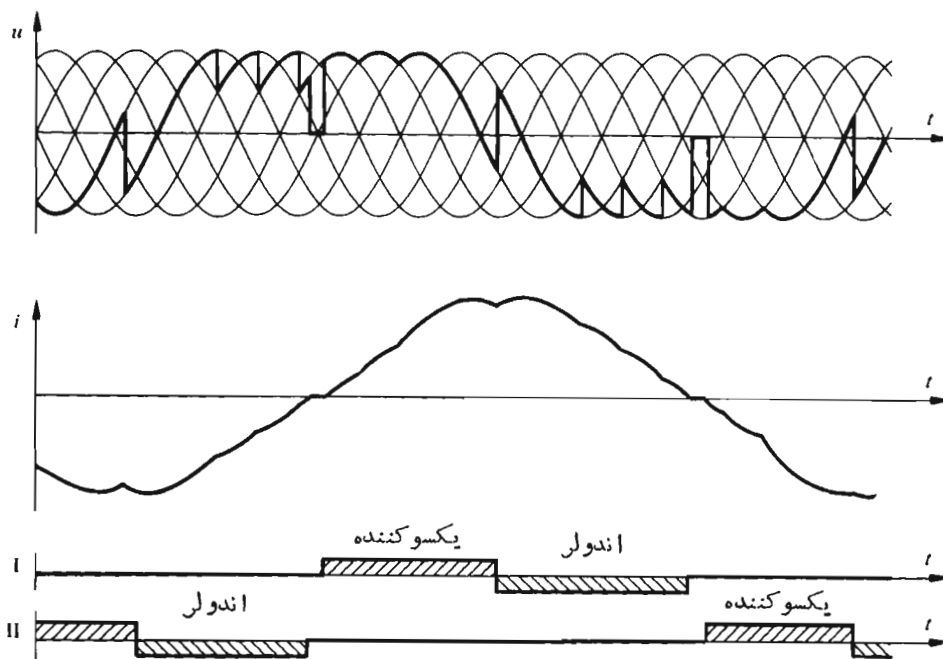
یکسو کننده، با صرف نظر کردن از دوران کوتاهی که در آن جریان صفر است، تقریباً آنی انجام می‌گیرد.

هنگام عبور از حالت یکسو کننده به اندولر، یک کموتاسیون میانجی با $\alpha = 90^\circ$ که در شکل ۵-۱۱ مشخص شده انجام می‌پذیرد. هرگاه نسبت f_p/f_v عدد صحیح نباشد، کموتاسیونهای میانجی غیر قابل اجتناب خواهند بود. این رفتار دینامیک (پویای) نامتقارن، مبدأ محدودیتی برای فرکانس ماگزیم در حدود $f_p/2 < f_v$ است.

چنانکه در شکل ۵-۱۱-۶ ملاحظه می‌شود، برای بار القایی خالص، جریان i روندی مثلثی پیدا می‌کند.

۵-۲-۱۱ کنترل سینوسی

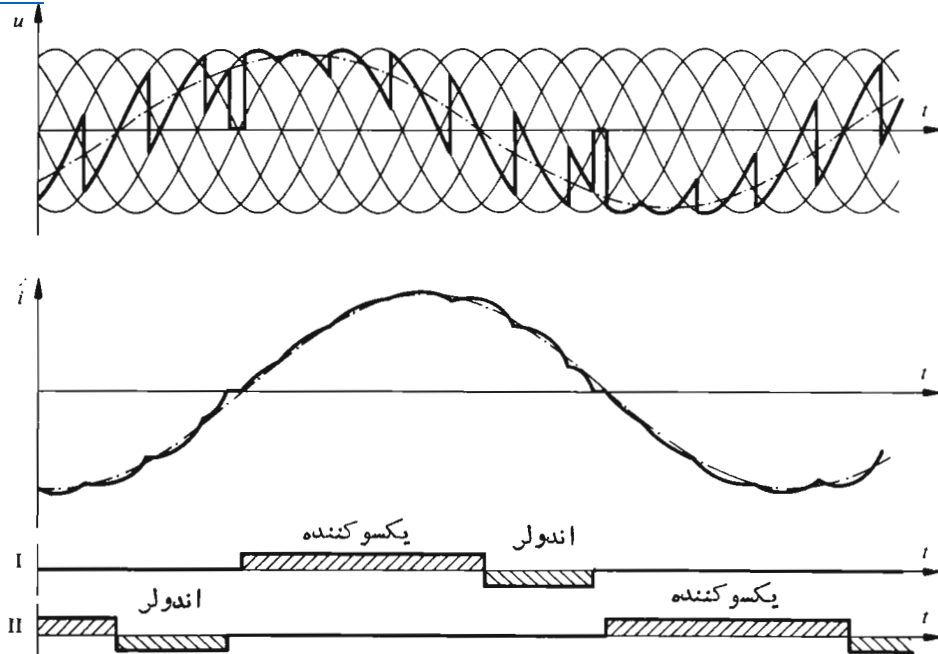
در حالت «کنترل سینوسی» مقدار متوسط لغزان فشار الکتریکی u به صورت تابعی سینوسی تغییر می‌کند. برای این منظور، زاویه تأخیر آتش α باید طوری تغییر داده شود تا فشار الکتریکی دایم $U_{di\alpha} = U_{dio} \cos \alpha$ از رابطه $u = \hat{U} \sin \omega_p t$ (مربوط به موج اصلی فشار الکتریکی خروجی u) تبعیت کند. دامنه \hat{U} و ضربان ω_p را می‌توان مستقل از یکدیگر تنظیم کرد. تغییرات جریان i خیلی نزدیک به سینوسی می‌شود و می‌توان به یک جریان سینوسی



شکل ۱۱-۶ کنترل دوزنقه‌ای با بار القایی خالص.

تقریباً ایدئال با فرکانس f رسید (به شکل ۱۱-۷ مراجعه شود). نسبت مدت زمانهای کار کرد به صورت یکسو کننده و به صورت اندولر بستگی به بار دارد. برای بارهای اهمی خالص، در هر نیم دوره، کار کرد تنها به صورت یکسو کننده است. برای بارهای القایی خالص، مبدل فرکانس مستقیم در نصف نیم دوره به صورت یکسو کننده و در نصف دیگر به صورت اندولر کار می کند.

چون زاویه تأخیر آتش بیشتر مثبت است ($\alpha > 0$)، مبدل فرکانس مستقیم، مصرف قدرت رثا کتیو نسبتاً بالایی دارد. از این نظر کنترل سینوسی نامناسبتر از کنترل دوزنقه‌ای است. در عوض کنترل سینوسی، کاهش دامنه موج اصلی را به سادگی امکان پذیر می سازد. کنترل سینوسی معمولاً از طریق تنظیم جریان، با تغییر دادن مقدار مقایسه‌ای i_c طبق رابطه $i_c = I \sin \omega_p t$ انجام می پذیرد. در این رابطه، دامنه I و ضربان ω_p موج اصلی جریان را می توان اعمال کرد. در مبدل فرکانس سه فاز، هریک از فازها باید به توسط مدار مجزایی تنظیم شود. در این صورت سه مقدار مقایسه‌ای، باید نسبت به هم دارای اختلاف فازی برابر 120° باشند.



شکل ۱۱-۷ کنترل سینوسی با بار اهمی و القایی.

۱۱-۳ مبدل فرکانس با مدار جریان دایم میانجی

۱۱-۳-۱ کلیات

مبدل‌های فرکانس با تبدیل مستقیم که در بند قبل تشریح شدند، این ویژگی را دارند که در آنها کموتاسیون به وسیله شبکه اولیه با فرکانس f تضمین می‌شود. همین شبکه تمامی قدرت رثاکتیو بار را نیز تأمین می‌کند. بار می‌تواند غیر فعال، یعنی، بدون سیستم فشارهای الکتریکی متناوب القا شده (تک‌فاز یا سه‌فاز) باشد.

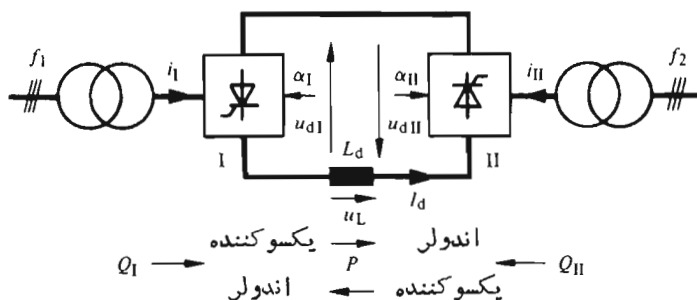
در عوض، مبدل‌های فرکانس با مدار جریان دایم میانجی به شبکه فعالی با فرکانس f_p ، جهت تضمین کموتاسیون و تأمین قدرت رثاکتیو مبدل جریان، احتیاج دارند. این نوع مبدل‌های فرکانس از دو مبدل جریان، که به‌طور زنجیره‌ای به هم متصل شده‌اند و یکی به صورت یکسو کننده و دیگری به صورت اندولر کار می‌کند، تشکیل می‌شوند.

۱۱-۳-۲ مدار

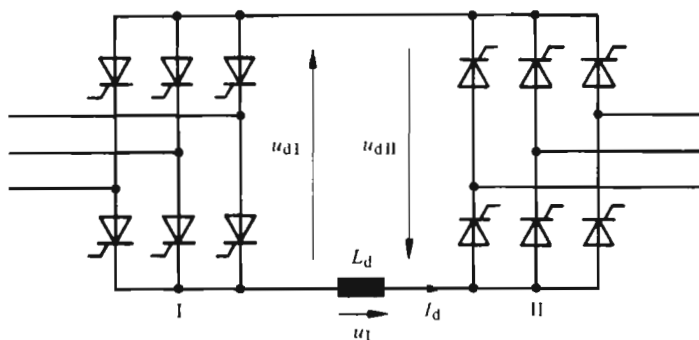
شکل ۱۱-۸ نمایشی طرح وار از یک مبدل فرکانس با مدار جریان دایم میانجی را نشان



می‌دهد. به عنوان مبدل جریان، هر یک از اتصالهای بیان شده در فصل پنجم قابل استفاده است، مع هذا متداولتر از همه اتصال پل سه فازه است. شکل ۹-۱۱ طرح واره تفصیلی مبدل فرکانسی متشکل از دو مبدل جریان با اتصال پل سه فازه را نشان می‌دهد. در این حالت، ترانسفورماتورها فقط برای تطبیق فشارهای الکتریکی دوشبکه یا برای جدا سازی الکتریکی بین دو شبکه با فرکانسهای f_1 و f_2 به کار می‌روند. ملاحظه می‌شود که مدار این مبدل فرکانس نسبتاً ساده است، زیرا تنها به ۱۲ تیرستور احتیاج دارد.



شکل ۹-۱۱ نمایش طرح واره یک مبدل فرکانس با مدار جریان دایم میانجی.

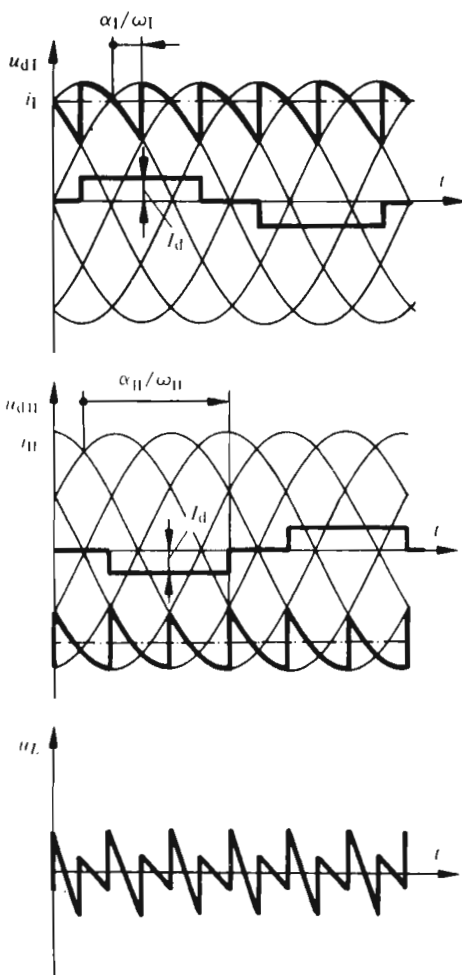


شکل ۹-۱۱ مبدل فرکانس با مدار جریان دایم میانجی، متشکل از دو مبدل جریان با اتصال پل سه فازه.

۳-۳-۱۱ کارکرد

مبدل جریان I فشار الکتریکی دایم u_{dI} را فراهم می‌سازد و معمولاً به صورت یکسو کننده کار می‌کند. جریان دایم I_d از مبدل جریان I به طرف مبدل جریان II که معمولاً به صورت اندولر کار می‌کند، جاری می‌شود. فشار الکتریکی بین دو سر مبدل جریان II، u_{dII} است و این مبدل به شبکه متناوبی با فرکانس f (عموماً متفاوت با f_1) وصل است.

اتصالات بین دو مبدل جریان، مداری میانجی با جریان دایم تشکیل می‌دهند. در این مدار یک پیچک القاگر L_d قرار گرفته است که برای صاف کردن جریان I_d به کار می‌رود. L_d در مطالعه کارکرد ابدال این مبدل فرکانس بینهایت فرض می‌شود. در این صورت جریان دایم در مدار میانجی کاملاً صاف خواهد بود.



شکل ۱۱-۱۰ کارکرد مبدل فرکانس با مدار میانجی، برای $f_1 = f_2$ و $\hat{U}_2 = \hat{U}_1$.

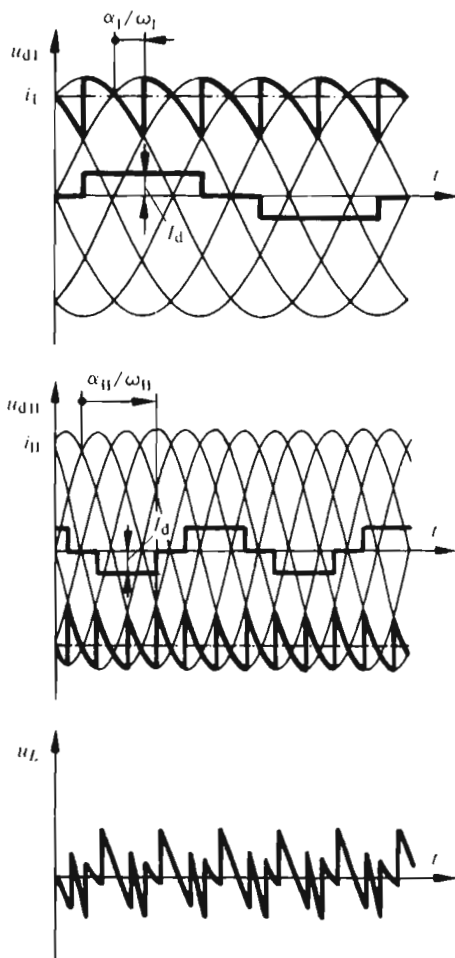
فشارالکتریکی بین دو سر القاگر L_d عبارت است از

$$u_L = u_{dI} + u_{dII} \quad (۲-۱۱)$$

با صرف نظر کردن از مقاومت اهمی، مقدار متوسط u_L باید برابر صفر بشود. در این صورت بین مقادیر متوسط u_{dI} و u_{dII} رابطه زیر برقرار است

$$U_{dI} = -U_{dII} \quad (۳-۱۱)$$

با استفاده از رابطه عمومی (۵-۱۲) می توان نوشت



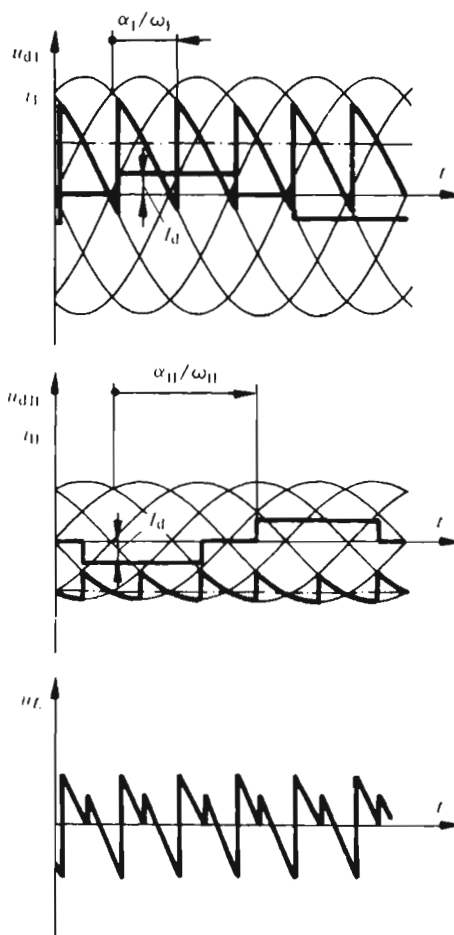
شکل ۱۱-۱۱ کارکرد مبدل فرکانس بامدارمیانی، برای $f_2 = 2f_1$ و $\hat{U}_2 = \hat{U}_1$.

$$U_{di\circ I} \cos \alpha_I = -U_{di\circ II} \cos \alpha_{II} \quad (۳-۱۱)$$

این رابطه شرط کنترل دو زاویه تأخیر آتش α_I و α_{II} را مشخص می‌سازد. معمولاً α_{II} را در حد کارکرد به صورت اندولر، ثابت نگه می‌دارند و α_I را چنان تنظیم می‌کنند تا شرط (۳-۱۱) برقرار باشد. فشارهای الکتریکی $U_{di\circ I}$ و $U_{di\circ II}$ به فشارهای الکتریکی متناوب دوشبکه با فرکانسهای f_1 و f_2 بستگی دارند.

رابطه (۳-۱۱) نشان می‌دهد که هرگاه مبدل جریان I به صورت یکسوکننده کار کند، مبدل جریان II باید به صورت اندولر باشد.

شکلهای ۱۰-۱۱ تا ۱۲-۱۱ روند تغییرات u_{dI} ، u_{dII} و u_L را برای سه حالت



شکل ۱۲-۱۱ کارکرد مبدل فرکانس یا مدار میانجی، برای $f_2 = f_1$ و $\hat{U}_2 = \hat{U}_1/2$.

نشان می‌دهند.

در شکل ۱۱-۱۰، دوشبکه متناوب، فرکانس و دامنه فشار الکتریکی یکسانی دارند ولی بین دوفشار الکتریکی اختلاف فاز وجود دارد. مبدل جریان II با $\alpha_{II} = 150^\circ$ کنترل شده است. در نتیجه، مبدل جریان I باید با زاویه تأخیر آتش $\alpha_I = 30^\circ$ تنظیم شود.

در شکل ۱۱-۱۱، فرکانس شبکه دوم $f_2 = 2f_1$ است در صورتی که دامنه‌های فشارهای الکتریکی متناوب باهم برابرند. در اینجا نیز $\alpha_{II} = 150^\circ$ و $\alpha_I = 30^\circ$ است. بالاخره شکل ۱۱-۱۲ حالتی را نشان می‌دهد که دوفراکانس f_1 و f_2 دوباره باهم برابرند ولی دامنه فشار الکتریکی متناوب شبکه دوم نصف دامنه فشار الکتریکی متناوب شبکه اول است. مبدل جریان II بازم با $\alpha_{II} = 150^\circ$ کنترل می‌شود. برای اینکه شرط (۱۱-۴) برقرار باشد، در اینجا باید زاویه تأخیر آتش α_I برابر 30° انتخاب گردد. در شکل‌های ۱۱-۱۰ تا ۱۱-۱۲ جریان‌های i_I و i_{II} ، در یک فاز از دوشبکه متناوب، نیز نشان داده شده‌اند. این جریانه‌ها، هم در شبکه اول و هم در شبکه دوم، روند تغییرات مستطیلی دارند و دارای مقدار ماکزیممی برابر جریان دائم I_d ، در مدار میانجی هستند.

۱۱-۳-۴ قدرتهای اکتیو و رثاکتیو

مطابق شکل ۱۱-۸، قدرت اکتیو P معمولاً از شبکه متناوب با فرکانس f_1 و از طریق مدار میانجی با جریان دائم به شبکه متناوب با فرکانس f_2 عبور می‌کند. شبکه اول (با فرکانس f_1) قدرت رثاکتیو Q_I مبدل جریان I را، مطابق زاویه تأخیر آتش α_I (به بند ۴-۹ مراجعه شود)، تأمین می‌کند. در صورتی که قدرت رثاکتیو Q_{II} در ارتباط با α_{II} ، از طریق شبکه متناوب با فرکانس f_2 تأمین می‌شود. اگر پدیده تداخل در نظر گرفته شود، دوشبکه متناوب باید قدرت رثاکتیو لازم برای کموتاسیون را نیز تأمین کنند.

برای اینکه قدرت اکتیو از شبکه با فرکانس f_2 به طرف شبکه با فرکانس f_1 عبور داده شود، باید فشارهای الکتریکی دائم u_{dI} و u_{dII} معکوس شوند. به عبارت دیگر، در این حالت باید مبدل جریان II به صورت یکسو کننده و مبدل جریان I به صورت اندولر کار کنند. به دلیل جهت هدایت مبدل‌های جریان معمولی (به شکل ۱۱-۸ مراجعه شود)، جریان دائم I_d در مدار میانجی جهت خود را حفظ می‌کند ولی نمی‌تواند تغییر علامت بدهد. در این حالت نیز، هر یک از شبکه‌ها باید قدرتهای رثاکتیو Q_I و Q_{II} مربوط به مبدل‌های جریان خود را تأمین کنند.

۱۱-۳-۵ ملاحظات در باره کاربرد مبدل‌های جریان با مدار جریان دائم میانجی

چنانکه قبلاً در بند ۱۱-۱-۲ بیان شد، مبدل فرکانس با مدار جریان دائم میانجی برای

تغذیه ماشینهای سنکرون ویا برای اتصال قابل انعطاف بین دوشبکه متناوب به کار می‌رود. در حالت تغذیه موتور سنکرون، این موتور به منزله شبکه با فرکانس f است و مانند منبع فشار الکتریکی سه فاز، قادر است تا قدرت رثاکتیو Q_{II} مورد نیاز را تأمین کند. فرکانس f ، که با سرعت موتور سنکرون متناسب است، می‌تواند در دامنه نسبتاً وسیعی تغییر کند. عموماً، خود فشار الکتریکی متناوب نیز متناسب با فرکانس f است (به شکل‌های ۱۱-۱۱ و ۱۲-۱۱ مراجعه شود). حد بالایی فرکانس f از طریق ساختمان موتور سنکرون اعمال می‌شود و معمولاً بین ۵۰ و ۱۰۰ هرتز یا حتی بیشتر است. حد پایینی در حدود چندین هرتز است. زیرا فشار الکتریکی متناوب خیلی پایین، قادر به تضمین کموتاسیون جریان نیست. در هر حال، راه اندازی این موتورها همراه با مشکلات است و به وسیله این نوع مبدل فرکانس امکان پذیر نیست، زیرا در حالت سکون فشار الکتریکی موتور صفر است، از این رو باید از وسایل راه اندازی کمکی استفاده شود.

تغذیه موتور آسنکرون با این نوع مبدل فرکانس، به علت اینکه این موتور دارای منبع فشار الکتریکی متناوب نیست و نمی‌تواند قدرت رثاکتیو مورد لزوم برای کار مبدل جریان II را تأمین کند، امکان پذیر نیست.

اتصال قابل انعطاف بین دوشبکه، اصولاً در زمینه انتقال انرژی تحت فشار الکتریکی دایم بالا به کار برده می‌شود. دوشبکه متناوب معمولاً فرکانس اسمی یکسان دارند (۵۰ یا ۶۰ هرتز) ولی بایکدیگر همزمان نیستند (اتصال قابل انعطاف). هر شبکه يك یا چند نیروگاه دارد و مولدهای سنکرون آنها فشارهای الکتریکی و قدرتهای رثاکتیو Q_I و Q_{II} مبدل‌های جریان را تأمین می‌کنند. مدار میانجی با جریان دایم از خط انتقال با فشار الکتریکی دایم بالا تشکیل می‌شود که طولش اغلب به چندین صد کیلومتر می‌رسد. خازن این خط معمولاً قابل اغماض نیست و از هر تغییر سریع فشار الکتریکی دایم جلوگیری می‌کند، در نتیجه هر گونه تعویض سریع در جهت قدرت اکتیو رد و بدل شده غیر ممکن است.

۱۱-۴ مبدل‌های فرکانس با بار نوسانگر

۱۱-۴-۱ کلیات

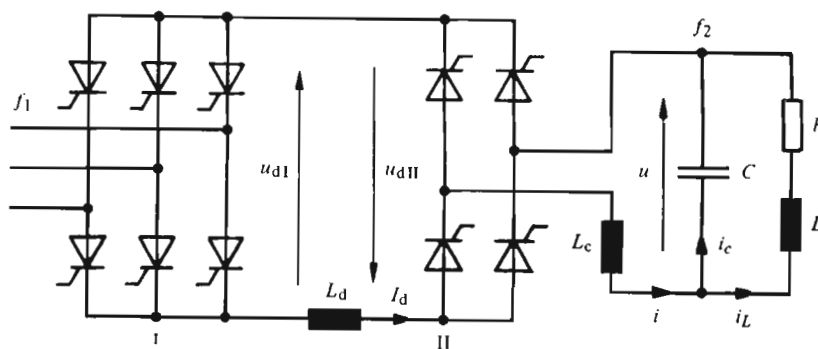
يك حالت حدی بین کموتاسیون طبیعی و کموتاسیون اجباری در «مبدل‌های فرکانس با بار نوسانگر» مطرح می‌شود. این مبدل‌های فرکانس نیز دارای يك مدار میانجی با جریان با فشار الکتریکی دایم هستند. بار طبیعت غیر فعال دارد و فاقد منابع فشارهای الکتریکی متناوب است. بار اهمی و القایی به وسیله خازنی تکمیل شده است تا يك مدار نوسانگر تشکیل بدهد. این خازن، کموتاسیون مبدل جریان دوم را تضمین می‌کند.

دو نوع مبدل فرکانس با بار نوسانگر موازی یا متوالی، از هم تمیز داده می‌شوند. چنانکه قبلاً در بند ۱۱-۲ اشاره شد، این مبدل‌ها اساساً برای تغذیه تأسیسات گرم-

کننده القاایی با فرکانس متوسط به کار می روند. فرکانس f_2 بین 500Hz و 25kHz قرار دارد.

۱۱-۴-۲ مبدل های فرکانس با بار نوسانگر موازی

مدار مبدل فرکانس با بار نوسانگر موازی در شکل ۱۱-۱۳ نشان داده شده است. خازن C با بار اهمی و القاایی (R و L) به طور موازی قرار دارد و یک مدار نوسانگر موازی تشکیل می دهد.



شکل ۱۱-۱۳ مبدل فرکانس با بار نوسانگر موازی.

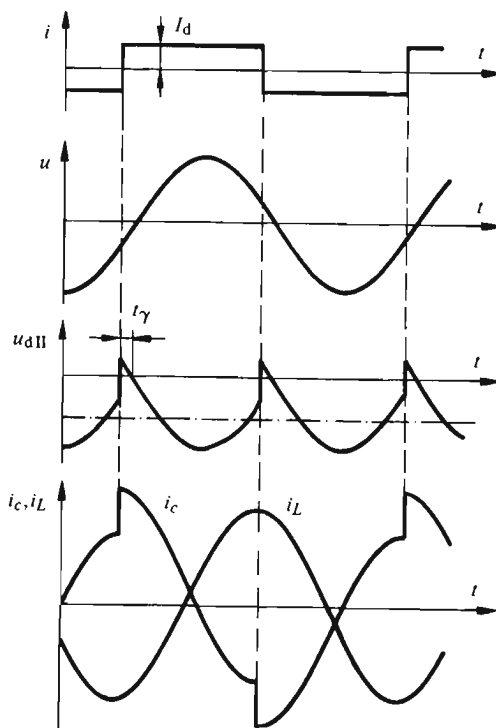
مبدل جریان I، یک پل سه فاز است و به صورت یکسو کننده کار می کند. به جهت تک فاز بودن بار، مبدل جریان II یک پل تک فاز است و به صورت اندولر کار می کند. در مدار میانجی با جریان دایم پیچکی با القاگری L_d قرار گرفته است. برای بررسی کارکرد ایدئال، این القاگری بینهایت بزرگ فرض خواهد شد. القاگری L_c متوالی با بار نوسانگر، با محدود کردن di/dt تیرستورها، کموتاسیون جریان i را در پل تک فاز تضمین می کند. برای بررسی کارکرد ایدئال، $L_c = 0$ در نظر گرفته می شود.

۱۱-۴-۳ کارکرد

کارکرد مبدل فرکانس با بار نوسانگر در شکل ۱۱-۱۴ نشان داده شده است. با صرف نظر کردن از پدیده کموتاسیون ($L_c = 0$)، جریان I_d که کاملاً صاف فرض می شود جریان متناوب i را با روند تغییرات مستطیلی پدید می آورد. تعویض علامت جریان i ، در اثر روشن شدن تناوبی تیرستورهای پل تک فاز است. جریان متناوب i مدار نوسانگر را تحریک

می‌کند و به شرط اینکه میرایی^۱ ضعیف باشد (مقاومت R کوچک)، فشار الکتریکی u در دوسرمدارنوسانگر تقریباً سینوسی خواهد بود. این فشار الکتریکی قادر است کموتاسیون مبدل جریان II را تضمین کند. فشار الکتریکی داریم u_{dII} در طول زمان t_γ ، مربوط به زاویه خاموش شدن γ ، مثبت است. زمان t_γ باید به اندازه کافی بلند باشد تا قطع شدن مطمئن تیرستورها تضمین شود (فشار الکتریکی u_{dII} نظیر فشار الکتریکی منفی بین آند و کاتد تیرستورهاست). زمان t_γ باید از زمان خاموش شدن تیرستورها (t_q) بیشتر باشد. این فاصله زمانی (t_γ) از اختلاف فاز کوچکی بین عبور از صفر فشار الکتریکی u و جریان i به دست می‌آید.

جریان i_L در بار اهمی و القایی عملاً سینوسی است و مقدار اوج آن به علت افزودگی تشدید، از مقدار اوج i بیشتر است. جریانی که از خازن C می‌گذرد از رابطه $i_c = i - i_L$ به دست می‌آید.



شکل ۱۱-۱۶ کارکرد مبدل فرکانس با بار نوسانگر موازی.

فرکانس f_r از ضربان تشدیدمدار نوسانگر تعیین می‌شود. این ضربان تقریباً برابر است با

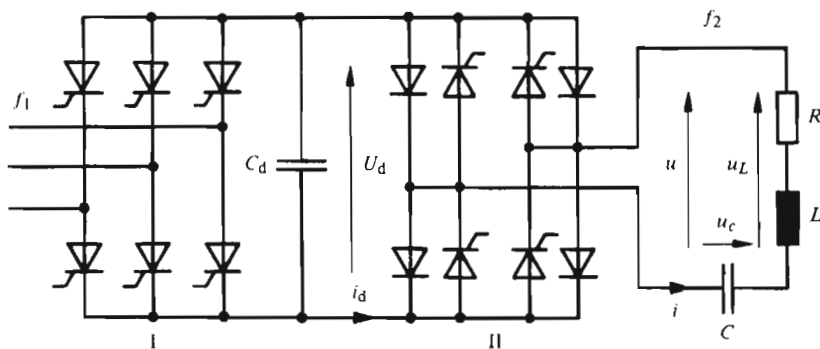
1) Amortissement

$$\omega_o = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad (5-11)$$

به علت میرایی ناشی از مقاومت اهمی R ، فرکانس کار باید کمی بیشتر از $\omega_o = 2\pi f_o$ انتخاب شود. اگر بار، کوره ای القایی باشد، مقادیر R و L و در نتیجه ω_o در طول گرم شدن تغییر می کنند. بنابراین لازم است فرکانس f_p با این تغییرات تطبیق داده شود.

۴-۴-۱۱ مبدل های فرکانس با بار نوسانگر متوالی

در حالت مبدل فرکانس با بار نوسانگر متوالی که مدار آن در شکل ۱۵-۱۱ نشان داده شده است، شرایطی مختلف وجود دارد. در اینجا خازن C با بار اهمی و القایی (L و R)، متوالی بسته شده است.



شکل ۱۵-۱۱ مبدل فرکانس با بار نوسانگر متوالی.

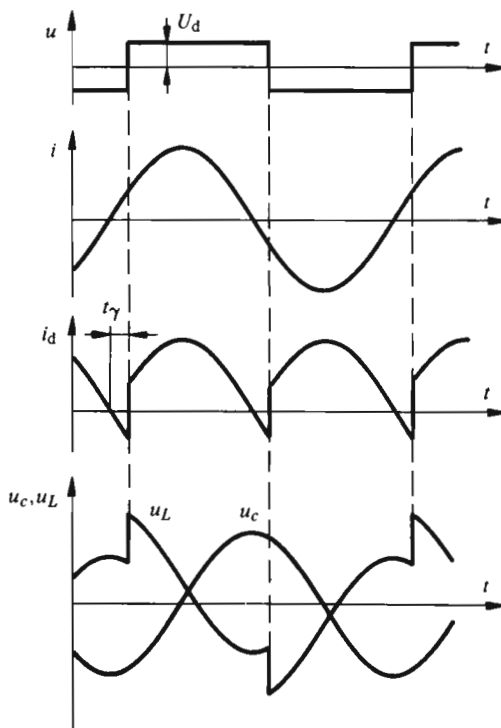
مبدل جریان I که به صورت یکسو کننده کار می کند، با اتصال پل سه فازه است. مبدل جریان II که نقش اندولر برعهده دارد، اتصالی به صورت پل تک فازه دارد و به هر یک از تیرستورهایش دیودی به صورت موازی معکوس بسته شده است. کار این دیودها در جای دیگر تشریح خواهد شد.

مدار میانجی در اینجا یک خازن C_h است. این خازن باید فشار الکتریکی دایم U_h را صاف کند. در بررسی کارکرد ایدئال، ظرفیت C_h بینهایت فرض خواهد شد تا فشار الکتریکی U_h کاملاً صاف باشد. در این حالت مدار میانجی با فشار الکتریکی دایم است.

۴-۴-۱۱ کارکرد

کارکرد مبدل فرکانس با بار نوسانگر متوالی در شکل ۱۶-۱۱ نشان داده شده است. فشار

الکتریکی u در خروجی پل تک‌فازه روند مستطیلی دارد که ناشی از فشار الکتریکی دایم و کاملاً صاف U_d و روشن شدن تناوبی تیرستورهای آن است. فشار الکتریکی متناوب u مدار نوسانگر متوالی را تحریک می‌کند. چون معمولاً میرایی ضعیف است، جریان i تقریباً سینوسی است. این جریان نسبت به موج اصلی فشار الکتریکی u اندکی پیش فاز دارد.



شکل ۱۱-۱۶ کارکرد مبدل فرکانس با بار نوسانگر متوالی.

جریان i_d که از مدار میانجی می‌گذرد شدیداً متوجی است. در فاصله زمانی t_γ این جریان منفی است و نمی‌تواند از طریق مبدل جریان I بگذرد، بلکه به توسط خازن C تأمین می‌شود و از طریق دو دیود از مبدل جریان II عبور می‌کند. وجود این دیودها که برای تضمین کموتاسیون جریان در پل II الزامی است، چنانکه در فصل‌های ۱۲ تا ۱۵ تشریح خواهد شد، از ویژگی‌های اصلی کموتاسیون اجباری است. زمان t_γ باید به اندازه کافی طولانی باشد تا قطع تیرستورها تضمین شود ($t_\gamma > t_q$). طی دوران t_γ ، بین آنسد و کاتسد تیرستورها، فشار الکتریکی منفی کوچکی مساوی فشار الکتریکی مستقیم دیودهایی که

جریان i را هدایت می کنند، وجود دارد.

فشار الکتریکی u_c در دوسرخازن C عملاً سینوسی است در صورتی که فشار الکتریکی u_L در دوسر باراهمی و القایی از رابطه $u_c - u$ به دست می آید. به سبب افزودگی تشدید، مقدار اوج u_L از مقدار اوج فشار الکتریکی u بیشتر است. در اینجا نیز فرکانس f به وسیله ضربان تشدید ω مدار نوسانگر و بنا به رابطه (۵-۱۱) مشخص می شود. در مبدل جریان II، پس از عبور از صفر جریان i قبل از روشن شدن تیرستورهای دیگر، باید زمان t_p افزایش یابد. فرکانس کار f در حالت مدار نوسانگر متوالی باید کمی از فرکانس $\omega_0 / 2\pi$ کمتر باشد. کنترل این نوع مبدل فرکانس نسبتاً ساده است. برای این منظور کافی است عبور از صفر جریان i مشخص و روشن شدن تیرستورها به اندازه t_p نسبت به آن تأخیر داده شود. بدین ترتیب فرکانس، خود به خود با هر تغییر L و R ، ناشی از گرم شدن کوره القایی تطبیق می یابد.

فصل دوازدهم

تغییر دهنده (برشگر) های جریان دایم

کارکرد ایدئال

۱-۱۲ مقدمه

۱-۱۲-۱ کلیات

تغییردهنده (برشگر) های جریان دایم، که تغییر مقدار متوسط فشارهای الکتریکی دایم را امکان پذیر می سازند، از کموتاسیون اجباری استفاده می کنند. اصول کموتاسیون اجباری تقریباً از سال ۱۹۳۵ شناخته شده است. در آن موقع ساخت دستگاههای با کموتاسیون اجباری بسیار محدود بود زیرا، یکسوکننده های با بخارجیوه زمان خاموش شدن خیلی طولانی داشتند. به دنبال پیدایش تیرستورها، مخصوصاً تیرستورهای از نوع سریع و تجهیزات تنظیم و فرمان ترانزیستوری، این فن توسعه بسیار سریعی یافت و انواع گوناگون مدارهای مربوط به آن ساخته شدند. این تحول هنوز هم ادامه دارد. چون در چهارچوب این فصل تشریح تمامی این انواع امکان پذیر نیست، به بررسی بنیادی ترین و مهمترین آنها اکتفا خواهد شد.

بنا بر شکل ۲-۱۳، مبدل های ایستای با کموتاسیون اجباری به کنتاکتورهای جریان دایم، تغییر دهنده (برشگر) های جریان دایم، اندولرها و مبدل های فرکانس تقسیم بندی می شوند.

چون کنتاکتورهای جریان دایم را می توان حالت خاص کارکرد تغییردهنده (برشگر) جریان دایم دانست، این کنتاکتورها جداگانه بررسی نخواهند شد. فصل های ۱۲ و ۱۳

به تغییردهنده (برشگر) های جریان دایم اختصاص خواهند یافت. این دستگاههای نسبتاً ساده به بررسی پدیده کموتاسیون اجباری کمک می کنند.

اندولرها و مبدل‌های فرکانس با کموتاسیون اجباری در فصل‌های ۱۴ تا ۱۶ بررسی خواهند شد.

۱۲-۱-۲ کاربردهای تغییردهنده (برشگر) های جریان دایم

تغییردهنده (برشگر) جریان دایم در زمینه حمل و نقل الکتریکی بسیار متداول است، به عنوان مثال می توان از وسایل حمل و نقل برای راه آهن، تراموای، اتوبوسهای الکتریکی و خودروهای باتری دار (لوکوموتیوهای معدن، ارا به های شاخه دار، اتومبیل‌های الکتریکی) نام برد. این دستگاه، تغذیه موتورهای جریان دایم را با فشار الکتریکی دایم متغیری، که از منبع فشار الکتریکی دایم ثابتی حاصل می شود، امکان پذیر می سازد.

شکل ۱۲-۱، این کاربردهای مختلف را با مقادیر اسمی فشار الکتریکی، جریان و قدرت دایم آنها به طور طرح وار نشان می دهد.

۱۲-۱-۳ فرضهای بررسی کارکرد ایدئال

برای مطالعه کارکرد ایدئال تغییردهنده (برشگر) های جریان دایم در حالت پایا، در این فصل فرضهای زیر در نظر گرفته می شوند

– القاگری L بار با جریان دایم (به شکل ۵-۲ مراجعه شود) بینهایت است

$$L = \infty \quad (12-1)$$

– مدت زمان کموتاسیون اجباری (به شکل ۲-۴ مراجعه شود) صفر است

$$t_c = 0 \quad (12-2)$$

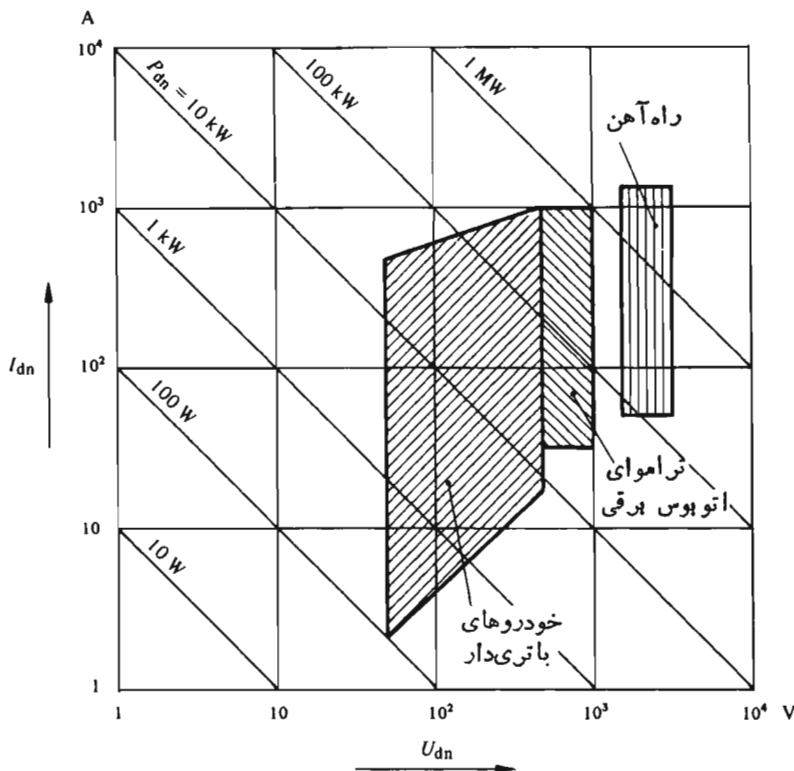
بنابر فرض $L = \infty$ ، جریان دایم جاری در بار، کاملاً صاف و در نتیجه نسبت به زمان ثابت است. این فرض در بند ۱۲-۶ که در آن موج جریان دایم بررسی خواهد شد، کنار گذاشته می شود.

فرض دوم ($t_c = 0$) به کنتاکتور ایدئالی که می تواند به طور لحظه ای قطع شود مربوط است. بنا بر این، پدیده کموتاسیون اجباری مورد بررسی قرار نمی گیرد.

۱۲-۲ تغییردهنده (برشگر) ضربانی جریان دایم

۱۲-۲-۱ کلیات

برای تغییر دادن جریان دایم حاصل از یک منبع با فشار الکتریکی ثابت، باید از اصل



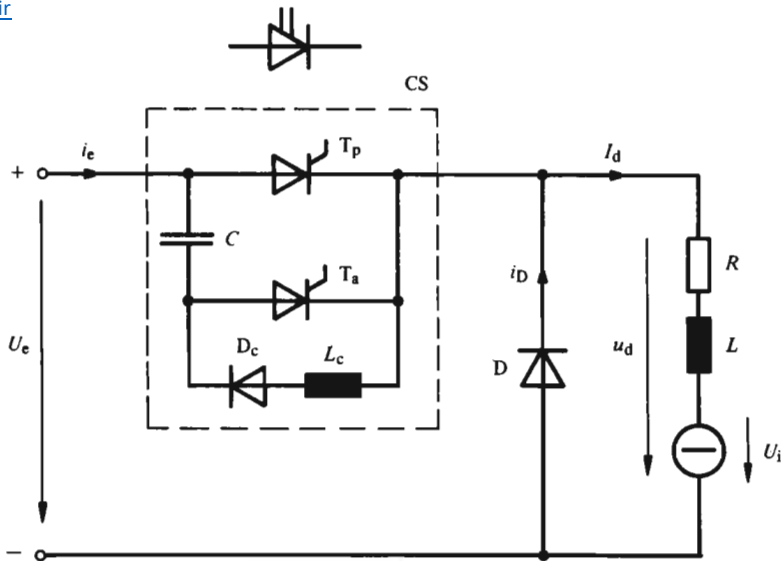
شکل ۱-۱۲ کاربردهای تغییر دهنده (برشگر) های جریان دایم.

«برشگر»^۱، یعنی قطع و وصل کننده تناوبی بار استفاده کرد. این امر به کمک «تغییر دهنده (برشگر) ضربانی جریان دایم» امکان پذیر است. وصل جریان دایم به وسیله تیرستورها با هیچ گونه مشکلی مواجه نیست. اما برای قطع (خاموش کردن تیرستورها)، وسایلی اضافی که کموتاسیون اجباری جریان دایم را ممکن سازند، لازم است. پدیده های مربوط به آن در فصل ۱۳ مورد بررسی قرار خواهند گرفت.

۲-۲-۱۲ مدار

مدار تغییر دهنده ضربانی جریان دایم در شکل ۲-۱۲ نشان داده شده است.

1) Hacheur



شکل ۲-۱۲ مدار تغییر دهنده (برشگر) ضربانی جریان دایم.

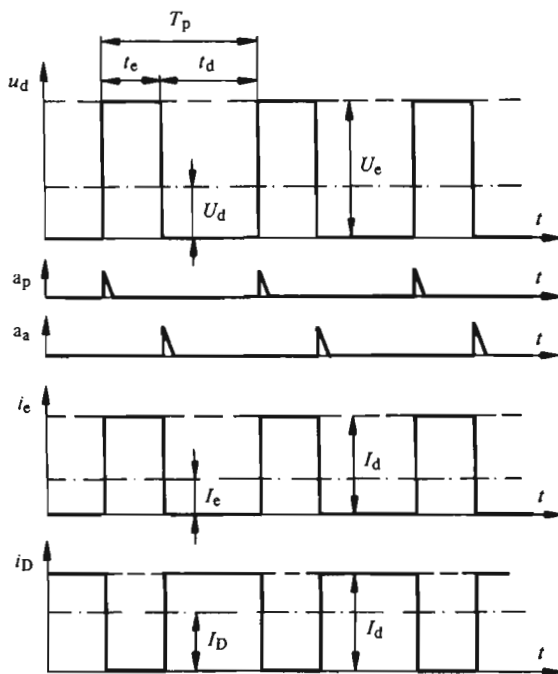
تیرستور اصلی T_p ، تیرستور کمکی T_a ، دیود D_c ، خازن C و القاگر L_c وسیله‌ای را می‌سازند که قادر است جریان دایم را قطع و وصل کند. این مدار را کنتاکتور ایستا (CS) می‌نامند.

اعمال تپی روشن کننده برچکاننده تیرستور اصلی T_p ، کنتاکتور را وصل می‌کند، در صورتی که تپی که برچکاننده تیرستور کمکی T_a اعمال شود به قطع آن می‌انجامد. در فصل سیزدهم کارکرد دستگاه‌های با کموتاسیون اجباری به تفصیل بررسی خواهد شد. خازن C ، تیرستور کمکی T_a دیود D_c و القاگر L_c «مدار خاموش کننده» کنتاکتور ایستا را تشکیل می‌دهند.

در طرح واره‌های مدارها، برای سادگی، می‌توان کنتاکتور ایستا را با نشانه تیرستوری با دو ورودی کنترل یکی برای وصل و دیگری برای قطع، نشان داد (به شکل ۲-۱۲ مراجعه شود).

علاوه بر این، مدار برشگر ضربانی جریان دایم دارای دیودی (D) است که به طور موازی معکوس با بار سوار شده است. بار از منبع فشار الکتریکی داخلی U_i ، مقاومت R و القاگری L تشکیل می‌شود (به عنوان مثال موتور جریان دایم). چنانکه قبلاً نیز اشاره شد، القاگری L خیلی بزرگ فرض می‌شود (به طور نظری $L = \infty$) تا صاف بودن جریان دایم I_d را تضمین کند.

اساس کار در شکل ۱۲-۳ نشان داده شده است.



شکل ۱۲-۳ کارکرد برشگر ضربانی جریان دایم.

موقعی که کنتاکتور ایستای CS با تأثیر تپ روشن کننده a_p برچکاننده تیرستور اصلی وصل شود، فشار الکتریکی دایم u_d در خروجی برشگر جریان دایم برابر فشار الکتریکی ورودی U_e و جریان ورودی i_e همان جریان دایم I_d گذرنده از بار است. چون فشار الکتریکی $u_d = U_e$ با علامت منفی، بین آند و کاتد دیود D اثر می کند، این دیود قطع و $i_D = 0$ است.

هر گاه با تأثیر تپ روشن کننده a_a بر تیرستور T_a ، کنتاکتور ایستاق قطع شود، جریان i_e صفر می شود. جریان دایم I_d بار در این صورت از طریق دیود D عبور می کند یعنی $i_D = I_d$ است. با عبور جریان از دیود، فشار الکتریکی دایم u_d در دو سر بار صفر می شود (به طور دقیقتر، به اندازه فشار الکتریکی مستقیم دیود D، منفی می شود).

جریان دایم I_d به تناوب از کنتاکتور ایستای CS به دیود و برعکس منتقل می شود. این پدیده به طور عمیق تر در فصل سیزدهم بررسی خواهد شد.



اگر مطابق شکل ۱۲-۳ «مدت زمان وصل» و «مدت زمان قطع» کنتاکتور ایستای CS به ترتیب t_e و t_d باشد، مقادیر متوسط فشار الکتریکی دایم در دو سر بار، جریان ورودی و جریان دیود به ترتیب از روابط زیر به دست می آیند

$$U_d = \frac{t_e}{t_e + t_d} U_e \quad (۳-۱۲)$$

$$I_e = \frac{t_e}{t_e + t_d} I_d \quad (۴-۱۲)$$

$$I_D = \frac{t_d}{t_e + t_d} I_d \quad (۵-۱۲)$$

از معادله های (۳-۱۲) و (۴-۱۲) نتیجه می شود

$$\frac{U_d}{U_e} = \frac{I_e}{I_d} \quad (۶-۱۲)$$

یا

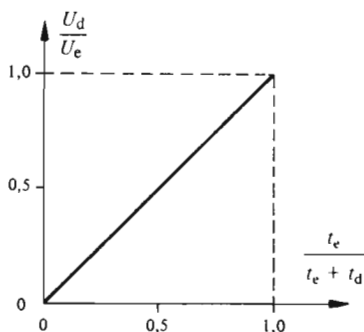
$$U_d I_d = U_e I_e \quad (۷-۱۲)$$

به عبارت دیگر، قدرت جذب شده به توسط بار برابر قدرت ورودی تغییر دهنده (برشگر) جریان دایم است. این رابطه تلفات کموتاسیون در کنتاکتور ایستا را در نظر نمی گیرد. این تلفات معمولاً خیلی کوچک و قابل اغماض اند.

در ورودی، فشار الکتریکی U_e ثابت و جریان i_e مستطیلی است، در صورتی که در خروجی، جریان I_d ثابت و فشار الکتریکی u_d مستطیلی است. جریان ورودی i_e نمی تواند به سرعت تغییر نماید مگر اینکه منبع فشار الکتریکی U_e دارای القاگری داخلی نباشد (مانند باتری). مسائلی که در صورت عدم برقراری این شرط مطرح می شوند، در بند ۱۲-۵ مورد بحث قرار خواهند گرفت.

۱۲-۲-۴ مشخصه ایدئال

با تغییر نسبت وصل $t_e/(t_e + t_d)$ می توان فشار الکتریکی دایم U_d را در دو سر بار تغییر داد. بنا بر معادله (۳-۱۲) این تغییرات رابطه ای خطی است که به صورت مشخصه ایدئال در شکل ۱۲-۴ نشان داده شده و مستقل از جریان دایم I_d است.



شکل ۴-۱۲ مشخصه ایدئال برشگر جریان داریم.

۵-۳-۱۲ شرایط کار

بین مقادیر متوسط فشار الکتریکی و جریان داریم بار، رابطه زیر به دست می آید

$$I_d = \frac{U_d - U_i}{R} \quad (۸-۱۲)$$

به لحاظ جهت های هدایت کنتاکتور ایستای CS و دیود D، جریان I_d باید مثبت باشد، که خود مستلزم شرط $U_d > U_i$ است. علاوه بر این یادآور می شود که $0 \leq U_d \leq U_e$ است.

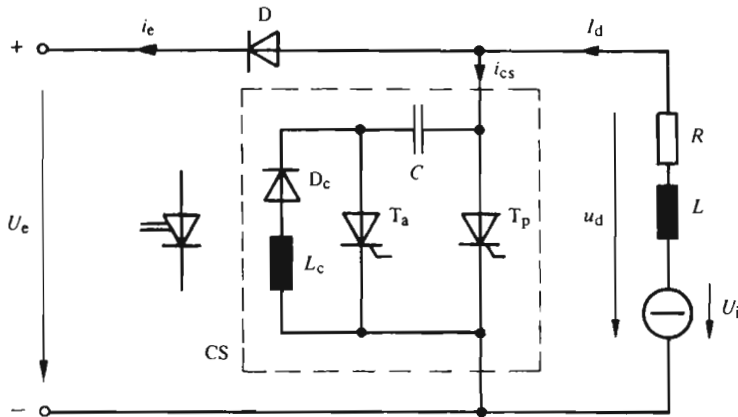
۳-۱۲ بازپس گیری در برشگر ضربانی جریان داریم

۱-۳-۱۲ کلیات

در مدار شکل ۲-۱۲ قدرت اکتیو از ورودی (فشار الکتریکی U_e) به طرف بار با جریان داریم عبور می کند. اگر بخواهیم، به عنوان مثال برای ترمز کردن موتور جریان داریم، جهت قدرت اکتیو و در نتیجه جهت جریان داریم I_d را عوض کنیم، باید مداری مطابق شکل ۵-۱۲ به کار ببریم. در مقایسه با مدار شکل ۲-۱۲، در این مدار کنتاکتور ایستای CS و دیود D جای خود را عوض کرده اند. این مدار امکان می دهد تا، در هنگام ترمز کردن وسایل حمل و نقل، انرژی باز پس گرفته شود.

۲-۳-۱۲ کارکرد

برای مطالعه کارکرد این مدار با بازپس گیری انرژی، از شکل ۶-۱۲ کمک می گیریم.



شکل ۵-۱۲ برشگر ضربانی جریان دایم با امکان بازپس‌گیری (ترمزگیری مفید).

در مدت زمان وصل کنتاکتور ایستا (t_e) فشار الکتریکی U_d صفر است. دیود نیز قطع است و از اتصال کوتاه ورودی (فشار الکتریکی U_e) جلوگیری می‌کند. جریان دایم I_d از طریق بار و کنتاکتور ایستای CS عبور می‌کند. هرگاه کنتاکتور ایستا قطع شود، فشار الکتریکی U_d برابر U_e می‌شود و جریان I_d با عبور از طریق دیود D، انرژی را به طرف منبع تغذیه بازپس می‌گرداند. در این حالت مقدار متوسط فشار الکتریکی دایم U_d در دو سر بار از رابطه زیر به دست می‌آید

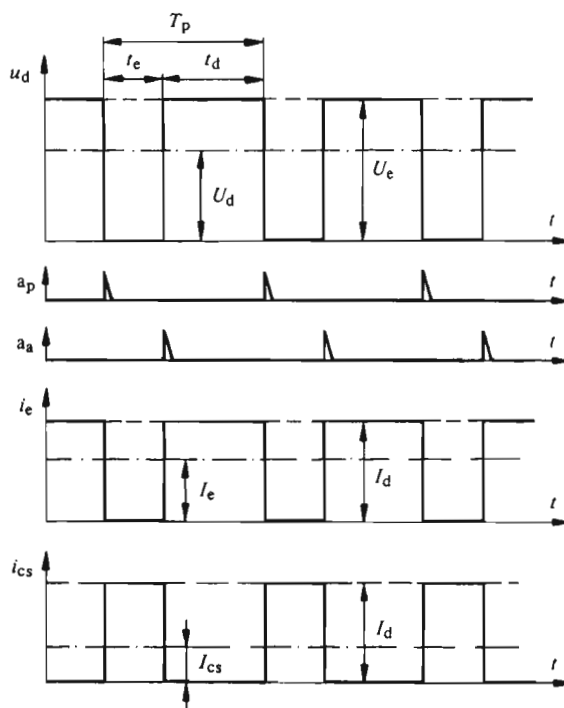
$$U_d = \frac{t_d}{t_e + t_d} U_e = \left(1 - \frac{t_e}{t_e + t_d}\right) U_e \quad (۹-۱۲)$$

برای مقدار متوسط جریان ورودی I_e که با جریان جاری در دیود D برابر است، می‌توان نوشت

$$I_e = \frac{t_d}{t_e + t_d} I_d \quad (۱۰-۱۲)$$

و بالاخره مقدار متوسط جریان I_{cs} در کنتاکتور ایستای CS عبارت است از

$$I_{cs} = \frac{t_e}{t_e + t_d} I_d \quad (۱۱-۱۲)$$



شکل ۱۲-۶ کارکرد برشگر ضربانی جریان دایم در مداری با امکان بازپس گیری.

در این حالت نیز رابطه (۱۲-۷) مربوط به تساوی قدرتها معتبر است. با این تفاوت که در این حالت بار باید اکتیو باشد و به منبع تغذیه، قدرت بدهد.

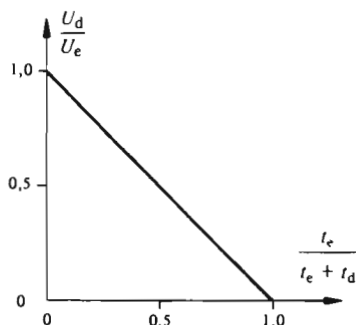
۱۲-۳-۳ مشخصه ایدئال

مطابق معادله (۱۲-۹) در این حالت نیز، مقدار متوسط فشار الکتریکی دایم در دو سر بار (U_h)، به نسبت وصل $t_e/(t_e+t_d)$ بستگی دارد. شکل ۱۲-۷، این مشخصه ایدئال خطی را نشان می دهد. اگر مدت زمان وصل t_e صفر باشد، فشار الکتریکی دایم U_h ما گزیمم (بیشینه) و برابر فشار الکتریکی U_h است. اگر برعکس مدت زمان قطع t_d صفر باشد، فشار الکتریکی دایم U_h نیز صفر می شود.

۱۲-۳-۴ شرایط کار

با شرط $U_i > U_h$ ، رابطه زیر برای بار برقرار است

$$I_d = \frac{U_i - U_d}{R} \quad (12-12)$$



شکل ۱۲-۷ مشخصه ایدئال برشگر جریان دایم در مداری با امکان بازپس‌گیری.

باید در نظر داشت که شرط $0 \leq U_d \leq U_e$ بازهم برقرار است. به سبب ذخیره شدن انرژی در القاگری L بار، عبور قدرت اکتیو به طرف ورودی، با اینکه فشار الکتریکی U_e ورودی از مقدار متوسط فشار الکتریکی U_d بیشتر است امکان دارد. بدین ترتیب انجام ترمزگیری مفید (بازپس‌گیری انرژی) موتورهای جریان دایم تا سرعت‌های خیلی پایین (در حالت ایدئال تا حالت توقف) امکان‌پذیر است.

۱۲-۴ کموتاسیون ضربانی مقاومت

۱۲-۴-۱ کلیات

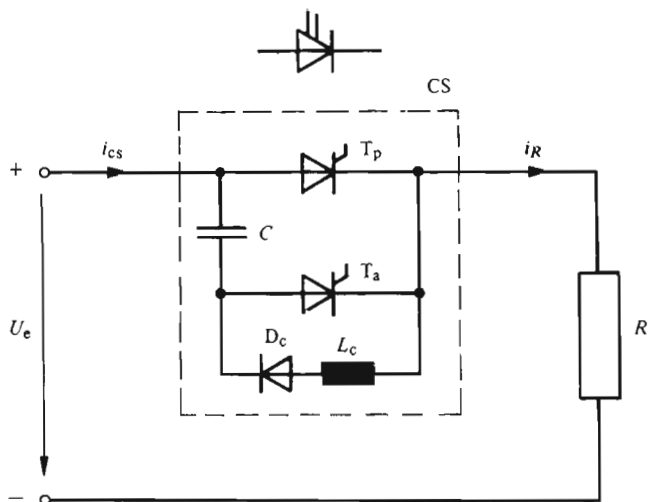
کنتاکتور ایستای شکل ۱۲-۲ همچنین می‌تواند یک مقاومت اهمی R را به تناوب قطع و وصل نماید. در اینجا از «کموتاسیون ضربانی مقاومت» سخن می‌رود. بدین ترتیب، تغییر دادن مقدار ظاهری R^* مقاومت امکان‌پذیر می‌شود. کنتاکتور ایستا را می‌توان متوالی یا موازی با مقاومت قرار داد. مشخصه‌های به دست آمده در دو حالت متفاوت‌اند.

این مدارها عمده‌تاً برای تغییر مقاومت‌های راه‌اندازی یا ترمزگیری موتورهای جریان دایم یا آسنکرون قفسی به کار برده می‌شوند. بسته به مقدار ظاهری R^* مقداری قدرت اکتیو در مقاومت تلف می‌شود. مقدار ظاهری R^* برای اتصال متوالی یا موازی در بندهای ۱۲-۴-۳ و ۱۲-۴-۵ محاسبه خواهد شد.

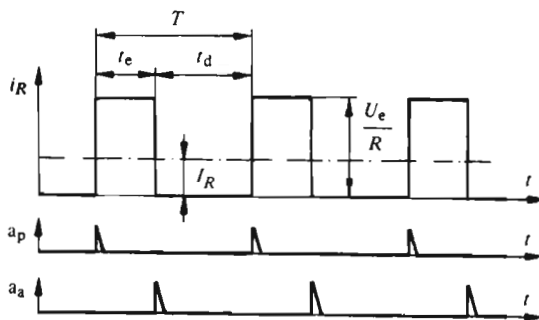
۱۲-۴-۲ اتصال متوالی

اتصال متوالی کنتاکتور ایستای CS و مقاومت اهمی R در شکل ۱۲-۸ نشان داده شده

است. شکل ۹-۱۲ روند تغییرات جریانی i_R را در مقاومت و همچنین تپهای روشن کننده a_p و a_a را برای تیرستورهای اصلی T_p و کمکی T_a نشان می دهد.



شکل ۹-۱۲ اتصال متوالی کنتاکتور ایستا و مقاومت.



شکل ۹-۱۲ کارکرد اتصال متوالی در کوه تاسیون ضربانی مقاومت.

وقتی کنتاکتور ایستا وصل باشد، فشار الکتریکی U_e در دو سر مقاومت R ظاهر می شود و جریان جاری در این مقاومت برابر است با

$$i_R = i_{cs} = \frac{U_e}{R} \quad (۹-۱۲)$$

در عوض هرگاه کنتاکتور ایستا قطع باشد، $i_R = 0$ خواهد بود. تغییرات سریع $i_R = i_{cs}$ بین این دو مقدار، فقط در صورتی امکان پذیر است که هیچ گونه القاگری در مدار وجود نداشته باشد. بسته به مدت زمان وصل t_e و مدت زمان قطع t_d برای مقدار متوسط جریان i_R رابطه زیر به دست می آید

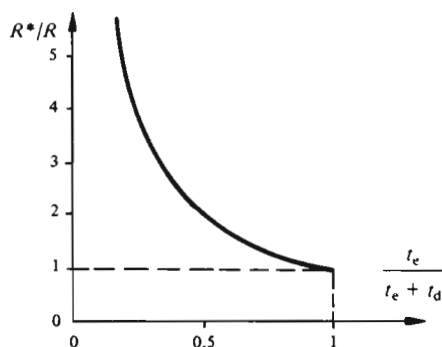
$$I_R = \frac{t_e}{t_e + t_d} \frac{U_e}{R} \quad (12-14)$$

۳-۴-۱۲ مقاومت ظاهری

بدین ترتیب بین سرهای $+$ و $-$ فشارالکتریکی تغذیه U_e ، مقاومت متوسطی برابر «مقاومت ظاهری R^* » نمایان می شود که می تواند از خارج قسمت فشارالکتریکی U_e و مقدار متوسط جریان I_R به دست آید

$$R^* = \frac{U_e}{I_R} = \frac{t_e + t_d}{t_e} R \quad (12-15)$$

چون نسبت وصل $t_e/(t_e + t_d)$ بین صفر و یک تغییر می کند، مقاومت ظاهری بین بینهایت و R تغییر خواهد کرد (به شکل ۱۲-۱۵ مراجعه شود). در نتیجه مشخصه دارای روند تغییراتی هذلولی وار است.

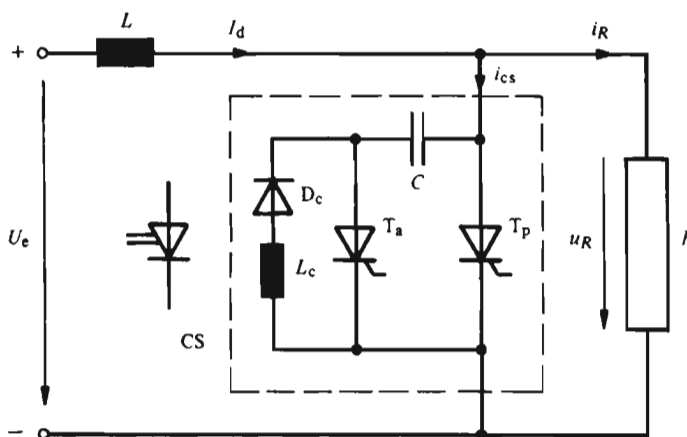


شکل ۱۲-۱۵ مشخصه ایدئال اتصال متوالی در کموتاسیون ضربانی مقاومت.

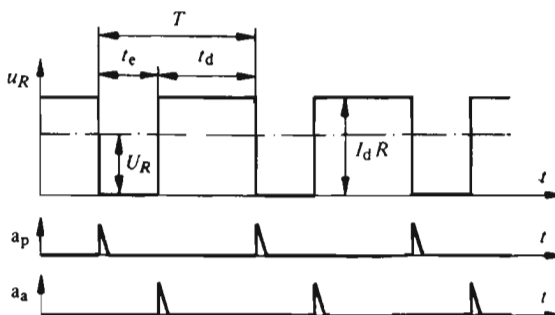
۳-۴-۱۲ اتصال موازی

این امکان نیز هست که مطابق شکل ۱۲-۱۱ کنتاکتور ایستای CS، با مقاومت R

موازی بسته شود. روند تغییرات فشار الکتریکی u_R در دو سر مقاومت R و همچنین تپهای روشن کننده a_p و a_a برای تیرستورهای اصلی T_p و کمکی T_a در شکل ۱۲-۱۲ نشان داده شده اند. وجود يك القاگری L با مقدار خیلی بالا (به طور نظری $L = \infty$)، جریان دائم I_d عملاً ثابتی را تضمین می کند.



شکل ۱۲-۱۱ اتصال موازی کنتاکتور ایستا و مقاومت.



شکل ۱۲-۱۲ کارکرد اتصال موازی، در کموتاسیون ضربانی مقاومت.

اگر کنتاکتور ایستا وصل باشد، جریان I_d از طریق آن می گذرد. مقاومت اتصال کوتاه و فشار الکتریکی u_R برابر صفر می شود. در مدت زمان قطع کنتاکتور ایستا جریان I_d از طریق مقاومت R می گذرد و فشار الکتریکی u_R برابر است با $u_R = i_R R = I_d R$. برای مقدار متوسط فشار الکتریکی دو سر مقاومت R رابطه زیر به دست می آید

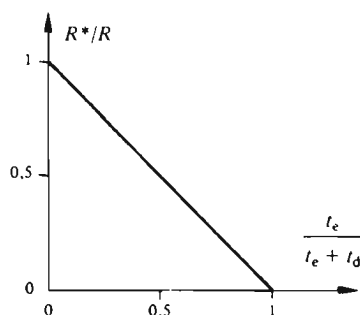
$$U_R = \frac{t_d}{t_e + t_d} I_d R \quad (12-16)$$

۱۲-۴-۵ مقاومت ظاهری

مقاومت ظاهری حاصل از موازی بستن کنتاکتور ایستای CS و مقاومت R ، برابر خارج قسمت مقدار متوسط فشار الکتریکی U_R بر جریان I_d است

$$R^* = \frac{U_R}{I_d} = \frac{t_d}{t_e + t_d} R = \left(1 - \frac{t_e}{t_e + t_d}\right) R \quad (12-17)$$

با تغییر نسبت $t_e/(t_e + t_d)$ بین صفر و یک، مطابق شکل ۱۲-۱۳، مقاومت ظاهری بین R و صفر تغییر می‌کند.



شکل ۱۲-۱۳ مشخصه ایدئال اتصال موازی، در کموتاسیون ضربانی مقاومت.

۱۲-۵ خازن حایل (میانگیر)¹

۱۲-۵-۱ کلیات

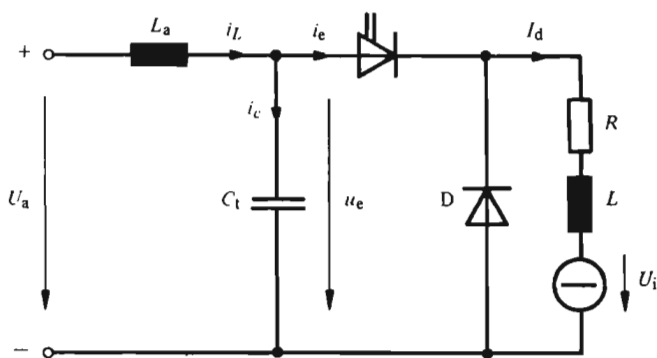
تا اینجا فرض بر این بود که مدار تغذیه برشگر جریان دایم (فشار الکتریکی U_e)، القاگری داخلی ندارد. باتری (انباره) به‌خوبی این شرط را تأمین می‌کند. در عوض اگر برشگر جریان دایم در وسیله حمل و نقلی که با اتصال لغزان تغذیه می‌شود قرار گرفته باشد، القاگری خط تغذیه دیگر قابل اغماض نخواهد بود.

1) Tampon

هر القاگری واقع در مدار تغذیه برشگر جریان دایم، با طولانی کردن پدیده گذر درموقع وصل و قطع، سرعت تغییرات جریان ورودی i_e را به طور قابل ملاحظه ای کاهش می دهد. علاوه بر این، این القاگری در پدیده کموتاسیون اجباری نیز اثری نامطلوب پدید می آورد.

در چنین حالتی، قرار دادن يك «خازن حایل (میانگیر)» C_e بین دو سر ورودی برشگر جریان دایم الزامی است. این مدار را شکل ۱۲-۱۴ نشان می دهد. خازن حایل (میانگیر) C_e قادر است تا جریان مستطیلی ورودی i_e را تأمین کند. فشار الکتریکی ورودی u_e دیگر ثابت نیست. القاگری مدار تغذیه با L_a و فشار الکتریکی ورودی قبل از این القاگری با U_a نشان داده شده اند.

اثر خازن حایل (میانگیر)، نخست با فرض القاگری L_a بینهایت بررسی خواهد شد.



شکل ۱۲-۱۴ برشگر جریان دایم با خازن حایل (میانگیر).

۱۲-۵-۲ القاگری L_a بینهایت

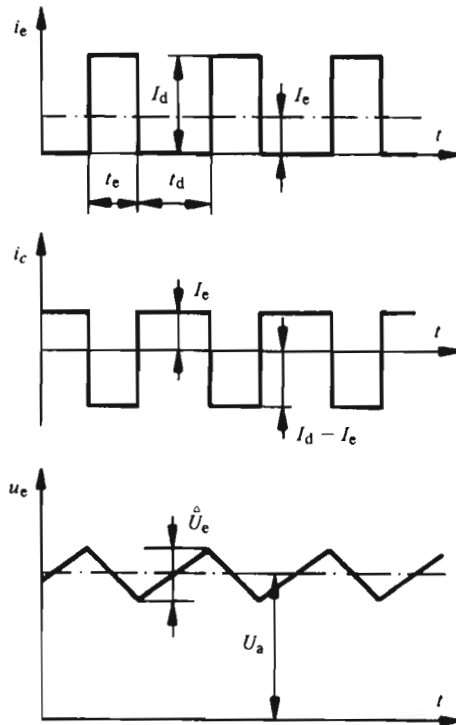
اثر خازن حایل (میانگیر) را به کمک شکل ۱۲-۱۵ بررسی خواهیم کرد. ابتدا فرض می کنیم که القاگری L_a در تغذیه، خیلی بزرگ و به طور تئوری (نظری) بینهایت است، $L_a = \infty$. در این صورت جریان i_L جاری در این القاگری ثابت و برابر مقدار متوسط جریان ورودی برشگر جریان دایم (I_e) است. این مقدار متوسط از رابطه زیر به دست می آید

$$I_e = \frac{t_e}{t_e + t_d} I_d \quad (12-18)$$

جریان i_c جاری در خازن C_e هم عبارت است از

$$i_c = i_L - i_e = I_e - i_e \quad (12-19)$$

روند تغییرات i_e در شکل ۱۲-۱۵ نشان داده شده است.



شکل ۱۲-۱۵ اثر خازن حایل (میانگیر) برای L_a بینهایت.

فشارالکتریکی دو سر خازن حایل برابر فشارالکتریکی ورودی u_e است. این فشار الکتریکی ثابت نیست بلکه حول مقدار متوسطی تغییر می کند. این مقدار متوسط، با صرف نظر کردن از افت فشارالکتریکی اهمی خطوط تغذیه، برابر U_a است. برای دامنه این تغییرات (\hat{U}_e)، یعنی تفاوت بین مقدار ماکزیمم (پیشینه) و مقدار مینیمم (کمینه) این فشارالکتریکی، در طول مدت زمان قطع t_d (که خازن با جریان ثابت I_e بار می شود) می توان نوشت

$$\hat{U}_e = \frac{1}{C_f} I_e t_d \quad (12-20)$$

در دوران وصل t_e ، خازن حایل (میانگیر) با جریان $I_d - I_e$ تخلیه می شود و دامنه

تغییرات فشار الکتریکی ورودی عبارت است از

$$\hat{U}_e = \frac{1}{C_t} (I_d - I_e) t_e \quad (12-21)$$

با جایگزین کردن I_e به وسیله رابطه (12-18) عبارت یکسانی برای دو فاصله زمانی به دست می آید

$$\hat{U}_e = \frac{1}{C_t} \frac{t_e t_d}{t_e + t_d} I_d \quad (12-22)$$

مقدار \hat{U}_e به مدت زمان وصل (t_e) و قطع (t_d) برشگر جریان داریم بستگی دارد و برای $t_e = T_p / 2$ ما گزیم (بیشینه) است. T_p «دوره ضربان» برشگر جریان داریم است

$$T_p = t_e + t_d \quad (12-23)$$

اگر $\hat{U}_{e \text{ adm}}$ ما گزیم (بیشینه) مقدار قابل قبول باشد، مقدار خازن حایل (میانگیر) C_t باید از رابطه زیر تعیین شود

$$C_t = \frac{T_p I_d}{4 \hat{U}_{e \text{ adm}}} \quad (12-24)$$

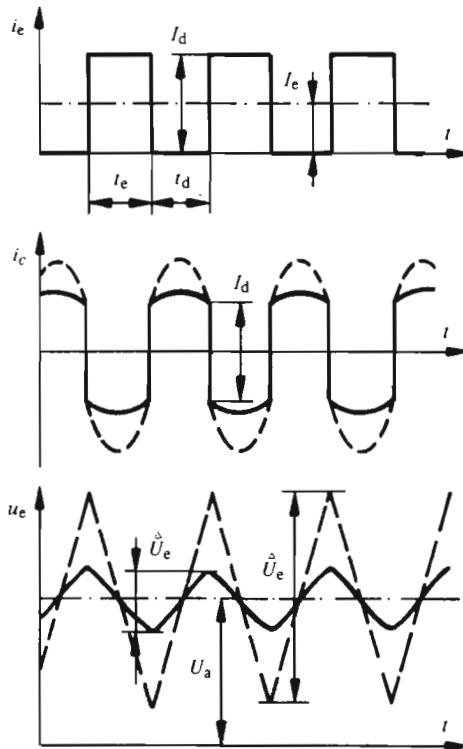
ملاحظه می شود که هر چه مقدار انتخاب شده برای T_p بزرگتر باشد C_t نیز بزرگتر خواهد بود.

۱۲-۵-۳ القاگری L_a مشخص

در عمل، القاگری L_a مقدار مشخصی دارد. این القاگری با خازن C_t ، مدار نوسان کننده ای تشکیل می دهد که ضربان تشدیدش برابر است با

$$\omega_o = \frac{1}{\sqrt{L_a C_t}} \quad (12-25)$$

جریان i_e در خازن حایل دیگر مستطیلی نیست و چنانکه شکل ۱۲-۱۶ نشان می دهد از تکه های سینوسی با ضربان تشدید، تشکیل می شود که به تناوب به اندازه جریان I_d جابه جا شده اند. محاسبه این پدیده نسبتاً پیچیده است. در اینجا به نمایش طرح وار روند تغییرات جریانها و فشارهای الکتریکی اکتفا و از تشریح چگونگی تعیین آن خودداری می شود.



شکل ۱۲-۱۶ اثر خازن حایل (میانگیر) در شرایط L_a مشخص.

الفاگیری مشخص L_a اثر خود را بر روی فشار الکتریکی u_e نیز نشان می‌دهد. هرچه فرکانس تشدید $f_o = \omega_o / 2\pi$ به «فرکانس ضربان»

$$f_p = \frac{1}{T_p} \quad (۱۲-۲۶)$$

نزدیکتر باشد، دامنه تغییرات فشار الکتریکی ورودی (\hat{U}_e) بزرگتر است (به منحنیهای خط-چین در شکل ۱۲-۱۶ مراجعه شود). اگر $f_o = f_p$ باشد، مقدار \hat{U}_e بینهایت می‌شود. برای اینکه از زیاد بودن \hat{U}_e و در نتیجه بالا بودن دامنه تغییرات i_e و i_L جلوگیری شود، لازم است فرکانس ضربان f_p از فرکانس تشدید f_o بزرگتر باشد. پس از تعیین مقدار خازن حایل (میانگیر) C_e از روی رابطه (۱۲-۲۴)، لازم است فرکانس تشدید محاسبه گردد. برای کاهش فرکانس تشدید f_o احتمالاً لازم خواهد بود تا الفاگیری L_a یا ظرفیت C_e افزایش داده شود، یا چنانچه با کار برشگر جریان دایم مغایرتی نداشته باشد،

می توان فرکانس ω را افزایش داد.

برای وسایل حمل و نقلی که با اتصال لغزان، تغذیه می شوند، القاگری L_a به طور قابل ملاحظه ای با موقعیت وسیله نقلیه نسبت به نقطه تغذیه خط تغییر می کند. برای جلوگیری از تغییرات زیاد ω ، اغلب لازم است تا يك پيچك القاگر اضافی در وسیله حمل و نقل و در ورودی برشگر جریان دایم قرار داده شود.

۱۲-۶ تموج جریان دایم

۱۲-۶-۱ کلیات

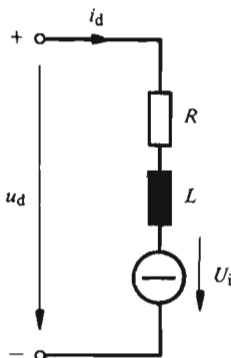
تا به حال القاگری L بار را بینهایت فرض کردیم. در نتیجه جریان دایم گذرنده از بار کاملاً صاف بود.

اما در عمل القاگری بینهایت نیست و مشخص است و به لحاظ فشار الکتریکی مستطیلی که برشگر جریان دایم به بار تحویل می دهد، جریان دایم تموج دارد. در زیر، با کنار گذاشتن فرض $L = \infty$ ، تموج جریان دایم را بررسی خواهیم کرد. در عوض با فرض زمان کموتاسیون $t_c = 0$ ، پدیده کموتاسیون اجباری مورد مطالعه قرار نخواهد گرفت.

۱۲-۶-۲ روابط بنیادی

بار با جریان دایم نشان داده شده در شکل ۱۲-۱۷ را در نظر می گیریم. برای این مدار معادله دیفرانسیل زیر معتبر است

$$L \frac{di_d}{dt} + R i_d = u_d - U_i \quad (12-27)$$

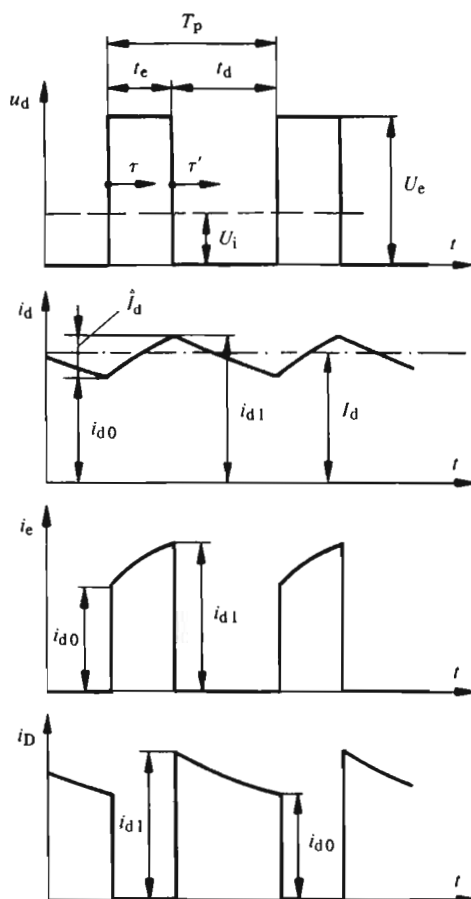


شکل ۱۲-۱۷ بار با جریان دایم يك تغییر دهنده (برشگر) جریان دایم.



فشار الکتریکی u_d مطابق شکل ۱۲-۱۸ روند تغییرات مستطیلی دارد، در صورتی که فشار الکتریکی داخلی U_i ثابت است. در دوران وصل t_e ، فشار الکتریکی u_d برابر فشار الکتریکی ورودی U_e و مقدار اولیه جریانی دایم برابر i_{d0} است. با قرار دادن ثابت زمانی بار

$$T = \frac{L}{R} \quad (۱۲-۲۸)$$



۱۲-۱۸ روند تغییرات فشار الکتریکی و جریانیها برای القاگری غیر بینهایت بار.

پاسخ معادله دیفرانسیل (۲۷-۱۲) به صورت زیر به دست می آید

$$i_d = \frac{U_e - U_i}{R} (1 - e^{-\tau'/T}) + i_{d0} e^{-\tau'/T} \quad (29-12)$$

که در آن متغیر زمان τ ، از لحظه وصل، اندازه گیری می شود (به شکل ۱۲-۱۸) مراجعه شود).

در دوران قطع t_d ، فشار الکتریکی u_d صفر و مقدار اولیه جریان برابر i_{d1} است. پاسخ معادله دیفرانسیل (۲۷-۱۲) در این حالت عبارت است از

$$i_d = -\frac{U_i}{R} (1 - e^{-\tau'/T}) + i_{d1} e^{-\tau'/T} \quad (30-12)$$

متغیر زمان τ' ، از لحظه قطع (به شکل ۱۲-۱۸ مراجعه شود)، اندازه گیری می شود. لازم است تا مقدار اولیه i_{d0} و i_{d1} جریان محاسبه گردند. برای $\tau = t_e$ ، $i_d = i_{d1}$ است و از رابطه (۲۹-۱۲) نتیجه می شود

$$i_{d1} = \frac{U_e - U_i}{R} (1 - e^{-t_e/T}) + i_{d0} e^{-t_e/T} \quad (31-12)$$

در حالت پایا، باید در لحظه $\tau' = t_d$ جریان i_d دوباره برابر i_{d0} شود. با قراردادن مقدار i_{d1} از رابطه (۳۱-۱۲) در رابطه (۳۰-۱۲) و وارد کردن دوره ضریبان $T_p = t_e + t_d$ ، بنابراین رابطه (۲۳-۱۲) پس از ساده کردن نتیجه می شود

$$i_{d0} = \frac{U_e}{R} \frac{(1 - e^{-t_e/T}) e^{-t_d/T}}{1 - e^{-T_p/T}} - \frac{U_i}{R} \quad (32-12)$$

بنابراین، روند تغییرات جریان i_d از تکه هایی از توابع نمایی تشکیل می شود (شکل ۱۲-۱۸). در نتیجه، جریانهای i_e و i_D (به شکل ۱۲-۲ مراجعه شود) دیگر مستطیلی نیستند بلکه روندی دوزنقه ای دارند.

۱۲-۶-۳ مقدار متوسط جریان دایم

مقدار متوسط جریان دایم از رابطه زیر به دست می آید

$$I_d = \frac{1}{T_p} \left(\int_0^{t_e} i_d d\tau + \int_0^{t_d} i_d d\tau' \right) \quad (33-12)$$

در این رابطه به جای i_d باید در انتگرال اول عبارت (۱۲-۲۹) و در انتگرال دوم عبارت (۱۲-۳۰) را گذاشت. پس از محاسبه ساده‌ای که در اینجا از آوردن آن خودداری می‌شود، خواهیم داشت

$$I_d = \frac{1}{R} \left(U_o \frac{t_e}{T_p} - U_i \right) \quad (34-12)$$

بنابر رابطه (۱۲-۳)، جمله اول داخل پرانتز، با مقدار متوسط فشار الکتریکی دایم (U_d) برابر است. بدین ترتیب رابطه (۱۲-۳۴) به صورت رابطه (۱۲-۸) خلاصه می‌شود. با تعیین مقادیر متوسط جمله به جمله در معادله (۱۲-۲۷) و با در نظر گرفتن اینکه $dI_d/dt = 0$ است، همین نتیجه به دست می‌آید. بنابراین، معین بودن القاگری بار اثری بر مقدار متوسط جریان دایم ندارد. این نتیجه گیری فقط ناموقی معتبر است که: «جریان i_d صفر نشود یعنی $i_{d0} > 0$ باشد».

۱۲-۶-۴ موج

بنابر شکل ۱۲-۱۸ ماگنیم (بیشینه) موج جریان دایم برابر دامنه تغییرات این جریان است

$$\hat{I}_d = i_{d1} - i_{d0} \quad (35-12)$$

با قرار دادن مقدار i_{d1} از رابطه (۱۲-۳۱) نتیجه می‌شود

$$\hat{I}_d = \frac{U_o - U_i}{R} (1 - e^{-t_e/T}) - i_{d0} (1 - e^{-t_e/T}) \quad (36-12)$$

با حذف i_{d0} به کمک رابطه (۱۲-۳۲) و پس از ساده کردن، رابطه زیر به دست می‌آید

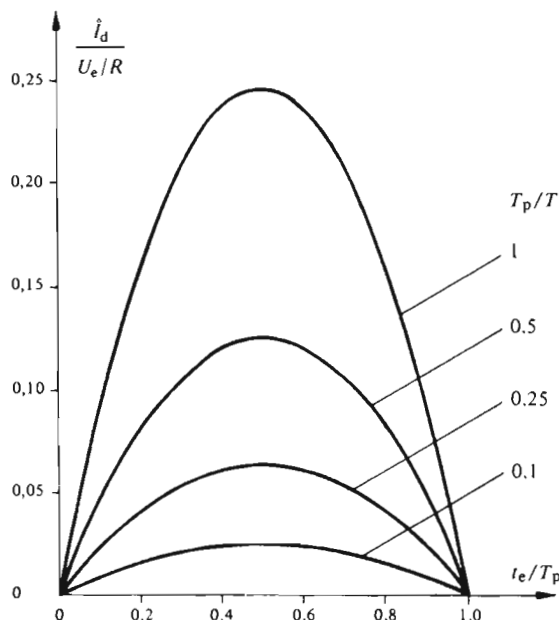
$$\hat{I}_d = \frac{U_o}{R} \frac{(1 - e^{-t_e/T})(1 - e^{-t_d/T})}{1 - e^{-T_p/T}} \quad (37-12)$$

موج جریان دایم، به شرط اینکه $i_{d0} \geq 0$ باشد، مستقل از فشار الکتریکی داخلی

U_i است، اما با توجه به $t_d = T_p - t_e$ ، به دوره ضربان T_p و مدت زمان وصل t_e بستگی دارد.

شکل ۱۲-۱۹، تغییرات نسبت موج جریان دایم به U_e/R را برحسب t_e/T_p و با پارامتر T_p/T نشان می‌دهد. این موج به ازای $t_e/T_p = 1/2$ ، ماگزیمم است و با افزایش پارامتر T_p/T افزایش می‌یابد. برای اینکه موج جریان دایم کوچک بماند، دوره ضربان T_p ، باید خیلی کوچکتر از ثابت زمانی T بار باشد. با $t_e = t_d = T_p/2$ از رابطه (۱۲-۳۷) نتیجه زیر به دست می‌آید

$$\hat{I}_{d \max} = \frac{U_e}{R} \frac{(1 - e^{-T_p/2T})^2}{1 - e^{-T_p/T}} = \frac{U_e}{R} \frac{1 - e^{-T_p/2T}}{1 + e^{-T_p/2T}} \quad (12-38)$$



شکل ۱۲-۱۹ موج جریان دایم برحسب نقطه کار، به شرط $i_{d0} \geq 0$.

برای $T_p/2T \ll 1$ ، می‌توان تابع نمایی e^{-x} را با $(1-x)$ اشتباه کرد و نتیجه گرفت

$$\hat{I}_{d \max} \cong \frac{U_e}{R} \frac{T_p}{2T} \quad (12-39)$$

در عوض برای $T_p/2T \gg 1$ ، تابع نمایی خیلی کوچک است و مقدار مجانب زیر حاصل می‌شود

$$\hat{I}_{d \max} \cong \frac{U_e}{R} \quad (۱۲-۴۰)$$

این مقدار برای بار اهمی خالص، با $U_i = 0$ (به جهت شرط $i_{dc} \geq 0$)، به دست می‌آید.

۱۲-۶-۵ شرط ناپیوستگی

برای جریانهای دایم کم، امکان دارد که این جریان قبل از وصل دوباره کنتاکتور ایستا به صفر برسد. در چنین حالتی، چنانکه در شکل ۱۲-۲۰ نشان داده شده، جریان دایم حالت ناپیوستگی پیدا می‌کند.

اگر $i_{dc} = 0$ فرض شود، روابط بنیادی بیان شده در بند ۱۲-۶-۲ باز هم معتبر می‌مانند. از رابطه (۱۲-۳۲). با قرار دادن $i_{dc} = 0$ ، حد هدایت پیوسته چنین به دست می‌آید

$$U_e \frac{(1 - e^{-t_e/T})(1 - e^{-t_d/T})}{1 - e^{-T_p/T}} = U_{i \lim} \quad (۱۲-۴۱)$$

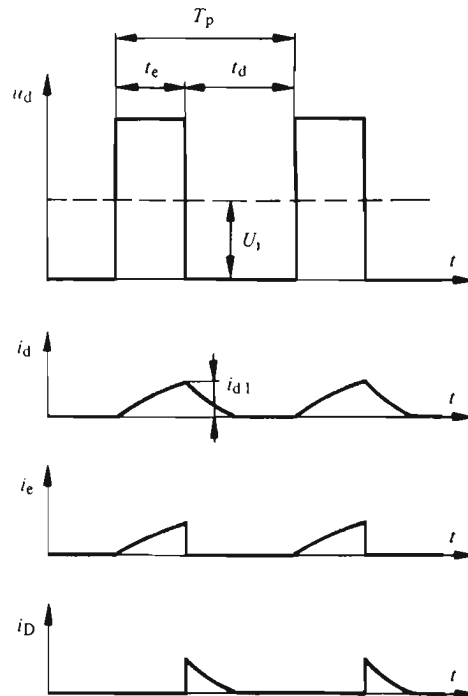
برای مدت زمانهای مشخص وصل (t_e) و قطع (t_d)، از رابطه فوق می‌توان حد $U_{i \lim}$ را برای فشار الکتریکی داخلی به دست آورد. هدایت برای $U_i < U_{i \lim}$ پیوسته و برای $U_i > U_{i \lim}$ ناپیوسته است.

در حالت هدایت ناپیوسته، دیگر نمی‌توان مقدار متوسط جریان دایم I_d را از روی رابطه (۱۲-۳۴) محاسبه کرد. انتگرال گیری باید بر روی روند تغییرات واقعی جریان دایم و با در نظر گرفتن انقطاعی که در زمان قطع پیش می‌آید انجام پذیرد. در اینجا از انجام دادن محاسبه مربوط به این حالت خودداری می‌شود.

۱۲-۷ تغییر فشار الکتریکی دایم

۱۲-۷-۱ کلیات

چنانکه از معادله (۱۲-۳) و مشخصه ایدئال نشان داده شده در شکل ۱۲-۴ بدراحتی نتیجه می‌شود، مقدار متوسط فشار الکتریکی دایم (U_d) به مدت زمانهای وصل (t_e) و قطع (t_d) بستگی دارد.



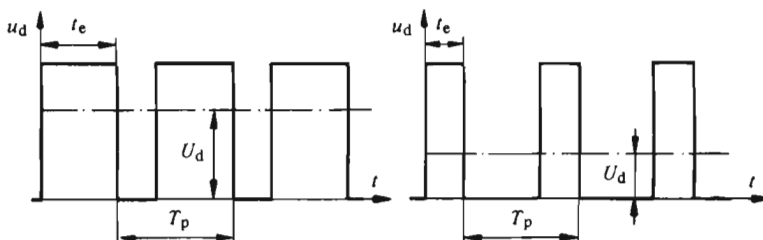
شکل ۱۲-۲۰ روند تغییرات فشار الکتریکی و جریانیها برای هدایت ناپیوسته.

برای تغییر دادن فشار الکتریکی داریم باید مقادیر t_e و t_d را تغییر داد. برای این منظور امکانات مختلفی وجود دارد. مدت زمانهای t_e و t_d را می توان به طور مستقیم بامدولای سیون زمانی یا فرکانسی تپهای روشن کننده یا به طور غیر مستقیم با تنظیم جریان داریم به کمک تنظیم کننده دو وضعیتی تغییر داد.

در حالت واقعی که القاگری بار L معین (غیر بینهایت) است (به بند ۱۲-۶ مراجعه شود) کلیه روشهای تغییر فشار الکتریکی داریم بر روی تموج جریان داریم اثر می گذارند. برای اینکه تموج جریان داریم کوچک بماند، لازم است دوره ضربان T_p کوچک (به بند ۱۲-۶ مراجعه شود) و بنا بر این فرکانس ضربان حتی الامکان بالا باشد. از طرف دیگر با فرکانسهای ضربان f_p بالا، تلفات کموتاسیون، در حالت واقعی، اهمیتی غیر مجاز پیدا می کند. بنا بر این انتخاب فرکانس ضربان (f_p) باید با مصالحه انجام گیرد. این فرکانس معمولاً بین چند صد هرتز و یک کیلو هرتز است.

۳-۷-۱۲ مدولاسیون زمانی تپها

در حالت مدولاسیون زمانی تپها، فرکانس ضربان f_p ثابت می ماند. با تغییر مدت زمان قطع t_d ، مدت زمان وصل t_e همزمان با آن چنان تغییر می کند که $t_e + t_d$ ثابت و برابر دوره ضربان $T_p = 1/f_p$ بماند (به شکل ۲۱-۱۲ مراجعه شود).



شکل ۲۱-۱۲ تغییر فشار الکتریکی دایم بامدولاسیون زمانی تپها (دوره ضربان T_p ثابت).

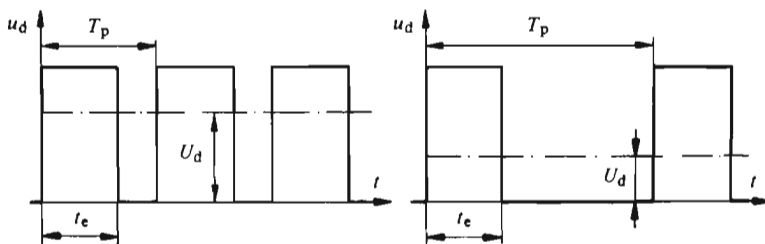
به طور نظری (تئوری)، نسبت t_e/T_p می تواند بین صفر و یک تغییر کند. مع هذا باید در نظر داشت که در عمل، مینیمم مدت زمان وصل را مدت زمان لازم برای بار شدن منفی خازن مدار خاموش کننده تعیین می کند. در صورتی که مینیمم مدت زمان قطع را بار شدن مثبت این خازن محدود می سازد (به بند ۲-۱۳ مراجعه شود). پهنه (دامنه) قابل استفاده نسبت t_e/T_p به دوره ضربان T_p بستگی دارد.

هرگاه برشگر جریان دایم دارای خازن حایل (میانگیر) باشد، کار با فرکانس ضربان ثابت بهتر است. بدین ترتیب خطر اینکه فرکانس ضربان f_p خیلی نزدیک به فرکانس تشدید f_r بشود وجود ندارد (به بند ۵-۱۲ مراجعه شود).

۳-۷-۱۲ مدولاسیون فرکانسی تپها

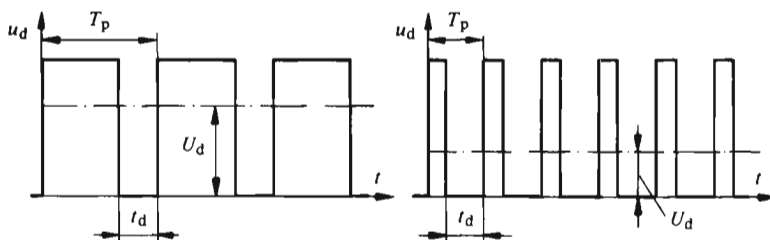
در حالت مدولاسیون فرکانسی تپها، مدت زمان وصل t_e ثابت نگه داشته می شود و با تغییر مدت زمان قطع t_d ، دوره ضربان T_p تغییر می یابد (شکل ۲۲-۱۲). این امر به تغییر فرکانس ضربان f_p می انجامد.

برای کاستن فشار الکتریکی دایم U_d ، باید فرکانس ضربان f_p کاهش یابد. برای جلوگیری از ترموج خیلی زیاد جریان دایم، این فرکانس از نظر مقادیر پایین محدود است. امکان دیگر برای مدولاسیون فرکانسی تپها عبارت از این است که مدت زمان قطع t_d ثابت بماند و مدت زمان وصل t_e و در نتیجه دوره ضربان T_p تغییر کند (به شکل ۲۳-۱۲ مراجعه شود). این عمل با تغییر فرکانس ضربان f_p صورت می پذیرد.



شکل ۱۲-۲۳ تغییر فشار الکتریکی دایم بامدولاسیون فرکانسی تپها (مدت زمان وصل ثابت)

در این حالت برای کاهش فشار الکتریکی دایم U_d ، لازم است فرکانس f_p افزایش یابد.



شکل ۱۲-۲۴ تغییر فشار الکتریکی دایم بامدولاسیون فرکانسی تپها (مدت زمان قطع t_d ثابت)

۱۲-۷-۴ تنظیم جریان دایم

در بسیاری از کاربردها، به عنوان مثال در وسایل حمل و نقل، به ویژه برای کنترل مستقیم نیروی کشش، بهتر است جریان دایم تنظیم شود.

در ساده ترین حالات از یک تنظیم کننده دو وضعیتی استفاده می شود، که دامنه تغییرات موج جریان دایم را در مقدار ثابتی نگه می دارد. مطابق شکل ۱۲-۲۴، جریان دایم I_d تغییراتی مانند ΔI_{dh} ، حول مقدار متوسط I_d دارد. با آستانه های تغییر وضعیت تنظیم کننده، تعیین می شود.

روند تغییرات جریان دایم، در دوران وصل کنتور ایستا از معادله (۱۲-۲۹) و در دوران قطع آن از معادله (۱۲-۳۵) به دست می آید.

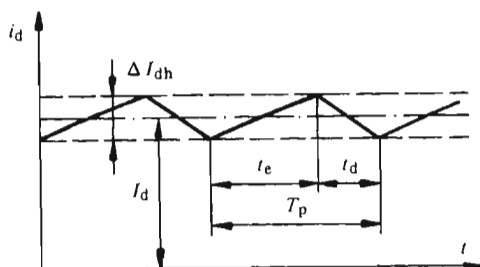
معمولاً در حالت تنظیم بادو وضعیت، $\tau/T \ll 1$ است و تابع نمایی $e^{-\tau/T}$ را می توان



به وسیله $(1 - \tau/T)$ خطی ساخت. بدین ترتیب برای جریان i_d در مدت زمان وصل و قطع به ترتیب داریم

$$i_d = i_{d0} + \left(\frac{U_e - U_i}{R} - i_{d0} \right) \frac{\tau}{T} \quad (42-12)$$

$$i_d = i_{d1} - \left(\frac{U_i}{R} + i_{d1} \right) \frac{\tau'}{T} \quad (43-12)$$



شکل ۲۴-۱۲ روند تغییرات جریان داریم برای تنظیم جریان با تنظیم کننده دو وضعیتی.

از معادله $(42-12)$ با گذاردن $\tau = t_e$ نتیجه می شود

$$i_d = i_{d1} \cong I_d + \frac{\Delta I_{dh}}{2} \quad (44-12)$$

در صورتی که معادله $(43-12)$ با قرار دادن $\tau' = t_d$ می دهد

$$i_d = i_{d0} \cong I_d - \frac{\Delta I_{dh}}{2} \quad (45-12)$$

از رابطه های فوق و پس از ساده کردن، برای مدت زمانهای وصل و قطع نتایج زیر به دست می آید

$$t_e = \frac{\Delta I_{dh} R}{U_e - U_i - (I_d - \Delta I_{dh}/2) R} T \quad (46-12)$$

$$t_d = \frac{\Delta I_{dh} R}{U_i + (I_d + \Delta I_{dh}/2) R} T \quad (47-12)$$

فرکانس ضربان برابر $f_p = 1/(t_e + t_d)$ است، یعنی

$$f_p = \frac{(U_e - U_i - R I_d)(U_i + R I_d)}{\Delta I_{dh} L U_e} \quad (48-12)$$

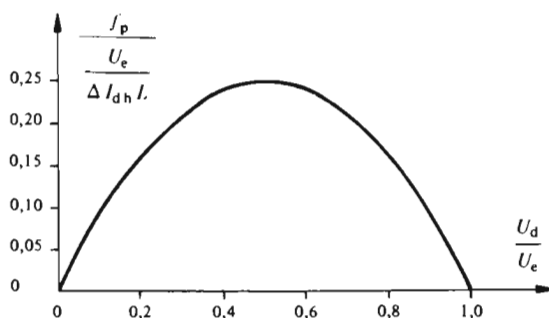
در این رابطه از $\Delta I_{dh}/2$ در مقابل I_d صرف نظر شده و القاگری L بار، جایگزین $T.R$ شده است.
با در نظر گرفتن

$$U_i + R I_d = U_d \quad (49-12)$$

معادله (48-12) را می توان به صورت فشرده تر زیر نوشت

$$f_p = \frac{(U_e - U_d) U_d}{\Delta I_{dh} L U_e} \quad (50-12)$$

ملاحظه می شود که فرکانس ضربان f_p با نسبت U_d/U_e سهمی وار تغییر می کند و با ΔI_{dh} نسبت عکس دارد (شکل ۲۵-۱۲). این فرکانس برای $U_d/U_e = 1/2$ ماگزیم (بیشینه) است و اگر نسبت U_d/U_e به طرف صفر و یا به طرف ۱ میل کند، صفر می شود.



شکل ۲۵-۱۲ فرکانس ضربان برای تنظیم جریان به وسیله تنظیم کننده دو وضعیتی و اثر نقطه کار.

با قراردادن فرکانس ضریبان ماگزیمم ($f_{p \max}$)، برای ΔI_{dh} رابطه زیر به دست می آید

$$\Delta I_{dh} = \frac{U_c}{\varphi f_{p \max} L} \quad (۵۱-۱۲)$$

ΔI_{dh} مربوط به آستانه تغییر وضعیت است که باید در تنظیم کننده دو وضعیتی میزان شود.

فصل سیزدهم

برشگر جریان دایم کمو تاسیون اجباری

۱-۱۳ مقدمه

۱-۱۳-۱ کلیات

اساس کمو تاسیون اجباری قبلاً، در بند ۲-۲-۴ و به کمک شکل ۲-۴ به اختصار بیان شده است. در آن مدار ساده، به شرط آنکه خازن خاموش کننده C با جهت صحیحی بار شود، تنها امکان یک بار کمو تاسیون اجباری وجود دارد. مدار برشگر جریان دایم نشان داده شده در شکل ۱-۲ با عناصر اضافی تکمیل شده است تا کمو تاسیون اجباری را به طور تناوبی تضمین کنند. این پدیده را مشروحتر در این فصل بررسی خواهیم کرد. برای ایسن منظور، نه تنها تشریح پدیده قطع کنتاکتور ایستا بلکه تشریح پدیده وصل آن نیز الزامی است.

۱-۱۳-۲ فرضهای مطالعه کمو تاسیون اجباری

برای مطالعه پدیده کمو تاسیون اجباری، ابتدا روابط ساده شده‌ای را با فرض اینکه القاگری L بار با جریان دایم بینهایت است به دست خواهیم آورد

$$L = \infty$$

(۱-۱۳)

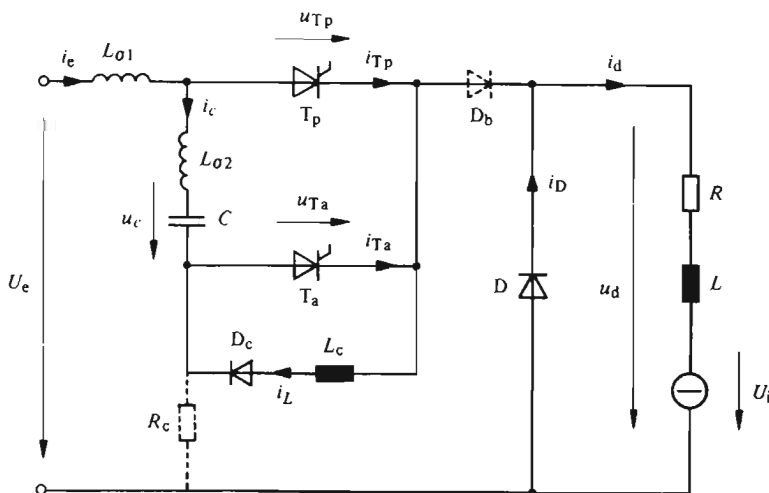


بنابراین جریانی که از بار می‌گذرد کاملاً صاف خواهد بود. این فرض به طور قابل ملاحظه‌ای محاسبه پدیده گذرا را در موقع کموتاسیون اجباری ساده می‌کند. تنها در بند ۱۳-۴ است که برای محاسبه دقیقتر پدیده گذرا، القاگری بار مشخص و غیر بینهایت فرض خواهد شد.

۱۳-۲ پدیده کموتاسیون اجباری

۱۳-۲-۱ طرح واره معادل

برای مطالعه پدیده کموتاسیون اجباری در برشگر جریان دایم، از طرح واره معادل شکل ۱۳-۱ استفاده می‌کنیم. در مقایسه با طرح واره شکل ۱۲-۲، در اینجا القاگرهای کوچک $L_{\sigma 1}$ و $L_{\sigma 2}$ ، ناشی از اتصالات، اضافه شده‌اند. این القاگرها سرعت تغییر جریان di/dt را در تیرستور اصلی T_p و تیرستور کمکی T_a محدود می‌سازند. برای اینکه di/dt از مقادیر مجاز تیرستورها تجاوز نکند، در بعضی از مواقع لازم است تا پیچکهای القاگر اضافی کوچکی افزوده شوند. عمل دیود D_b که در شکل ۱۳-۱ به صورت خط چین مشخص شده است، در بند ۱۳-۲-۷ بیان خواهد شد.



شکل ۱۳-۱ طرح واره معادل برشگر جریان دایم.

قبل از محاسبه پدیده گذرا، مراحل قطع و وصل کنتاکتور ایستا را به اجمال و از نظر فیزیکی بیان می‌کنیم (شکل‌های ۱۳-۲ و ۱۳-۳).

۱۳-۲-۲ وصل

فرض کنیم که کنتا کتور ایستا در حالت قطع باشد. جریان دایم I_a از طریق بار و دیود D می‌گذرد. چنانکه در بند ۱۳-۲-۳ بیان خواهد شد، به دنبال پدیده قطع قبلی، خازن C با جهت نشان داده شده در شکل ۱۳-۲-۱ (الف) بار شده است.

در اثر روشن شدن تیرستور اصلی T_p ، از یک طرف خازن C از طریق القاگری L_c و دیود D_c تخلیه می‌شود و از طرف دیگر جریانی از طریق دیود D عبور می‌کند (شکل ۱۳-۲-۲ ب). جریان اخیر در خلاف جهت هدایت دیود D می‌گذرد و به کاهش جریان کلی آن می‌انجامد. چون تفاوت جریانه‌ها در دیود نمی‌تواند منفی بشود، دیود D به سرعت قطع می‌شود. در این لحظه، جریان دایم فقط از طریق بار جاری می‌گردد (شکل ۱۳-۲-۲ ج).

تخلیه خازن C به صورت نوسانی (مدار LC) ادامه پیدا می‌کند و جهت فشار الکتریکی دو سر خازن C عوض می‌شود (علامتهای داخل پرانتز). در لحظه‌ای که جریان به صفر می‌رسد، دیود D_c به حالت قطع در می‌آید و از تخلیه خازن در جهت عکس جلوگیری می‌کند.

عمل وصل کنتا کتور ایستا پایان پذیرفته است و فقط یک جریان از طریق منبع تغذیه و بار عبور می‌کند (شکل ۱۳-۲-۲ د).

۱۳-۲-۳ قطع

برای قطع کردن کنتا کتور ایستا، تیرستور کمکی T_a روشن می‌شود (شکل ۱۳-۲-۳ الف). خازن C از طریق تیرستورهای T_a و T_p تخلیه می‌گردد. جریان برآیند در تیرستور اصلی T_p به سرعت صفر می‌شود و به قطع شدن آن می‌انجامد. جریان بار حالا از طریق خازن C و تیرستور کمکی T_a عبور می‌کند (شکل ۱۳-۲-۳ ب).

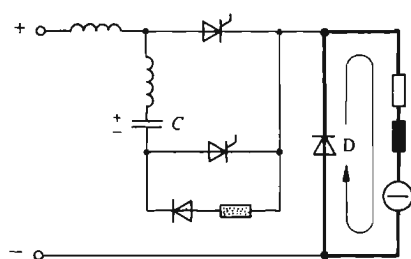
القاگری بار، این جریان را عملاً ثابت نگه می‌دارد. خازن C تخلیه و دوباره در جهت مخالف بار می‌شود (علامتهای داخل پرانتز). در نتیجه فشار الکتریکی دو سر بار با جریان دایم، کاهش می‌یابد. با صفر شدن این فشار الکتریکی، دیود D دوباره به حالت هدایت در می‌آید (شکل ۱۳-۲-۳ ج).

بار شدن خازن C متوقف و تیرستور T_a قطع می‌شود. بدین ترتیب عمل قطع کنتا کتور ایستا پایان می‌پذیرد (شکل ۱۳-۲-۳ د) و همان شرایط اولیه را به دست می‌آوریم (با شکل ۱۳-۲-۱ الف مقایسه شود).

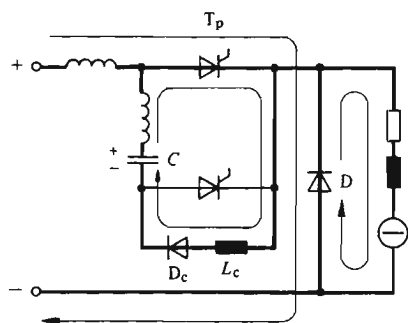
بدین ترتیب، شروع یک دوره جدید وصل و قطع امکان پذیر است.

۱۳-۲-۴ بار اولیه خازن خاموش کننده

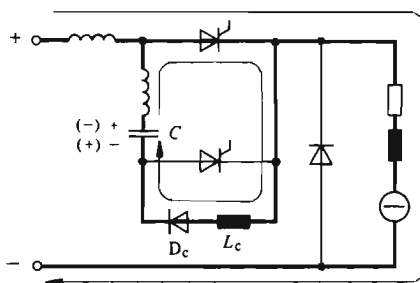
در موقع اولین وصل، لازم است تا خازن خاموش کننده C با جهت نشان داده شده در شکل



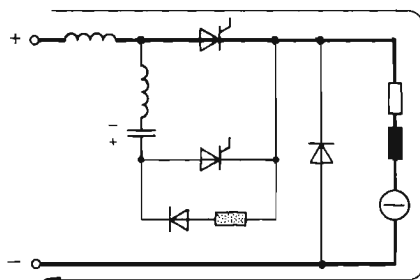
(الف)



(ب)

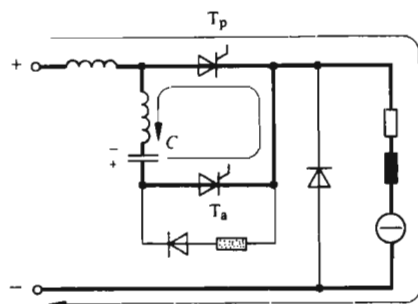


(ج)

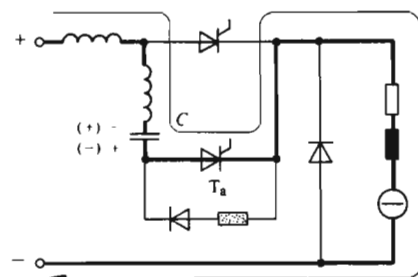


(د)

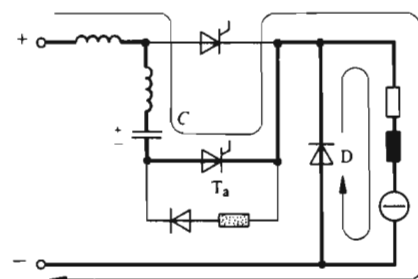
شکل ۱۳-۲ چهار مرحله هدایت در موقع وصل کنتاکتور ایستا.



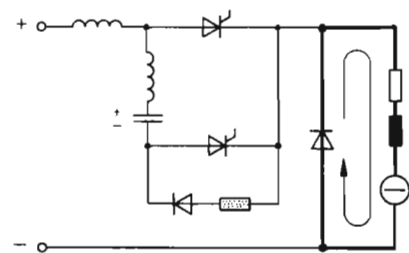
(الف)



(ب)



(ج)



(د)

شکل ۳-۱۳ چهار مرحله هدایت در موقع قطع کنتاکتور ایستا.



۱۳-۲ (الف) بار شده باشد. برای این منظور می‌توان تیرستور کمکی T_d را روشن کرد. بدین ترتیب خازن C به وسیله فشار الکتریکی تغذیه U_e و از طریق بار با جریان دایم، بار می‌شود. پس از بار شدن خازن، جریان صفر و تیرستور کمکی خاموش می‌شود. اگر فشار الکتریکی داخلی U_i بزرگ باشد، خازن C نمی‌تواند به اندازه کافی بار شود. در این صورت ناگزیر باید خازن خاموش کننده از طریق مقاومت بزرگ R_c که در شکل ۱۳-۱ با خط چین نشان داده شده، بار شود.

۱۳-۲-۵ محاسبه پدیده وصل

برای محاسبه پدیده وصل کنتاکتور ایستا از شکل‌های ۱۳-۱ و ۱۳-۲ استفاده می‌کنیم. در لحظه روشن شدن تیرستور اصلی T_p ، از طرفی با افزایش جریان ورودی i_e و از طرف دیگر با یک نیم نوسان در مدار خاموش کننده روبرو هستیم. با توجه به اینکه دیود D هادی و در نتیجه $u_d = 0$ است، برای جریان ورودی معادله دیفرانسیل زیر معتبر است

$$L_{\sigma} \frac{di_e}{dt} = U_e \quad (13-2)$$

با انتگرال گیری از آن، نتیجه می‌شود

$$i_e = \frac{U_e}{L_{\sigma}} t \quad (13-3)$$

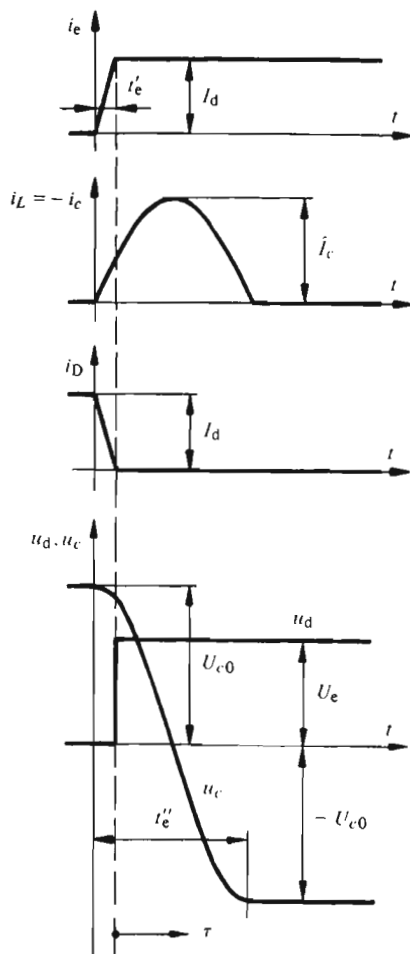
بنابراین جریان ورودی i_e به صورت یک تابع خطی از زمان افزایش می‌یابد. برای جریان i_D در دیود D ، رابطه زیر برقرار است

$$i_D = I_d - i_e \quad (13-4)$$

در این رابطه، جریان دایم I_d که از بار می‌گذرد ثابت فرض شده است. چون جریان i_D در دیود D نمی‌تواند منفی شود، رابطه‌های بالا فقط برای $i_e \leq I_d$ معتبرند. بنابراین «زمان صعود جریان» کنتاکتور ایستا (t'_e) که نباید با مدت زمان وصل t_e اشتباه شود) برابر است با

$$t'_e = \frac{L_{\sigma} I_d}{U_e} \quad (13-5)$$

پس از گذشت این زمان، که در حدود $10\mu s$ است، دیود D قطع می‌شود. چون جریان i_e ثابت و برابر I_d و $L_{\sigma} \frac{di_e}{dt} = 0$ است، فشار الکتریکی u_d در دو سر بار برابر U_c می‌شود. روند تغییرات فشار الکتریکی u_d و جریانهای i_e و i_D در شکل ۴-۱۳ نشان داده شده‌اند.



شکل ۴-۱۳ روند تغییرات جریانها و فشارهای الکتریکی در دوران وصل کنتاکتور ایستا.

خازن خاموش کننده C ، مستقل از این پدیده، تخلیه و دوباره از طریق تیرستور اصلی T_p ، القاگری L_c و دیود D_c در جهت منفی و به صورت یک نیم‌نوسان بار می‌شود.



معمولاً القاگری $L_{\sigma\gamma}$ در مقابل L_c خیلی کوچک و قابل اغماض است. ضربان طبیعی مدار نوسانگر، که از C و L_c تشکیل می‌شود از رابطه زیر به دست می‌آید

$$\omega_c = \frac{1}{\sqrt{L_c \cdot C}} \quad (۶-۱۳)$$

اگر خازن خاموش کننده C در ابتدا به اندازه U_{c0} مثبت، بار شده باشد، مقدار لحظه‌ای فشار الکتریکی u_c در طول پدیده گذرا از رابطه زیر به دست خواهد آمد

$$u_c = U_{c0} \cos \omega_c t \quad (۷-۱۳)$$

فشار الکتریکی U_{c0} به خودی خود مشخص نیست و در انتهای یک دوره کامل وصل و قطع محاسبه خواهد شد.

پدیده تخلیه و باز پر شدن منفی خازن خاموش کننده تا $\omega_c t = \pi$ ، یعنی یک نیم نوسان، ادامه می‌یابد. زیرا در این لحظه دیود D_c قطع می‌گردد و فشار الکتریکی u_c منفی و برابر $-U_{c0}$ می‌شود (به شکل ۴-۱۳ مراجعه شود).

مدت زمان t_c'' این نیم نوسان از رابطه زیر به دست می‌آید و حدود ۱۰۰ تا ۲۰۰ میکروثانیه است

$$t_c'' = \frac{\pi}{\omega_c} = \pi \sqrt{L_c \cdot C} \quad (۸-۱۳)$$

برای اینکه مدار خاموش کننده به درستی بار شود و بتواند کنتاکتور ایستا را قطع کند، لازم است کنتاکتور ایستا دست کم مدتی معادل t_c'' به حالت وصل بماند.

۶-۲-۱۳ محاسبه پدیده قطع

برای قطع کنتاکتور ایستا، تیرستور کمکی T_a روشن می‌شود. خازن خاموش کننده C در دو تیرستور T_p و T_a ، که عملاً یک اتصال کوتاه تشکیل می‌دهند، تخلیه می‌شود. مع هذا القاگری $L_{\sigma\gamma}$ که اثرش دیگر قابل اغماض نیست، سرعت افزایش جریانی i_c را محدود می‌کند. اگر در تقریب نخست، از تغییر فشار الکتریکی u_c حاصل از تخلیه جزئی خازن خاموش کننده، صرف نظر شود، می‌توان نوشت

$$L_{\sigma\gamma} \frac{di_c}{dt} = -u_c = U_{c0} \quad (۹-۱۳)$$

و برای جریان i_c نتیجه زیر به دست می آید

$$i_c = \frac{U_{c0}}{L_{\sigma 2}} t \quad (10-13)$$

جریان i_c در تیرستور اصلی T_p ، در جهت مخالف جریان دایم I_d عبور می کند. به محض اینکه جریان i_{Tp} صفر می شود، تیرستور اصلی قطع می گردد. «زمان نزول جریان (t'_d) » با قرار دادن $i_c = I_d$ در رابطه (10-13) چنین به دست می آید

$$t'_d = \frac{L_{\sigma 2} I_d}{U_{c0}} \quad (11-13)$$

این زمان نزول فقط چند میکروثانیه است. طی این مدت، خازن خاموش کننده C قسمتی از بار خود را تخلیه می کند. با در نظر گرفتن انرژیهای خازنی و القایی مدار مربوط به آن، می توان فشار الکتریکی u_{c1} را در لحظه قطع تیرستور اصلی تعیین کرد.

در ابتدا هیچ جریانی از طریق القاگری نشی $L_{\sigma 2}$ عبور نمی کند ولی در انتها این جریان به مقدار I_d می رسد. این تغییر جریان با افزایش انرژی مغناطیسی به اندازه $L_{\sigma 2} I_d^2 / 2$ همراه است. این انرژی را خازن خاموش کننده C فراهم آورده که انرژی خازنی اش به همان اندازه کاهش یافته است. تراز (بیان) تغییرات انرژی عبارت خواهد بود از

$$L_{\sigma 2} \frac{I_d^2}{2} = C \frac{U_{c0}^2 - u_{c1}^2}{2} \quad (12-13)$$

در نتیجه داریم

$$u_{c1} = - \sqrt{U_{c0}^2 - \frac{L_{\sigma 2}}{C} I_d^2} \quad (13-13)$$

معمولاً جمله دوم در برابر U_{c0}^2 خیلی کوچک است. اگر بجای رادیکال، دو جمله اول بسط به سری آن را قرار دهیم، رابطه زیر به دست می آید

$$u_{c1} = - U_{c0} \left(1 - \frac{1}{2} \frac{L_{\sigma 2}}{C} \frac{I_d^2}{U_{c0}^2} \right) \quad (14-13)$$

روند تغییرات فشار الکتریکی u_c و جریانهای i_{Tp} و i_c در شکل ۵-۱۳ نشان داده شده‌اند.

پس از قطع شدن تیرستور اصلی، جریان I_d از طریق خازن C و تیرستور کمکی T_a می‌گذرد. بنابراین از این پس جریان i_c ثابت و برابر I_d و فشار الکتریکی u_c چنین است

$$u_c = u_{c1} + \frac{I_d}{C} \tau \quad (۱۵-۱۳)$$

در این رابطه، زمان τ مطابق شکل ۵-۱۳ از لحظه خاموش شدن تیرستور اصلی اندازه‌گیری می‌شود.

فشار الکتریکی u_d در دو سربار در این حالت برابر است با

$$u_d = U_c - u_c \quad (۱۶-۱۳)$$

و با توجه به رابطه (۱۵-۱۳) می‌توان نوشت

$$u_d = U_c - u_{c1} - \frac{I_d}{C} \tau \quad (۱۷-۱۳)$$

فشار الکتریکی u_d در دو سربار، پس از جهشی بزرگ، به‌صورت تابعی خطی از زمان کاهش پیدا می‌کند (شکل ۵-۱۳). این فشار الکتریکی در $t_c = \tau$ صفر می‌شود. t_c هم از رابطه (۱۷-۱۳) و به‌صورت زیر به‌دست می‌آید و حدود ۵۰ تا ۱۵۰ میکروثانیه است.

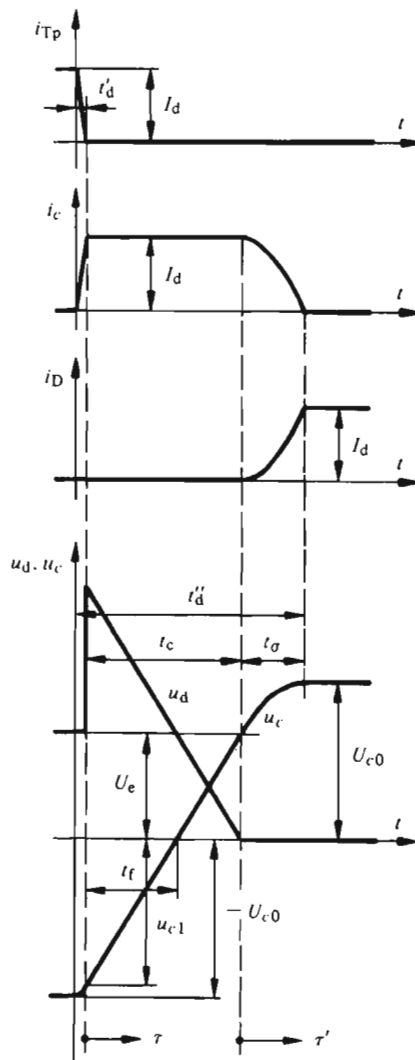
$$t_c = \frac{C(U_c - u_{c1})}{I_d} \quad (۱۸-۱۳)$$

فشار الکتریکی u_d نمی‌تواند منفی شود، زیرا دیود D شروع به هدایت می‌کند و فشار الکتریکی u_d را صفر می‌سازد.

مع‌هذا پدیده قطع هنوز پایان نیافته و باید جریان $i_c = i_{Ta}$ که از تیرستور کمکی می‌گذرد، صفر بشود. این جریان از طریق القاگرهای اتصالات

$$L_\sigma = L_{\sigma1} + L_{\sigma2} \quad (۱۹-۱۳)$$

که از تغییرات سریع جریان جلوگیری می‌کند، می‌گذرد. این القاگرها باخازن خاموش-



شکل ۵-۱۳ روند تغییرات جریانها و فشارهای الکتریکی در موقع قطع شدن کنتاکتور ایستا.

کننده C مدار نوسانگری تشکیل می دهند که چون دیود D هادی است، با فشار الکتریکی U_e تغذیه می شود. ضربان طبیعی این مدار نوسانگر عبارت است از

$$\omega_o = \frac{1}{\sqrt{L_o C}} \quad (13-20)$$

مطابق شکل ۱۳-۵، جریان i_e در طول ربع دوره تشدید مدار نوسانگر به صفر می‌رسد. این زمان که با t_o نشان داده می‌شود برابر است با

$$t_o = \frac{\pi}{\omega_o} = \frac{\pi}{\omega_o} \sqrt{L_o C} \quad (13-21)$$

در طول این زمان، فشار الکتریکی u_e در دو سر خازن خاموش کننده C افزایش می‌یابد و به مقدار نهایی U_{eo} مربوط به فشار الکتریکی اولیه در پدیده وصل می‌رسد (شکل ۱۳-۴).

فشار الکتریکی U_{eo} را می‌توان از انرژی مغناطیسی و خازنی تعیین کرد. جریان i_e که از القاگری L_o می‌گذرد، از I_d تا صفر تقلیل می‌یابد که معادل کاهش انرژی مغناطیسی به مقدار $L_o I_d^2 / 2$ است. این انرژی در خازن C ذخیره می‌شود. در ابتدا، یعنی در لحظه‌ای که دیود D شروع به هدایت می‌کند، فشار الکتریکی u_e برابر U_e و انرژی خازنی اولیه برابر $C U_e^2 / 2$ است. در طول فاصله زمانی t_o ، منبع تغذیه با فشار الکتریکی U_e انرژی اضافی تحویل می‌دهد که باعث افزایش بار Q خازن می‌شود. برای این انرژی رابطه زیر برقرار است

$$U_{eo} \int_0^{t_o} i_e d\tau' = U_e \Delta Q = U_e C (U_{eo} - U_e) \quad (13-22)$$

تراز (بیلان) کلی انرژی خازنی نهایی برای خازن خاموش کننده عبارت است از

$$C \frac{U_{eo}^2}{2} = C \frac{U_e^2}{2} + L_o \frac{I_d^2}{2} + C (U_{eo} U_e - U_e^2) \quad (13-23)$$

از ساده کردن رابطه فوق نتیجه می‌شود

$$C (U_{eo}^2 - 2 U_{eo} U_e + U_e^2) = L_o I_d^2 \quad (13-24)$$

و بالاخره فشار الکتریکی U_{eo} به صورت زیر درمی‌آید

$$U_{eo} = U_e + \sqrt{\frac{L_o}{C}} I_d \quad (13-25)$$

این رابطه، فشار الکتریکی اولیه را برای وصل بعدی کنتاکتور ایستا مشخص می کند. زمان کل پدیده قطع عبارت است از

$$t_d'' = t_d' + t_c + t_e \quad (۱۳-۲۶)$$

قبل از سپری شدن این فاصله زمانی، نباید تیرستور T_p ، برای وصل مجدد کنتاکتور ایستا روشن شود، وگرنه خازن C به اندازه کافی جهت تضمین خاموش شدن بعدی تیرستور اصلی بار نخواهد شد.

۱۳-۲-۲ دیود قطع کننده

در انتهای فاصله زمانی در نظر گرفته شده در بند پیش، فشار الکتریکی دوسرخازن خاموش-کننده برابر U_{e0} است که بنا بر رابطه (۱۳-۲۵)، از فشار الکتریکی تغذیه (U_e) بیشتر است. توجه به طرح واره شکل ۱۳-۱، نشان می دهد که در این حالت خازن C می تواند از طریق القاگریهای ناشی L_{e1} و L_{e2} ، منبع تغذیه (فشار الکتریکی U_e)، دیود D ، القاگری L_e و دیود D تخلیه شود. بدین ترتیب مدار نوسانگر دیگری متشکل از خازن C و القاگری $L_{e1} + L_{e2} + L_e$ وجود دارد. در این مدار تنها یک نیم نوسان رخ می دهد، زیرا، دیود D_e از عوض شدن جهت جریان در آن جلوگیری می کند. در پایان این نیم نوسان، فشار الکتریکی U_{e0}' در دوسرخازن خاموش کننده را می توان از روی تراز انرژی (بیان) انرژی محاسبه کرد. جریان جاری در القاگریها در ابتدا و انتها صفر و تغییر کلی انرژی مغناطیسی هم در این فاصله زمانی صفر است. خازن C در ابتدا دارای انرژی خازنی $CU_{e0}^2/2$ است. در طول نیم نوسان، انرژی معینی از طرف خازن به منبع تغذیه داده می شود که به ترتیب زیر به دست می آید

$$U_e \int_{i_e}^{i_e'} dt'' = -U_e \Delta Q = -U_e C (U_{e0} - U_{e0}') \quad (۱۳-۲۷)$$

بنابراین انرژی خازنی نهایی عبارت است از

$$C \frac{U_{e0}^2}{2} = C \frac{U_{e0}'^2}{2} - U_e C (U_{e0} - U_{e0}') \quad (۱۳-۲۸)$$

از رابطه فوق نتیجه می شود

$$U_{e0}'^2 - 2U_e U_{e0}' + U_{e0} (2U_e - U_{e0}) = 0 \quad (۱۳-۲۹)$$

ریشه‌های این معادله درجه دوم عبارتند از

$$U'_{eo} = U_e \pm \sqrt{U_e^2 - U_{eo}(2U_e - U_{eo})} \quad (13-30)$$

اگر در رابطه بالا مقدار U_{eo} از رابطه (۱۳-۲۵) قرار داده شود، پس از ساده کردن نتیجه زیر بدست می‌آید

$$U'_{eo} = U_e (+) \sqrt{\frac{L_g}{C} I_d} \quad (13-31)$$

در اینجا فقط ریشه با علامت منفی قابل قبول است و گر نه $U'_{eo} = U_{eo}$ می‌شود. چنانکه پیداست در این حالت فشار الکتریکی دوسرخازن خاموش کننده کوچکتر از فشار الکتریکی تغذیه U_e است. اختلاف بین U'_{eo} و U_e با القاگری L_g و جریان I_d افزایش می‌یابد. این کاهش فشار الکتریکی U'_{eo} نامطلوب است، زیرا در پدیده وصل بعدی کنتا کتور ایستا، به عنوان شرط اولیه داریم $U'_{eo} < U_e$. مقدار کم U'_{eo} اثر نامطلوبی بر روی خاموش شدن بعدی جریان داریم می‌گذارد.

چنانکه در شکل ۱۳-۱ به طور خط چین نشان داده شده، برای جلوگیری از این تخلیه جزیی خازن خاموش کننده، «دیود قطع کننده» D_b در مدار قرار می‌گیرد. این دیود از عبور جریانی که در ابتدای این بند به آن اشاره رفت جلوگیری می‌کند. در این حالت فشار الکتریکی دوسرخازن خاموش کننده برابر مقدار U_{eo} داده شده در رابطه (۱۳-۲۵)، باقی می‌ماند. بنابراین چنانکه قبلاً در بند ۱۳-۲-۶ بیان شد، این فشار الکتریکی به عنوان مقدار اولیه برای پدیده وصل بعدی ظاهر می‌شود.

نتیجه فوق بدون دیود قطع کننده D_b و با گذاشتن یک تیرستور به جای دیود D_e نیز به دست می‌آید. برای اینکه خازن خاموش کننده بتواند، در دوران وصل کنتا کتور ایستا، به طور منفی بار شود، این تیرستور باید به طور همزمان با تیرستور اصلی T_p روشن بشود. در طول کموتاسیون اجباری (پدیده قطع)، این تیرستور به حالت قطع می‌ماند. مدار اولیه نشان داده شده در شکل ۱۲-۲، در مواردی که القاگرهای L_g بزرگ اند، باید به ترتیب فوق تکمیل شود. اگر این القاگرها کوچک باشند، کاهش U'_{eo} نسبت به U_e ناچیز است و اجباری برای وارد کردن دیود قطع کننده نیست.

۱۳-۳ تعیین ابعاد مدار خاموش کننده

۱۳-۱-۳ زمان حفاظت

پس از خاموش شدن تیرستور اصلی (اولین مرحله قطع کنتا کتور ایستا)، در مدت زمان

مشخصی يك فشار الكتريكي منفي بين آند وكاتد پديد می آيد. اين زمان كه با t_f مشخص می شود می تواند به عنوان «زمان حفاظت» در نظر گرفته شود.

بنا بر شكل ۱۳-۱، چون تيرستور كمكي هادي است ($u_{Ta} = 0$)، فشار الكتريكي u_{Tp} بين آند وكاتد تيرستور اصلي قطع شده، برابر فشار الكتريكي خازن خاموش كننده (u_c) است.

با قراردادن $u_c = 0$ در رابطه (۱۳-۱۵)، می توان زمان حفاظت t_f را به دست آورد (به شكل ۱۳-۵ مراجعه شود)

$$t_f = C \frac{(-u_{c1})}{I_d} \quad (۱۳-۳۲)$$

بدین ترتیب، زمان حفاظت با عكس جریان دایم I_d كه باید خاموش شود متناسب است.

برای اینکه قطع مطمئن تيرستور اصلي تضمین شود، باید زمان حفاظت t_f از زمان قطع t_q تيرستور اصلي بزرگتر باشد (به بند ۳-۲ مراجعه شود)

$$t_f > t_q \quad (۱۳-۳۳)$$

درمبدلهاي ایستای با كموتاسیون اجباری، تيرستورهای سریع به كار می روند كه زمان قطعی در حدود ۱۰ تا ۵۰ میکروثانیه دارند. زمان حفاظت t_f بهتر است ۲۰ تا ۵۰ درصد بیشتر از زمان قطع t_q انتخاب شود.

۱۳-۳-۲ تعیین خازن خاموش كننده

ظرفیت خازن خاموش كننده باید طوری تعیین شود كه مینیمم (كمینه) زمان حفاظت ($t_{f \min}$)، قطع جریان دایم ماگزیمم ($I_{d \max}$) را تضمین كند. از معادله (۱۳-۳۲) نتیجه می شود

$$C = \frac{I_{d \max} t_{f \min}}{(-u_{c1})} \quad (۱۳-۳۴)$$

فشار الكتريكي u_{c1} به خودی خود مشخص نیست. چون افت فشار الكتريكي در طول خاموشی تيرستور اصلي معمولاً كوچك است، می توان به جای u_{c1} ، $-U_{c0}$ قرار داد (به شكل ۱۳-۵ مراجعه شود). فشار الكتريكي U_{c0} از رابطه (۱۳-۲۵) به ازای $I_d = I_{d \max}$ محاسبه می شود. چنانكه پیداست، خود این فشار الكتريكي نیز بستگی به ظرفیت C دارد. با تبدیل u_{c1} به $-U_{c0}$ بنا بر رابطه (۱۳-۲۵)، برای ظرفیت C معادله

درجه دومی به صورت زیر حاصل می شود

$$C^2 - \left[2 \frac{I_{d \max} t_{f \min}}{U_e} + \left(\frac{I_{d \max}}{U_e} \right)^2 L_\sigma \right] C + \left(\frac{I_{d \max} t_{f \min}}{U_e} \right)^2 = 0 \quad (۳۵-۱۳)$$

و از این معادله نتیجه زیر بدست می آید

$$C = \frac{I_{d \max}}{U_e} \left[t_{f \min} - \frac{L_\sigma}{2} \frac{I_{d \max}}{U_e} \left(\sqrt{1 + 2 \frac{U_e t_{f \min}}{I_{d \max} L_\sigma}} - 1 \right) \right] \quad (۳۶-۱۳)$$

این رابطه در حالتیایی معتبر است که از تخلیه جزئی خازن خاموش کننده جلوگیری شده باشد (وجود دیود قطع کننده D_d در شکل ۱-۱۳). بدین ترتیب باید برای ریشه علامت - را در نظر گرفت. اگر دیود قطع کننده موجود نباشد، باید برای ریشه علامت + را برگزید. در این حالت، ظرفیت C خازن خاموش کننده بزرگتر می شود. انتخاب خازن نه تنها به ظرفیت C بلکه به جریان مؤثر $I_{e \text{ eff}}$ که از آن می گذرد نیز بستگی دارد. با در نظر گرفتن روند تغییرات جریان i_e در شکل های ۱۳-۴ و ۱۳-۵، به طور تقریبی می توان نوشت

$$I_{e \text{ eff}} \cong \sqrt{\frac{1}{T_p} \left(\frac{1}{2} I_e^2 t_e'' + I_d^2 t_d'' \right)} \quad (۳۷-۱۳)$$

مقدار اوج I_e در بند بعدی محاسبه خواهد شد.

۳-۳-۱۳ تعیین القای L_e

لحاظی L_e در مدار خاموش کننده، زمان t_e'' نیم نوسان لازم را برای تعویض جهت فشار الکتریکی u_e در دو سر خازن خاموش کننده، در موقع وصل کنتاکتور ایستا تعیین می کند. در طول این نیم نوسان، جریان i_e به مقدار اوج I_e خود می رسد. از تراز (بیان) انرژی نتیجه می شود

$$C \frac{U_{e0}^2}{2} = L_e \frac{I_e^2}{2} \quad (۳۸-۱۳)$$

$$I_c = \sqrt{\frac{C}{L_c} U_{c0}} \quad (13-39)$$

با انتخاب يك مقدار ماگزیمم (بیشینه) قابل قبول برای دامنه جریان ($I_{c adm}$)، برای اینکه قیمت خازن خاموش کننده و تیرستور کمکی محدود شود، می توان رابطه زیر را جهت محاسبه القاگری L_c به دست آورد

$$L_c = C \left(\frac{U_{c0 max}}{I_{c adm}} \right)^2 \quad (13-40)$$

که $U_{c0 max}$ از رابطه (13-25) به ازای $I_d = I_{d max}$ به دست می آید.
از بردن رابطه (13-40) در رابطه (13-8) عبارت جدیدی برای زمان t_c'' به دست می آید

$$t_c'' = \pi C \frac{U_{c0 max}}{I_{c adm}} \quad (13-41)$$

بنابراین بین مینیمم (کمینه) زمان وصل (t_c'') و مقدار اوج $I_{c adm}$ رابطه ای وجود دارد. برای مقادیر کوچک t_c'' باید اوج جریان I_c بزرگ باشد. این امر ایجاب می کند که خازن خاموش کننده و تیرستور کمکی دارای تحمل جریان بالا و در نتیجه قیمت بیشتری باشند.

۱۳-۴ محاسبه دقیق پدیده کموتاسیون اجباری

۱۳-۴-۱ کلیات

در بند ۱۳-۲ پدیده گذرای وصل و قطع کنتاکتور ایستا را با این فرض ساده کننده که القاگری L بارینهاست، محاسبه کردیم. در نتیجه جریان دایم I_d ای کاملاً صاف به دست آمد.

در اینجا، این پدیده گذرا را با در نظر گرفتن القاگری بار مشخص و محدود، دقیقتر محاسبه خواهیم کرد.

علاوه بر اینکه جریان دایم توج دارد (به بند ۱۲-۶ مراجعه شود)، در موقع قطع کنتاکتور ایستا، خازن خاموش کننده C با القاگری L بار، مداری نوسانی تشکیل می دهد. این امر در کموتاسیون اجباری جریانهای دایمی که نسبت به $I_{d max}$ کوچک هستند تأثیر مهمی دارد.



از طرف دیگر، القاگری محدود، در موقع وصل کنتاکتور ایستا، عملاً هیچ اثری بر پدیده گذرا ندارد.

مرحله اول قطع (زمان نزول i_d') و مرحله سوم آن (زمان t_o) نیز از القاگری بار تأثیری نمی پذیرند. بنابراین، در اینجا به مطالعه فاصله زمانی t_c که طی آن جریان i_d از طریق خازن خاموش کننده می گذرد و باعث بارشدن مثبت آن می شود، اکتفا خواهد شد.

۱۳-۴-۲ روابط بنیادی

پس از خاموش شدن جریان در تیرستور اصلی T_p ، جریان بار i_d به عبور خود از طریق خازن C و تیرستور کمکی ادامه می دهد (شکل ۱۳-۳-ب). به کمک شکل ۱۳-۱ روابط زیر را می توان نوشت

$$-U_c + u_c + R i_d + (L_{o1} + L_{o2} + L) \frac{di_d}{dt} + U_i = 0 \quad (13-42)$$

$$i_c = i_d = C \frac{du_c}{dt} \quad (13-43)$$

با به کار بردن القاگری کل مدار مورد نظر

$$L_t = L_{o1} + L_{o2} + L \quad (13-44)$$

واز بردن روابط (۱۳-۴۲) و (۱۳-۴۳) به میدان تبدیل لاپلاس، نتیجه می شود

$$-\frac{U_c - U_i}{s} + U_c + (R + sL_t)I_d - L_t i_{d1} = 0 \quad (13-45)$$

$$I_d = sC U_c - C u_{c1} \quad (13-46)$$

مطابق معمول، در میدان تبدیل لاپلاس، متغیرها با حروف بزرگ نمایش داده شده اند. i_{d1} مقدار اولیه جریان دایم در لحظه قطع کنتاکتور ایستاست (به شکل ۱۲-۱۸ مراجعه شود). در فاصله زمانی کوتاه نزول جریان در تیرستور اصلی (i_d')، جریان i_d عملاً تغییر نمی کند. u_{c1} مقدار اولیه فشار الکتریکی در دوسرخازن خاموش کننده است و از معادله (۱۳-۴۶) با قرار دادن i_{d1} به جای I_d به دست می آید.

از روابط (۴۵-۱۳) و (۴۶-۱۳) نتیجه می شود

$$I_d = \frac{U_e - U_i - u_{e1} + s L_t i_{d1}}{1 + s R C + s^2 L_t C} C \quad (47-13)$$

و

$$U_e = \frac{U_e - U_i + s (L_t i_{d1} + R C u_{e1}) + s^2 L_t C u_{e1}}{s (1 + s R C + s^2 L_t C)} \quad (48-13)$$

برای تبدیل معکوس لاپلاس هم باید از رابطه زیر استفاده کرد

$$L^{-1} \left[\frac{s \cos \varphi + (1/T) \cos \varphi + \omega \sin \varphi}{s^2 + 2s/T + (1/T^2 + \omega^2)} \right] = e^{-t/T} \cos(\omega t - \varphi) \quad (49-13)$$

۳-۴-۱۳ روند تغییرات جریان دایم

ابتدا به بررسی جریان دایم می پردازیم و معادله (۴۷-۱۳) را به صورت زیر می نویسیم

$$I_d = \frac{s i_{d1} + \frac{1}{L_t} (U_e - U_i - u_{e1})}{s^2 + s \frac{R}{L_t} + \frac{1}{L_t C}} \quad (50-13)$$

این رابطه را به قیاس رابطه (۴۹-۱۳) می توان چنین نوشت

$$I_d = \hat{I}_d \frac{s \cos \varphi_i + \frac{1}{T_t} \cos \varphi_i + \omega_t \sin \varphi_i}{s^2 + 2s \frac{1}{T_t} + \left(\frac{1}{T_t^2} + \omega_t^2 \right)} \quad (51-13)$$

از مقایسه جمله به جمله این دو عبارت داریم

$$T_t = 2 \frac{L_t}{R} \quad (52-13)$$

$$\omega_t = \sqrt{\frac{1}{L_t C} - \frac{1}{4} \left(\frac{R}{L_t} \right)^2} \quad (53-13)$$

$$\hat{I}_d \cos \varphi_i = i_{d1} \quad (54-13)$$

$$\hat{I}_d \left(\frac{1}{T_t} \cos \varphi_i + \omega_t \sin \varphi_i \right) = \frac{U_e - U_i - u_{c1}}{L_t} \quad (55-13)$$

از دو رابطه اخیر نتیجه می‌شود

$$\hat{I}_d = \frac{i_{d1}}{\cos \varphi_i} \quad (56-13)$$

$$\tan \varphi_i = \left(2 \frac{U_e - U_i - u_{c1}}{R i_{d1}} - 1 \right) \frac{1}{\omega_t T_t} \quad (57-13)$$

بنابراین روند تغییرات زمانی جریان i_d عبارت است از

$$i_d = \hat{I}_d e^{-\tau/T_t} \cos(\omega_t \tau - \varphi_i) \quad (58-13)$$

زمان τ از لحظه قطع شدن تیرستور اصلی اندازه‌گیری می‌شود.

۴-۴-۱۳ روند تغییرات فشار الکتریکی دوسر خازن خاموش‌کننده

برای تعیین روند تغییرات فشار الکتریکی u_e در دوسر خازن خاموش‌کننده، معادله (۴۸-۱۳) را بدکسرهای ساده‌تری تجزیه می‌کنیم. برای این منظور، رابطه کلی زیر را به کار می‌بریم

$$\frac{a_0 + s a_1 + s^2 a_2}{s(1 + s b_1 + s^2 b_2)} = \frac{c_0}{s} + \frac{c_1 + s c_2}{1 + s b_1 + s^2 b_2} \quad (59-13)$$

با ضرب طرفین در $(1 + s b_1 + s^2 b_2)$ و مقایسه جمله‌هایی که در طرفین، توانهای مساوی از s دارند، ضرایب c_0 ، c_1 و c_2 به ترتیب زیر به دست می‌آیند

$$c_0 = a_0 \quad \text{و} \quad c_1 = a_1 - a_0 b_1 \quad \text{و} \quad c_2 = a_2 - a_0 b_2 \quad (60-13)$$

به کمک این رابطه‌های کلی معادله (۴۸-۱۳) را می‌توان به صورت زیر تبدیل کرد

$$U_c = \frac{U_e - U_i}{s} - \frac{(U_e - U_i - u_{c1})RC - L_t i_{d1} + s(U_e - U_i - u_{c1})L_t C}{1 + sRC + s^2 L_t C} =$$

$$= \frac{U_e - U_i}{s} - \frac{s(U_e - U_i - u_{c1}) + (U_e - U_i - u_{c1}) \frac{R}{L_t} - \frac{i_{d1}}{C}}{s^2 + s \frac{R}{L_t} + \frac{1}{L_t C}} =$$

$$= \frac{U_e - U_i}{s} - \hat{U}_c \frac{s \cos \varphi_u + \frac{1}{T_t} \cos \varphi_u + \omega_t \sin \varphi_u}{s^2 + 2s \frac{1}{T_t} + \left(\frac{1}{T_t^2} + \omega_t^2 \right)} \quad (61-13)$$

از مقایسه جمله‌های دارای توانهای مساوی از s نتیجه می‌شود

$$T_t = 2 \frac{L_t}{R} \quad (62-13)$$

$$\omega_t = \sqrt{\frac{1}{L_t C} - \frac{1}{4} \left(\frac{R}{L_t} \right)^2} \quad (63-13)$$

$$\hat{U}_c = \frac{U_e - U_i - u_{c1}}{\cos \varphi_u} \quad (64-13)$$

$$\tan \varphi_u = \left(1 - 2 \frac{L_t}{R C} \frac{i_{d1}}{U_e - U_i - u_{c1}} \right) \frac{1}{\omega_t T_t} \quad (65-13)$$

با استفاده از رابطه (65-13) و با در نظر گرفتن $\epsilon(t) = [1/s]^{-1}$ ، تبدیل معکوس لاپلاس معادله (61-13) به صورت زیر درمی‌آید

$$u_c = U_e - U_i - \hat{U}_c e^{-\tau/T_t} \cos(\omega_t \tau - \varphi_u) \quad (66-13)$$

ثابت زمانی T_t و ضریب تضعیف ω_t همانهایی هستند که در محاسبه جریان دایم بیان شده‌اند.

۱۳-۴-۵ زمان حفاظت و مدت زمان کموتاسیون

فشار الکتریکی بین دو سر تیرستور اصلی قطع شده (T_p)، را رابطه زیر به دست می دهد

$$u_{Tp} = L_{\sigma\gamma} \frac{di_c}{dt} + u_c \cong u_c \quad (13-67)$$

که در آن $i_c = i_d$ است. معمولاً جمله اول $L_{\sigma\gamma} di_c/dt$ در مقابل جمله دوم u_c قابل اغماض است. این فشار الکتریکی ابتدا منفی است و قطع شدن مطمئن تیرستور اصلی را تضمین می کند. زمان حفاظت t_f که طی آن u_{Tp} کوچکتر از صفر است باید از زمان لازم برای خاموش شدن تیرستور اصلی (t_q) بیشتر باشد. معادله (۱۳-۶۶)، به ازای $u_c = 0$ ، معادله ای غیر جبری است که محاسبه زمان حفاظت t_f را امکان پذیر می سازد. پدیده گذرای مورد نظر ادامه پیدا می کند تا اینکه

$$u_d = U_c - (L_{\sigma\gamma} + L_{\sigma\gamma}) \frac{di_d}{dt} - u_c \cong U_c - u_c = 0 \quad (13-68)$$

به کمک معادله (۱۳-۶۶) و با قرار دادن $u_c = U_c$ ، می توان مدت زمان کموتاسیون (t_c) را محاسبه کرد (شکل ۱۳-۵). در اینجا هم با حل معادله ای غیر جبری سروکار داریم. پس از گذشت مدت زمان t_c ، دیود D دوباره هادی می شود و اتصال کوتاهی را بین مدار خاموش کننده و مدار بار با جریان دایم اعمال می کند.

۱۳-۴-۶ روابط ساده شده

به کار بردن روابط دقیق بیان شده در بالا مشکل است. برای تعیین روند تغییرات جریان دایم i_d و فشار الکتریکی u_c در دوسرخازن خاموش کننده، بهتر است فرضهای ساده کننده به کار ببریم. معمولاً $\tau/T_i \ll 1$ است و می توان فرض کرد که $e^{-\tau/T_i} = 1$. بدین ترتیب معادله (۱۳-۵۸) را با وارد کردن رابطه (۱۳-۵۶)، می توان چنین نوشت

$$\begin{aligned} i_d &= \hat{I}_d e^{-\tau/T_i} \cos(\omega_i \tau - \varphi_i) = \\ &= \hat{I}_d (\cos \omega_i \tau \cos \varphi_i + \sin \omega_i \tau \sin \varphi_i) = \\ &= i_{d1} (\cos \omega_i \tau + \sin \omega_i \tau \tan \varphi_i) \end{aligned} \quad (13-69)$$

با در نظر گرفتن رابطه (۱۳-۵۷) و با به کار بردن تقریبهایی زیر

$$\cos \omega_i \tau \cong 1 - \frac{1}{2} (\omega_i \tau)^2 \quad (13-70)$$

$$\sin \omega_t \tau \cong \omega_t \tau, \quad RC \ll 1 \quad (71-13)$$

خواهیم داشت

$$i_d = i_{d1} + \left(U_c - U_i - u_{c1} - \frac{R i_{d1}}{2} \right) \frac{\tau}{L_t} - \frac{i_{d1} \tau^2}{2 C L_t} \quad (72-13)$$

این رابطه تقریب بسیار خوبی از روند تغییرات واقعی را می‌دهد. برای به دست آوردن عبارت تقریبی فشار الکتریکی u_c هم می‌توان روشی مشابه به کار برد. مع هذا i_d با جریان i_c برابر است و فشار الکتریکی u_c را می‌توان از انتگرال i_c به دست آورد. با در نظر گرفتن مقدار اولیه $u_c = u_{c1}$ نتیجه می‌شود

$$\begin{aligned} u_c &= \frac{1}{C} \int i_c d\tau = \\ &= u_{c1} + \frac{i_{d1}}{C} \tau + \left(U_c - U_i - u_{c1} - \frac{R i_{d1}}{2} \right) \frac{\tau^2}{2 C L_t} - \frac{i_{d1} \tau^3}{6 C^2 L_t} \end{aligned} \quad (73-13)$$

این رابطه نیز نتایج خوبی می‌دهد ولی برای محاسبه تقریبی، هنوز هم خیلی پیچیده است. برای این منظور می‌توان به تابعی خطی از τ به صورت زیر اکتفا کرد

$$u_c \cong u_{c1} + \frac{i_{d1}}{C} \tau \quad (74-13)$$

بنابراین اگر به جای i_{d1} ، جریان I_d قرار داده شود، رابطه (75-13) به دست می‌آید.

۷-۴-۱۳ بار نهایی خازن خاموش کننده

پس از هادی شدن دوباره دیود D، فشار الکتریکی دو سر خازن خاموش کننده تا مقدار نهایی U_{c0} افزایش پیدا می‌کند. این مقدار را می‌توان به کمک رابطه (75-13) با قراردادن i'_{d1} به جای I_d که مقدار جریان داریم در آخر فاصله زمانی t_c است، محاسبه کرد. بنابراین داریم

$$U_{c0} = U_c + \sqrt{\frac{L_g}{C}} i'_{d1} \quad (75-13)$$

جریان i'_{d1} از رابطه (76-13) و به ازای $\tau = t_c$ به دست می‌آید

$$i'_{d1} = I_d e^{-t_c/T_t} \cos(\omega_t t_c - \varphi_i) \quad (76-13)$$

۱۳-۴-۸ مثال عددی

برای دادن تصور درستی از پدیده گذرا در موقع وصل و قطع کنتاکتور ایستای به کار رفته به صورت برشگر جریان دایم، روند تغییرات جریانها و فشارهای الکتریکی برای داده‌های زیر محاسبه شده است.

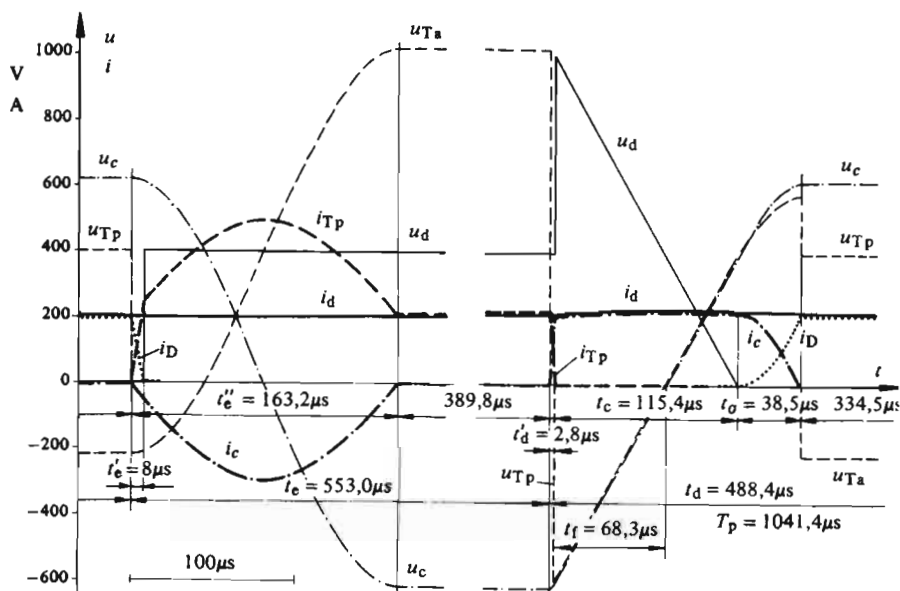
$R = 0.008 \, \Omega$, $L = 4 \, \text{mH}$, $T = 0.005 \, \text{s}$ داده‌های پار :

داده‌های مدار خاموش کننده: $L_{a1} = 16 \mu\text{H}$, $L_{a2} = 8 \mu\text{H}$, $L_a = 24 \mu\text{H}$

 $C = 25 \mu F$, $L_c = 100 \mu H$.

نتایج محاسبات عددی برای وصل و قطع کنتاکتور ایستا به ازای نقطه کار $U_e = 400V$ ، $U_i = 250V$ و $i_{d1} = 200A$ ، در شکل ۱۳-۶ نشان داده شده‌اند.

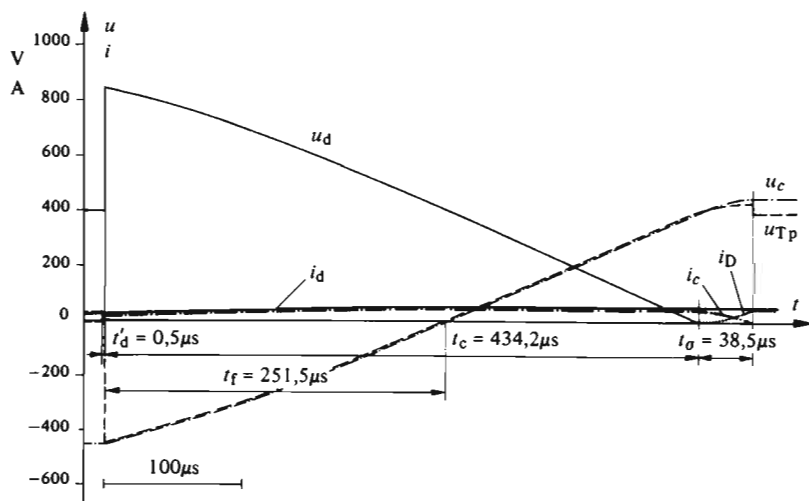
درموقع خاموش شدن تیرستور اصلی، در اثر جهش بزرگ فشار الکتریکی u_H در دوسر بار، باینکه این تیرستور دیگر هادی نیست، جریان دایم i_H اندکی افزایش می یابد. فشار الکتریکی u_{Tp} بین آند و کاتد تیرستور اصلی، در طول زمان حفاظت $t_f = 683 \mu s$ منفی است. این زمان از زمان لازم برای خاموش شدن تیرستور سریع، که برای تیرستور مورد نظر برابر $t_q = 40 \mu s$ است، بیشتر است. بنابراین خاموش شدن مطمئن تیرستور اصلی تضمین می شود.



شکل ۱۳-۶ روند تغییرات جریانها و فشارهای الکتریکی در طول وصل و قطع کنتاکتور ایستا برای مثال عددی با $i_{d1} = 200 \text{ A}$.

این محاسبات به فرض وجود دیود قطع کننده D_0 انجام شده است. در انتهای پدیده قطع کنتاکتور ایستا، فشار الکتریکی u_c در مقدار $U_{c0} = 620\text{ V}$ باقی می ماند. بدون وجود دیود قطع کننده، خازن خاموش کننده تا $U_{c0} = 180\text{ V}$ تخلیه می شود. این فشار الکتریکی اولیه می تواند زمان حفاظت t_f را تا مقدار $158\mu\text{s}$ ، که مطلقاً پذیرفتنی نیست، کاهش دهد.

زمان لازم برای دوباره بار شدن خازن خاموش کننده در طول وصل و قطع، بیشینه فرکانس ضربانی برشگر جریان دایم را تعیین می کند. در حالت شکل ۱۳-۶ این زمان برابر $3171\mu\text{s} = 385 + 1154 + 1632$ است. بنابراین بیشینه فرکانس ضربانی در این حالت به مقدار $f_{p\max} = 1/(3171 \times 10^{-6}) = 315\text{ kHz}$ محدود می شود. فرکانس ضربانی برشگرهای جریان دایم معمولاً بین 500 Hz و 1 kHz قرار دارد. این محدودیت نه تنها به زمان کموتاسیون بیان شده در بالا، بلکه همچنین به تلفات کموتاسیون نیز بستگی دارد. این تلفات می توانند در کاربرد تیرستورها اثر قابل توجهی بگذارند.



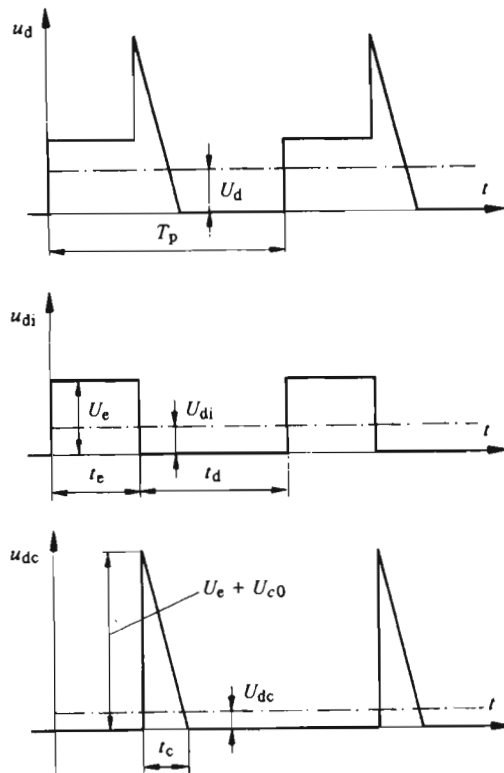
شکل ۱۳-۷ روند تغییرات جریانها و فشارهای الکتریکی در دوران قطع کنتاکتور ایستا برای مثال عددی با $i_{d1} = 30\text{ A}$.

شکل ۱۳-۷ روند تغییرات پدیده گذرای قطع کنتاکتور ایستا را برای همان داده ها ولی با جریان دایم ضعیفتر $i_{d1} = 30\text{ A}$ نشان می دهد. ملاحظه می شود که زمان کموتاسیون اجباری به مقدار قابل توجهی افزایش یافته و $t_c = 434.2\mu\text{s}$ است. در عوض فشار الکتریکی اولیه در دوسر خازن خاموش کننده بیشتر از $U_{c0} = 620\text{ V}$ نیست.

۱۳-۵ اثر کموتاسیون اجباری بر فشار الکتریکی دایم

۱۳-۵-۱ کلیات

چنانکه از شکل‌های ۱۳-۵ تا ۱۳-۷ برمی‌آید، کموتاسیون اجباری در موقع قطع کنتاکتور ایستا باعث به وجود آمدن اضافه فشار الکتریکی مثلث گونه‌ای بر روی فشار الکتریکی لحظه‌ای u_d در دو سر بار می‌شود و مقدار متوسط فشار الکتریکی دایم U_d را افزایش می‌دهد.



شکل ۱۳-۸ تجزیه فشار الکتریکی دایم u_d به مؤلفه ایدئال u_{di} و مؤلفه ناشی از کموتاسیون اجباری.

برای کار با ضربان تکراری، می‌توان روند تغییرات فشار الکتریکی u_d را به مؤلفه‌ای ایدئال و مؤلفه ناشی از کموتاسیون اجباری تجزیه کرد (شکل ۱۳-۸).
از محاسبه مقدار متوسط فشار الکتریکی دایم ایدئال U_{di} و فشار الکتریکی دایم U_{dc}

ناشی از کموتاسیون اجباری، مقدار متوسط فشار الکتریکی دایم به صورت زیر به دست می آید

$$U_d = U_{di} + U_{dc} \quad (77-13)$$

۱۳-۵-۲ فشار الکتریکی ایدئال

برای فشار الکتریکی ایدئال از شکل ۸-۱۳ نتیجه می شود

$$U_{di} = \frac{t_c}{T_p} U_c \quad (78-13)$$

که همان مقدار متوسط تعریف شده به وسیله معادله (۳-۱۲) در مورد کار کرد ایدئال، با صرف نظر کردن از اثر کموتاسیون اجباری است.

۱۳-۵-۳ فشار الکتریکی دایم ناشی از کموتاسیون اجباری ($L = \infty$)

اگر القاگری بار بینهایت یا به عبارت دیگر جریان دایم I_d کاملاً صاف در نظر گرفته شود، مؤلفه U_{dc} به صورت تپهایی مثلثی خواهد بود.

هرگاه به جای u_{c1} ، با تقریب کافی، $-U_{co}$ را قرار دهیم (به شکل ۵-۱۳ مراجعه شود)، مطابق شکل ۸-۱۳ تپهای مثلثی، مقدار بیشینه ای برابر با $U_c + U_{co}$ و مدت زمانی برابر t_c خواهند داشت.

بنابراین مقدار متوسط مؤلفه ناشی از کموتاسیون اجباری عبارت است از

$$U_{dc} = \frac{t_c}{2T_p} (U_c + U_{co}) \quad (79-13)$$

که با بردن مقدار t_c از رابطه (۱۸-۱۳) و مقدار $u_{c1} = -U_{co}$ از رابطه (۲۵-۱۳) در آن نتیجه می شود

$$U_{dc} = \frac{C \left(2U_c + \sqrt{\frac{L_c}{C}} I_d \right)^2}{2 I_d T_p} \quad (80-13)$$

بهتر است در رابطه بالا، به جای C جلو پرانتز، با وارد کردن زمان حفاظت کمینه

$t_{f \min}$ رابطه (۱۳-۳۴) به کار برده شود. در این صورت داریم

$$U_{dc} = \gamma \frac{I_{d \max}}{I_d} \frac{t_{f \min}}{T_p} \frac{\left(U_e + \frac{1}{\gamma} \sqrt{\frac{L_\sigma}{C}} I_d \right)^2}{U_e + \sqrt{\frac{L_\sigma}{C}} I_{d \max}} \quad (۸۱-۱۳)$$

و

$$U_{dc} = U_e \frac{t_{f \min}}{T_p} \gamma \frac{I_{d \max}}{I_d} \frac{\left(1 + \frac{1}{\gamma} \sqrt{\frac{L_\sigma}{C}} \frac{I_d}{U_e} \right)^2}{1 + \sqrt{\frac{L_\sigma}{C}} \frac{I_{d \max}}{U_e}} \quad (۸۲-۱۳)$$

بنابراین مؤلفه U_{dc} ناشی از کموتاسیون اجباری به جریان دایم I_d بستگی دارد. در حالت بی‌باری یعنی برای $I_d = 0$ ، $U_{dc} = \infty$ به دست می‌آید. و این از آنجا ناشی می‌شود که القاگری L بار بینهایت فرض شده است. چنانکه قبلاً بیان کردیم، این فرض برای جریانهای دایمی که نسبت به $I_{d \max}$ کوچک هستند قابل قبول نیست و محاسبه باید با $L \neq \infty$ انجام پذیرد.

۴-۵-۱۳ فشار الکتریکی دایم ناشی از کموتاسیون اجباری ($L \neq \infty$)

برای به دست آوردن رابطه‌ای جهت U_{dc} که برای مقادیر کوچک I_d نیز معتبر باشد، ضرورت دارد از نتیجه‌گیری بند ۴-۱۳ که در آن القاگری L بار مشخص و غیرمحدود فرض شد استفاده شود.

به کمک معادله (۶۶-۱۳)، برای فشار الکتریکی دایم در دو سر بار، نتیجه زیر به دست می‌آید

$$u_d = U_e - u_c = U_i + \hat{U}_e e^{-\tau/T_t} \cos(\omega_t \tau - \varphi_u) \quad (۸۳-۱۳)$$

معمولاً $t_c/T_t \ll 1$ است و تابع نمایی را می‌توان برابر یک در نظر گرفت. با بسط $\cos(\omega_t \tau - \varphi_u)$ و بردن \hat{U}_e از رابطه (۶۴-۱۳) و $\tan \varphi_u$ از رابطه (۶۵-۱۳)، پس از ساده کردن، نتیجه می‌شود

$$u_d = U_i + (U_e - U_i - u_{c1}) \left(\cos \omega_t \tau + \frac{1}{\omega_t T_t} \sin \omega_t \tau \right) - \frac{i_{d1}}{\omega_t C} \sin \omega_t \tau \quad (۸۴-۱۳)$$

در حالت‌های معمولی، با حفظ تقریبی خوب، فرض‌های ساده‌کننده دیگری نیز ممکن است به کار برد. یعنی می‌توان چنانکه قبلاً نیز انجام شده به جای u_{c1} مطابق رابطه (۱۳-۷۵)، $U_c - U_o$ قرار داد، برای مقادیر مختلف جریان دایم فرض کرد: $i_{d1} \cong i_{d1} \cong I_d$ (که I_d مقدار متوسط جریان دایم است) و بالاخره از مقاومت اهمی R بار صرف نظر کرد ($T_t = \infty$). بدین ترتیب رابطه زیر به دست می‌آید

$$u_d \cong U_i + \left(\gamma U_c - U_i + \sqrt{\frac{L_o}{C}} I_d \right) \cos \omega_t \tau - \sqrt{\frac{L_t}{C}} I_d \sin \omega_t \tau \quad (۱۳-۸۵)$$

زمان t_c را می‌توان به روش آزمون و خطا و به ازای $u_d = 0$ تعیین کرد. مقدار متوسط فشار الکتریکی دایم ناشی از کموتاسیون اجباری، از رابطه زیر به دست می‌آید

$$U_{dc} = \frac{1}{T_p} \int_0^{t_c} u_d d\tau = \frac{1}{T_p} \left[U_i t_c + \left(\gamma U_c - U_i + \sqrt{\frac{L_o}{C}} I_d \right) \frac{\sin \omega_t t_c}{\omega_t} - L_t I_d (1 - \cos \omega_t t_c) \right] \quad (۱۳-۸۶)$$

برای اینکه رابطه فوق به شکلی قابل مقایسه با رابطه (۱۳-۸۲)، که برای حالت ایدئال معتبر است، درآید، عامل‌های U_c و $t_{f \min}$ را ظاهر می‌کنیم

$$U_{dc} = U_c \frac{t_{f \min}}{T_p} \left[\frac{U_i}{U_c} \frac{t_c}{t_{f \min}} + \left(\gamma - \frac{U_i}{U_c} + \sqrt{\frac{L_o}{C}} \frac{I_d}{U_c} \right) \frac{\sin \omega_t t_c}{\omega_t t_{f \min}} - \frac{L_t I_d}{U_c} \frac{1 - \cos \omega_t t_c}{t_{f \min}} \right] \quad (۱۳-۸۷)$$



برای تبدیل عبارت $L_t/t_{f \min}$ در جمله آخر می توان ابتدا صورت و مخرج را در

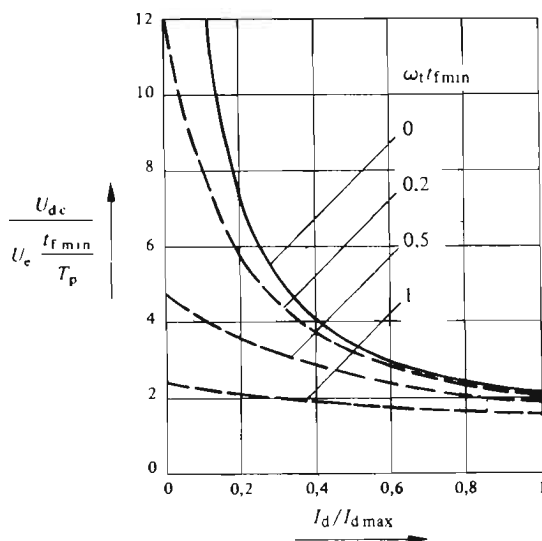
$t_{f \min}$ ضرب کرد و به جای مقدار این کمیت در صورت، از روابط (۳۴-۱۳)، $U_{c1} = -U_{c0}$

(۲۵-۱۳) و $I_d = I_{d \max}$ استفاده کرد. با توجه به اینکه به ازای $R=0$ ، ضریب ان طبعی $\omega_t = 1/\sqrt{L_t C}$ است نتیجه می شود

$$\begin{aligned} \frac{L_t}{t_{f \min}} &= \frac{L_t t_{f \min}}{t_{f \min}^2} = \frac{L_t C \left(U_c + \sqrt{\frac{L_\sigma}{C}} I_{d \max} \right)}{I_{d \max} t_{f \min}^2} \\ &= \frac{U_c}{I_{d \max}} \frac{1 + \sqrt{\frac{L_\sigma}{C}} \frac{I_{d \max}}{U_c}}{(\omega_t t_{f \min})^2} \end{aligned} \quad (۸۸-۱۳)$$

با وارد کردن ضریب

$$k_u = \sqrt{\frac{L_\sigma}{C}} \frac{I_{d \max}}{U_c} \quad (۸۹-۱۳)$$



شکل ۹-۱۳ مؤلفه فشار الکتریکی دایم U_{dc} ناشی از کموتاسیون اجباری بر حسب جریان دایم I_d .

$$U_{dc} = U_e \frac{t_{f \min}}{T_p} \left[\frac{U_i}{U_e} \frac{t_c}{t_{f \min}} + \left(\gamma - \frac{U_i}{U_e} + k_u \frac{I_d}{I_{d \max}} \right) \frac{\sin \omega_t t_c}{\omega_t t_{f \min}} - \right. \\ \left. - (1 + k_u) \frac{I_d}{I_{d \max}} \frac{1 - \cos \omega_t t_c}{(\omega_t t_{f \min})^2} \right] \quad (90-13)$$

شکل ۹-۱۳ تغییرات نسبت U_{dc} به $U_e t_{f \min} / T_p$ را بر حسب نسبت I_d به $I_{d \max}$ برای $U_i / U_e = 0.5$ و $k_u = 0.5$ نشان می دهد و در آن $\omega_t t_{f \min}$ در حکم پارامتر است. ملاحظه می شود که رابطه (۸۲-۱۳) مربوط به $\omega_t t_{f \min} = 0$ برای جریانهای دایم I_d ای که در مقابل $I_{d \max}$ کوچک اند نتایج مطلوبی نمی دهد و هر چه $\omega_t t_{f \min}$ بیشتر باشد، تفاوت نمایانتر است.



فصل چهاردهم

اندولرهای با کموتاسیون اجباری

کارکرد ایدئال

۱۴-۱ مقدمه

۱۴-۱-۱ کلیات

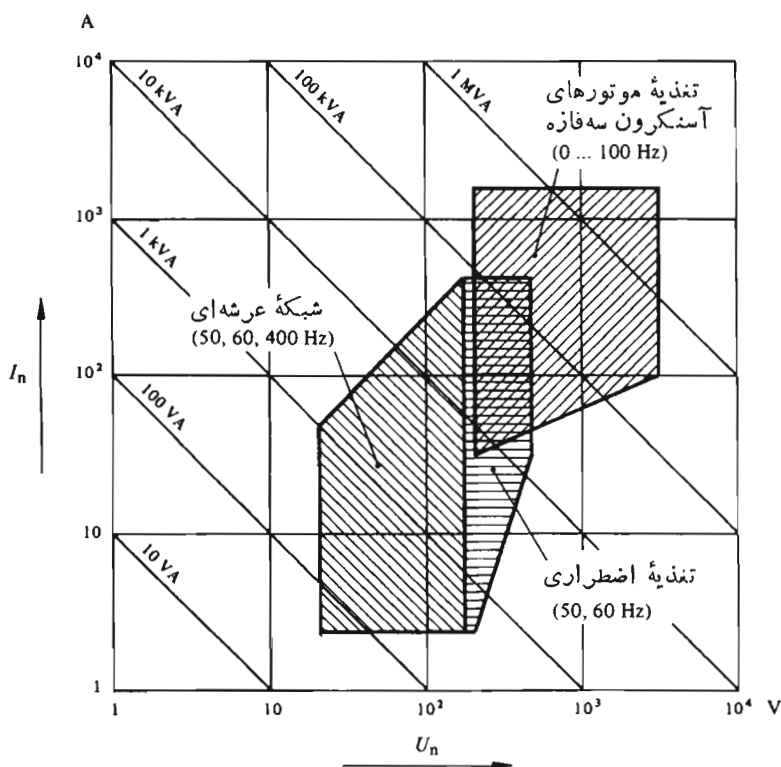
اندولرهای با کموتاسیون اجباری تولید فشارهای الکتریکی متناوب با فرکانس متغیر را از منبع فشار الکتریکی دایم امکان پذیر می سازند. چون کموتاسیون این اندولرها با مدارهای خاموش کننده ای که جزء ادغام شده اندولر است تضمین می شود، بار می تواند غیر فعال، یعنی فاقد منبع فشار الکتریکی متناوب باشد. بسته به چگونگی سیستم متناوب خروجی تولید شده، اندولرها تک فازه و یا سه فازه اند و در آنها معمولاً علاوه بر قابل تغییر بودن فرکانس، دامنه فشار الکتریکی متناوب نیز می تواند متغیر باشد.

در بند ۱۴-۲ اتصال به صورت پل از اتصال بنیادی برشگر جریان دایم نتیجه گیری خواهد شد. بدین ترتیب در بند ۱۴-۳ اتصال اندولر تک فازه به دست می آید و امکانات مختلف برای تغییر فرکانس و فشار الکتریکی بیان خواهند شد. بالاخره بندهای ۱۴-۴ تا ۱۴-۶ به بررسی اندولرهای سه فازه اختصاص خواهند یافت.

برای اندولرهای با کموتاسیون اجباری، اتصالها و کارکردهای بسیار متنوعی وجود دارند. توسعه در این زمینه در حال حاضر بسیار فعال است. در زیر به تشریح چند شیوه اتصال اساسی اکتفا خواهد شد.

۱۴-۲ کاربردهای باکمو تاسیون اجباری

کاربردهای اندولرهای باکمو تاسیون اجباری بسیار فراوان و موارد استفاده از آنها روز-افزون اند. شکل ۱۴-۱ اساسی ترین این کاربردها را همراه فشارهای الکتریکی، جریانها و قدرتهای اسمی آنها نشان می دهد.



شکل ۱۴-۱ کاربردهای اندولرهای باکمو تاسیون اجباری.

اندولرهای باکمو تاسیون اجباری بیشتر برای تغذیه سه فاز و موتورهای آسنکرون با سرعت متغیر در تأسیسات ثابت و یا در وسایل حمل و نقل (کشند) به کار برده می شود. در این نوع کاربرد، اندولر کمو تاسیون اجباری قسمتی از مبدل فرکانس است (به فصل ۱۶ مراجعه شود). قدرتهای به کار رفته در این حالت بسیار زیادند.

تغذیه اضطراری که برای تأمین انرژی مصرف کننده هایی مانند ماشینهای حسابگر بزرگ، که تغذیه شان به هیچ وجه نباید قطع شود، از کاربردهای دیگر این اندولرهاست.

در این موارد، اندولر به وسیلهٔ باتری تغذیه می‌شود. این باتری مدام از طریق یک یکسو کننده به وسیلهٔ شبکهٔ تغذیهٔ متناوب پرمی‌شود. هنگام بروز اشکال در شبکهٔ تغذیه، تأمین انرژی در مدت زمانهایی کم و بیش طولانی به وسیلهٔ باتری تضمین می‌شود. کاربرد اندولرهای با کموتاسیون اجباری در این زمینه، کارآیی بسیار بالای آنها را نشان می‌دهد. کاربرد دیگر این اندولرها در شبکه‌های متحرک (هواپیما، وسایل حمل و نقل، واگونها) راه‌آهن (غیره) است. در این حالت اندولر از طریق باتری تغذیه می‌شود و انرژی دایم را به سیستمی با فشار الکتریکی و فرکانس ثابت تبدیل می‌کند.

۱۴-۳ فرضهای بررسی کارکرد ایدئال

برای مطالعهٔ کارکرد ایدئال اندولرهای با کموتاسیون اجباری در حالت پایا، در این فصل مدت زمان کموتاسیون اجباری صفر فرض می‌شود

$$t_c = 0 \quad (14-1)$$

این فرض مربوط به کنتاکتور ایدئال با زمان قطع صفر است. بنابراین، پدیدهٔ کموتاسیون اجباری که در حقیقت در یک فاصلهٔ زمانی مشخص صورت می‌پذیرد مورد بررسی قرار نمی‌گیرد.

۱۴-۲ نتیجه‌گیری اتصال به صورت پل

۱۴-۲-۱ کلیات

اندولر فشارهای الکتریکی دایم را به فشارهای الکتریکی متناوب، با فرکانس معمولاً قابل تغییر تبدیل می‌کند. در اینجا نیز مانند مبدل‌های جریان با کموتاسیون طبیعی، اتصال بر دو نوع است: ستاره‌ای (بانه نقطهٔ وسط) و به صورت پل. اتصال ستاره به یک ترانسفورماتور نیاز دارد که دارای پاره‌ای معایب از جمله برای کار در فرکانسهای پایین است. این اندولر که کاربرد چندانی ندارد، در اینجا مورد بحث قرار نمی‌گیرد. در عوض، اتصال به صورت پل را با استفاده از برشگر جریان دایم نتیجه‌گیری خواهیم کرد.

۱۴-۲-۲ صورتهای مختلف برشگر جریان دایم

در شکل‌های ۱۴-۲ تا ۱۴-۵ صورتهای مختلف برشگر جریان دایم، که کار آن را در یک یا دو ربع صفحهٔ مختصات جریان - فشار الکتریکی دایم (U_d و I_d) امکان پذیر می‌سازند، نشان

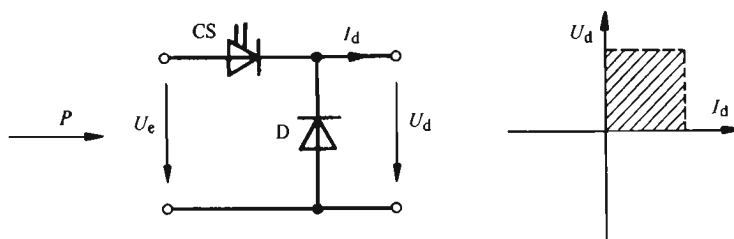


داده شده‌اند. اگر بار با جریان دایم خیلی القایی باشد، جریان I_d عملاً به کلی صاف است.

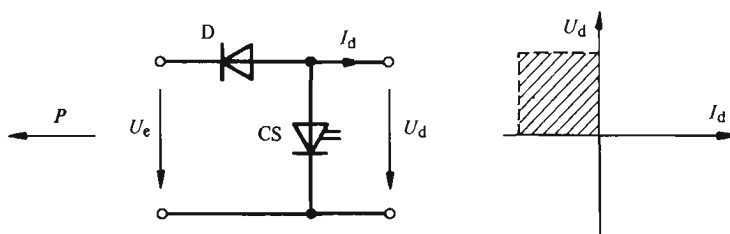
اتصال شکل ۲-۱۴ مربوط به اتصال شکل ۲-۱۲ است که در آن کنتاکتور ایستای CS به وسیله تیرستوری بادو ورودی کنترل، مشخص شده است. بار با جریان دایم از آنجا که در مباحث بعدی دخالت ندارد در این شکل نشان داده نشده است. مقدار متوسط فشار الکتریکی دایم (U_d) می‌تواند بین ۰ و U_e تغییر کند. U_e فشار الکتریکی ورودی برشگر جریان دایم است و جریان دایم I_d مثبت است.

در شکل ۳-۱۴ قسمتهای اصلی اتصال برشگر جریان دایمی با امکان بازپس‌گیری انرژی (به شکل ۲-۱۲ مراجعه شود) نشان داده شده است. مقدار متوسط فشار الکتریکی (U_d) بین ۰ و U_e قابل تغییر است و جریان دایم I_d منفی است.

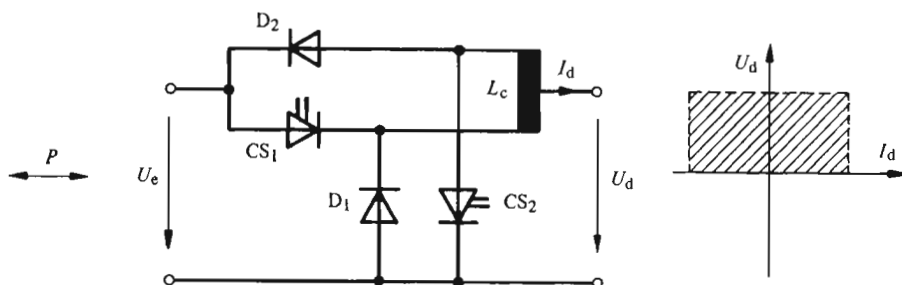
این دو اتصال را می‌توان به وسیله یک پیچک القاگر با نقطه وسط (L_e)، موازی به هم بست (شکل ۲-۱۴). این پیچک القاگر باید جریان گردشی را در موقع خاموش شدن هر کنتاکتور ایستا محدود کند (به قسمت ۳-۱۵ مراجعه شود). جریان دایم I_d هنگامی مثبت است که کنتاکتور ایستای CS_۱ به تنهایی قطع و وصل شود و کنتاکتور ایستای CS_۲ همواره قطع باشد. اما اگر کنتاکتور ایستای CS_۱ همواره قطع باشد و کنتاکتور ایستای CS_۲ به تنهایی قطع و وصل شود، این جریان منفی است. فشار الکتریکی دایم U_d همواره مثبت است و می‌توان آن را بین ۰ و U_e تغییر داد.



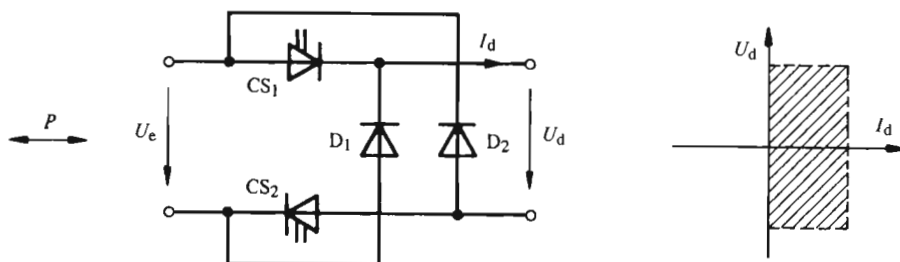
شکل ۲-۱۴ برشگر جریان دایم برای جریان مثبت.



شکل ۳-۱۴ برشگر جریان دایم برای جریان منفی (امکان بازپس‌گیری انرژی).



شکل ۱۴-۴ اتصال موازی دوبرشگر جریان داریم برای جریان مثبت و منفی.



شکل ۱۴-۵ اتصال دوبرشگر جریان داریم برای فشار الکتریکی مثبت و منفی.

اتصال شکل ۱۴-۵ عوض کردن جهت فشار الکتریکی داریم U_d را با جریان دائمی که همواره مثبت است، ممکن می‌سازد. این اتصال ترکیبی است از دو اتصال شکل ۱۴-۲ که در آن یکی از کنتاکتورهای ایستا در سیم برگشت قرار گرفته است. اگر کنتاکتور ایستای CS_p همواره در حالت وصل بماند و کنتاکتور ایستای CS_n به تناوب وصل و قطع شود، مقدار لحظه‌ای فشار الکتریکی خروجی بین U_e و ۰ طوری تغییر می‌کند که مقدار متوسط U_d مثبت باشد. در صورتی که کنتاکتور ایستای CS_n همواره وصل بماند و کنتاکتور ایستای CS_p به تناوب وصل و قطع شود، نیز همین نتیجه بدست می‌آید. در عوض چنانچه کنتاکتور ایستای CS_p همواره قطع باشد، در صورت وصل بودن کنتاکتور ایستای CS_n ، جریان I_d از طریق این کنتاکتور و دیود D_p عبور می‌کند. در این حالت فشار الکتریکی لحظه‌ای در خروجی برابر صفر است. اگر CS_n نیز قطع باشد، جریان I_d باید از طریق دیود D_p (همانند حالت قبل)، منبع تغذیه (فشار الکتریکی U_e در جهت عکس) و دیود D_n عبور کند. در این حالت مقدار لحظه‌ای فشار الکتریکی خروجی برابر $-U_e$ است. با قطع و وصل تناوبی کنتاکتور ایستای CS_n ، مقدار متوسط فشار الکتریکی

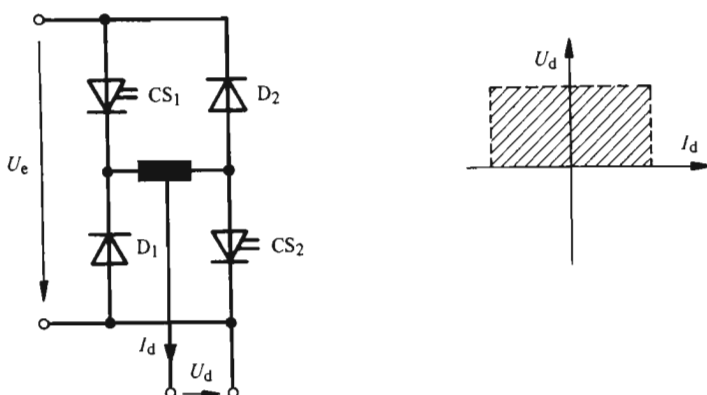


خروجی (U_d) را می‌توان بین 0 و $U_e -$ تغییر داد. بار متصل بدخروجی این اتصال باید بتواند جریان دائم I_d را در مقدار ثابتی نگه دارد (مانند حالت ماشین جریان دائمی که بدصورت مولد با فشار الکتریکی القا شده منفی کار می‌کند). اگر CS_1 همیشه قطع باشد و CS_2 بدتناوب قطع و وصل شود نیز همین نتیجه بدست می‌آید. طرز کار این اتصال شبیه طرز کار مبدل جریانی با کموتاسیون طبیعی است که زاویه تأخیر آتش آن بین 0° و 180° تغییر می‌یابد.

۳-۲-۱۴ اتصال به صورت پل

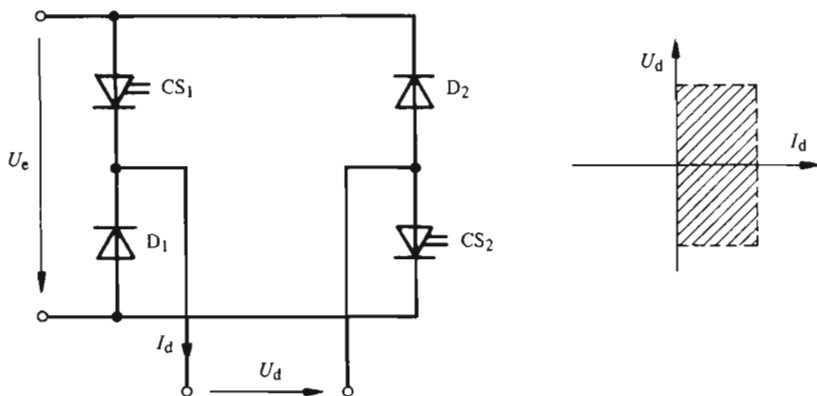
شکل‌های ۴-۱۴ و ۵-۱۴ را می‌توان بدصورت دیگری نیز نشان داد. ملاحظه می‌شود که اتصال شکل ۴-۱۴، اتصال موازی معکوس دوگانده‌ای از کنتاکتور ایستا و دیدود است که جهت محدود کردن جریان گردشی، با یک پیچک القاگر از هم جدا شده‌اند (به شکل ۱-۱۴ مراجعه شود). این اتصال، یک «شاخه اندولر» برای اندولرهای تک فازه و سه فازه است و تعویض جهت جریان I_d را امکان پذیر می‌سازد.

در عوض، اتصال شکل ۵-۱۴، اتصال پل ساده‌ای را نشان می‌دهد (بدشکل ۷-۱۴ مراجعه شود)، که فشار الکتریکی بدخروجی اش در قطار پل اخذ می‌شود. و بدشرط اینکه $0 < I_d$ باشد، تعویض جهت فشار الکتریکی بدخروجی را امکان پذیر می‌سازد.



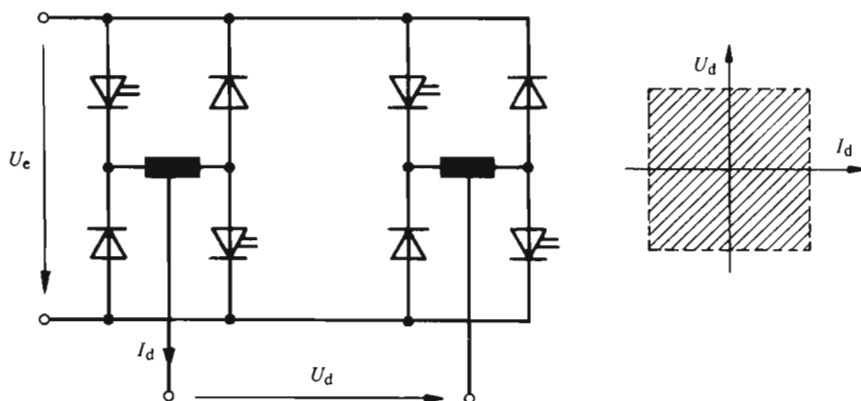
شکل ۶-۱۴ اتصال موازی معکوس دوگانه (شاخه اندولر).

هرگاه مطابق شکل ۸-۱۴ ازدو شاخه اندولر شکل ۶-۱۴ استفاده شود، اتصال پل کامل بدست می‌آید. این اتصال اجازه می‌دهد تا، علاوه بر معکوس ساختن فشار الکتریکی



شکل ۱۴-۷ اتصال پل ساده.

U_d ، بتوان جهت جریان I_d را نیز عوض کرد. بنابراین، این اتصال می‌تواند مانند مبدل جریان دوطرفه، در هر چهار ربع صفحه مختصات U_d و I_d کار کند. بساین ترتیب اتصال پلی بدست می‌آید که اساس اندولر تک‌فازه است.



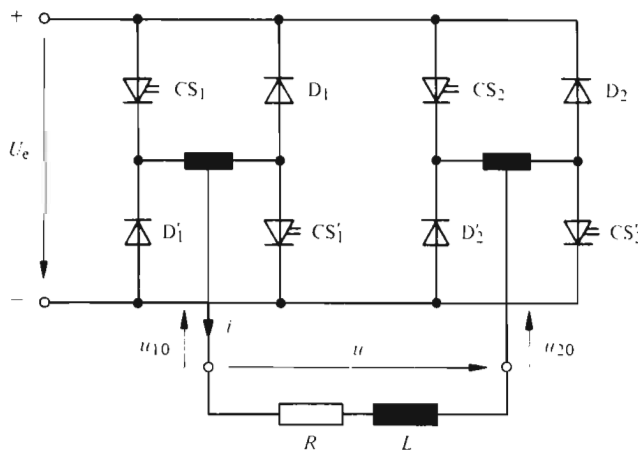
شکل ۱۴-۸ اتصال پل کامل

۳-۱۴ اندولرهای تک فازه

۱-۳-۱۴ کلیات

در زیر کارکرد «اندولر با اتصال پل تک فازه» مورد مطالعه قرار می گیرد. طرحواره اتصال مطابق شکل ۹-۱۴ است که در آن بار متصل به دوسر خروجی اندولر نیز نشان داده شده است. بار از مقاومت R و القاگر L تشکیل شده است.

در مورد این اتصال ابتدا حالت های مختلف هدایت بررسی خواهد شد تا پس از آن بتوان روند تغییرات فشار الکتریکی u و جریان i ، در خروجی اندولر را به دست آورد. بالاخره امکانات موجود جهت تغییر دادن فرکانس و دامنه فشار الکتریکی متناوب هم تشریح خواهند شد.



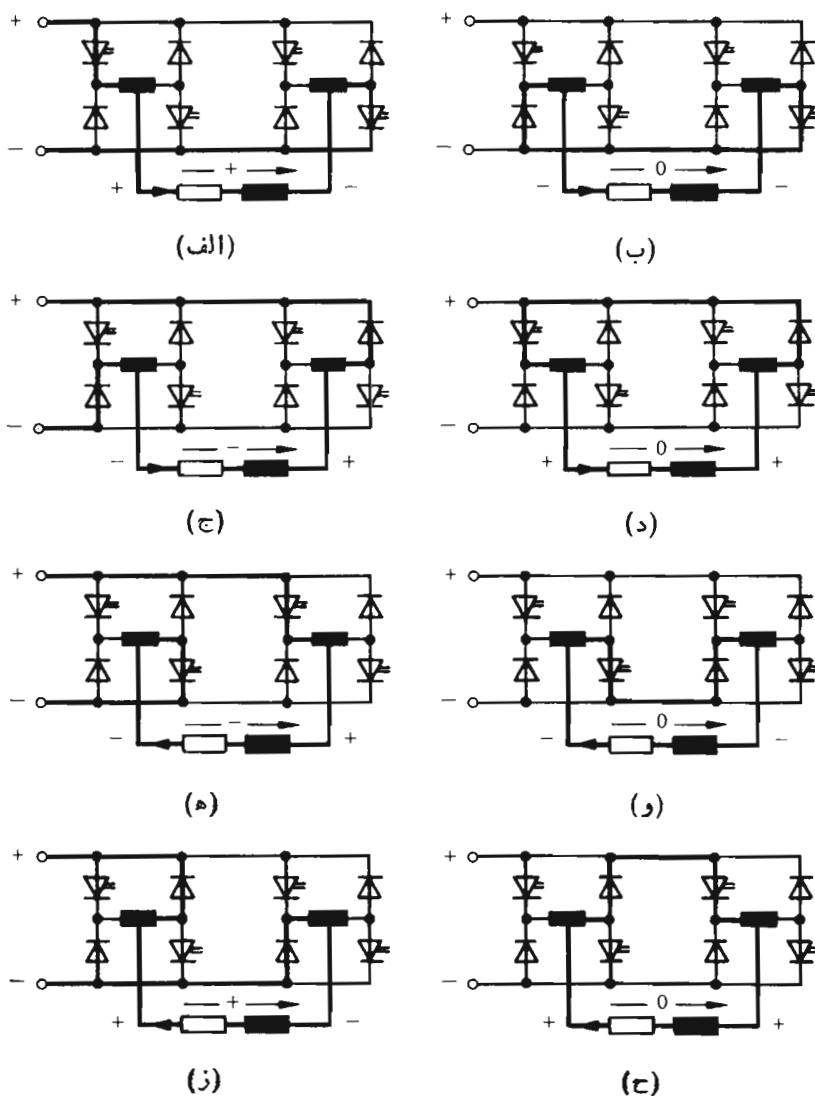
شکل ۹-۱۴ اندولر با اتصال، پل تک فازه.

گرچه اتصال تک فازه در عمل به ندرت مورد استفاده قرار می گیرد، مطالعه رفتار آن برای درک بهتر کارکرد اندولرهای سه فازه که بسیار متداول اند و در بندهای ۴-۱۴ تا ۶-۱۴ بررسی خواهند شد، بسیار مفید است.

۲-۳-۱۴ حالت های هدایت

در یک اندولر به صورت پل تک فازه، حالت های مختلف ممکن هدایت برای کنتاکتورهای ایستا و دیودها در شکل ۱۴-۱۵ نشان داده شده اند. برای هر جهت جریان بار (i) ، چهار

امکان وجود دارد بدین معنی که فشار الکتریکی خروجی مثبت، منفی، صفر با پتانسیل منفی و صفر با پتانسیل مثبت است (شکل‌های ۱۴-۱۵، الف تا د، و نیز ه تا ح). اگر جریان و فشار الکتریکی هم علامت باشند، جریان از طریق دو کنتاکتور ایستا عبور می‌کند (شکل‌های ۱۴-۱۵، الف و ه). در صورتی که این دو با علامت مخالف باشند، جریان از طریق دو



شکل ۱۴-۱۵ حالت‌های هدایت در یک اندولر به صورت پل تک فاز. در حالت‌های (الف) تا (د) جریان بار در جهت مثبت و در حالت‌های (ه) تا (ح) در جهت عکس عبور می‌کند.



دیود جاری می‌شود، (شکل‌های ۱۴-۱۵، ج و ز). هر گاه فشار الکتریکی u صفر باشد، جریان در یک شاخه از طریق یک کنتاکتور ایستاد و در شاخه دیگر از طریق یک دیود عبور می‌کند (شکل‌های ۱۴-۱۵، ب، د، و، و ح). در این حالتها، بار اتصال کوتاه شده است و هیچ جریانی از طریق منبع تغذیه (فشار الکتریکی ورودی U_e) نمی‌گذرد. با انتخاب مراحل فرمان مناسب برای کنتاکتورهای ایستاد می‌توان از یک حالت هدایت به حالت هدایت دیگر گذشت و چنانکه در بندهای آینده تشریح خواهد شد، بروند تغییرات فشار الکتریکی در دوسر بار اثر گذاشت.

۳-۳-۱۴ ترکیب فشار الکتریکی متناوب

برای تعیین روند تغییرات فشار الکتریکی u که به وسیله اندولر با اتصال پل تک فاز تولید می‌شود، بهتر است ابتدا منحنی «فشارهای الکتریکی شاخه‌ای» u_1 و u_2 ، بین سرخروجی هر شاخه و سر منفی فشار الکتریکی ورودی U_e (شکل ۱۴-۹)، به دست آیند.

هر گاه، بسته به جهت جریان خروجی از شاخه، کنتاکتور ایستای CS_1 و یا دیود D_1 هدایت کنند، فشار الکتریکی u_1 برابر U_e است و اگر کنتاکتور ایستای CS'_1 و یا دیود D'_1 هادی باشند این فشار الکتریکی صفر است. همین رابطه‌ها برای شاخه دیگر یعنی برای u_2 نیز برقرار است.

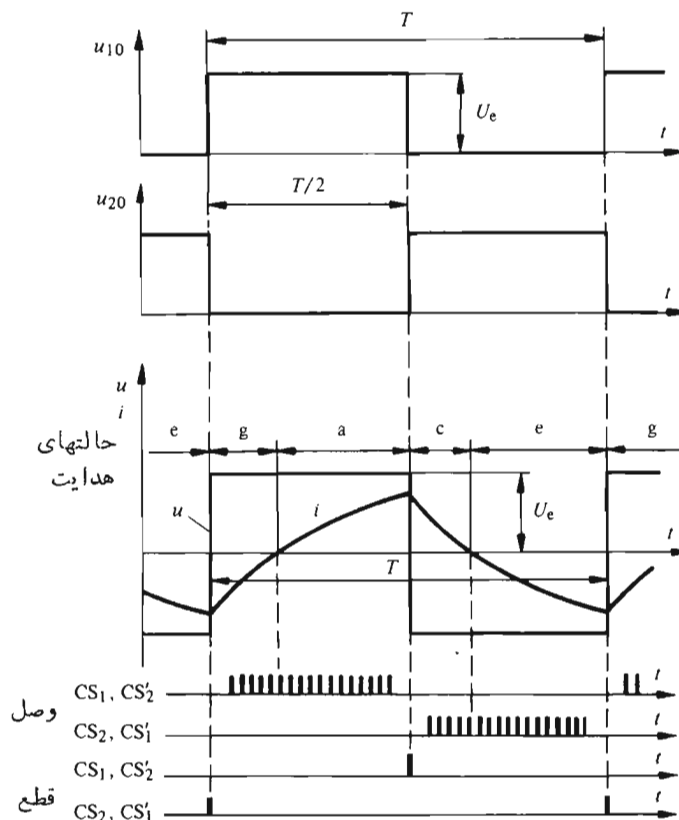
برای به دست آوردن ماکزیمم فشار الکتریکی متناوب u ، کنتاکتورهای ایستادوری فرمان داده می‌شوند که فشار الکتریکی u_1 در طول نیم دوره اول برابر U_e و در طول نیم دوره دوم برابر صفر باشد. فشار الکتریکی u_2 همان روند تغییرات را دارد، ولی به اندازه $T/2$ نسبت به u_1 جابجاء شده (به شکل ۱۴-۱۱ مراجعه شود). T «دوره موج اصلی» فشار الکتریکی متناوب است.

چنانکه از شکل ۱۴-۹ نتیجه می‌شود، فشار الکتریکی u در خروجی اندولر تک فاز از رابطه زیر به دست می‌آید

$$u = u_1 - u_2 \quad (14-2)$$

روند تغییرات فشار الکتریکی u مستطیلی است و در شکل ۱۴-۱۱ نشان داده شده است. در این شیوه کار کرد، برای عبور مستقیم از یک جهت فشار الکتریکی u به جهت دیگر، دو کنتاکتور ایستای CS_1 و CS'_1 یا CS_2 و CS'_2 همزمان با هم قطع می‌شوند. حالت‌های هدایتی مختلف مطابق شکل ۱۴-۱۵ است.

به لحاظ اهمی القایی بودن بار، جریان i نمی‌تواند به سرعت تغییر کند. این جریان به صورت نهایی با ثابت زمانی L/R تغییر می‌یابد و به طرف $+U_e/R$ یا $-U_e/R$ میل می‌کند. فاصله زمانی وجود دارد (حالت‌های هدایتی ز یا ج) که در طول آن جریان بار باید از طریق دیود عبور کند. موقعی که جریان بار از صفر می‌گذرد باید کنتاکتورهای



شکل ۱۴-۱۱ ترکیب فشار الکتریکی متناوب.

ایستای مربوط به آنها وصل شوند تا پیوستگی جریان تضمین بشود (حالت‌های هدایتی الف یا ه).

برای این منظور، معمولاً یک رشته تپ‌های روشن‌کننده اعمال می‌شود، زیرا لحظه عبور از صفر جریان i به خودی خود مشخص نیست. مدت زمان این رشته تپ‌ها باید اندکی کمتر از نصف دوره فشار الکتریکی خروجی باشد. در هر حال باید از روشن کردن دو کنتاکتور ایستای واقع در یک شاخه پل (مانند CS_1 و CS'_1 در شکل ۱۴-۹) خودداری بشود، وگرنه اتصال کوتاهی در شاخه مربوط به آن پیش می‌آید. تپ‌هایی که برای وصل و قطع کنتاکتورهای ایستا به کار می‌روند، نیز در شکل ۱۴-۱۱ نشان داده شده‌اند.

به جای استفاده از یک رشته تپ برای وصل کنتاکتورهای ایستا، می‌توان جریان i را



اندازه گیری کرد و عبور از صفر آن را مشخص ساخت. به محض اینکه جریان صفر می شود، کنتاکتور ایستای مربوط به آن به وسیله یک تپ تنها وصل می گردد.

۴-۳-۱۴ تغییر فرکانس

انجام تغییر فرکانس نسبتاً ساده است. بایک فشار الکتریکی مستطیلی، چنانکه در شکل ۱۴-۱۱ نشان داده شده است، ترتیب قرار گرفتن تپهای قطع کننده می تواند دوره موج اصلی (T) و در نتیجه فرکانس $f = 1/T$ آن را مشخص سازد. این فرکانس را می توان بین صفر (فشار الکتریکی و جریان دایم) و مقدار ماکزیمم (بیشینه ای) تغییر داد. بسا در نظر گرفتن کار کرد واقعی، مقدار ماکزیمم (بیشینه) فرکانس به توسط زمان مینیمم (کمینه) قطع که به مدت زمان کموتاسیون اجباری و تلفات کموتاسیون مربوط است (به بند ۳-۳-۲ مراجعه شود)، محدود می شود.

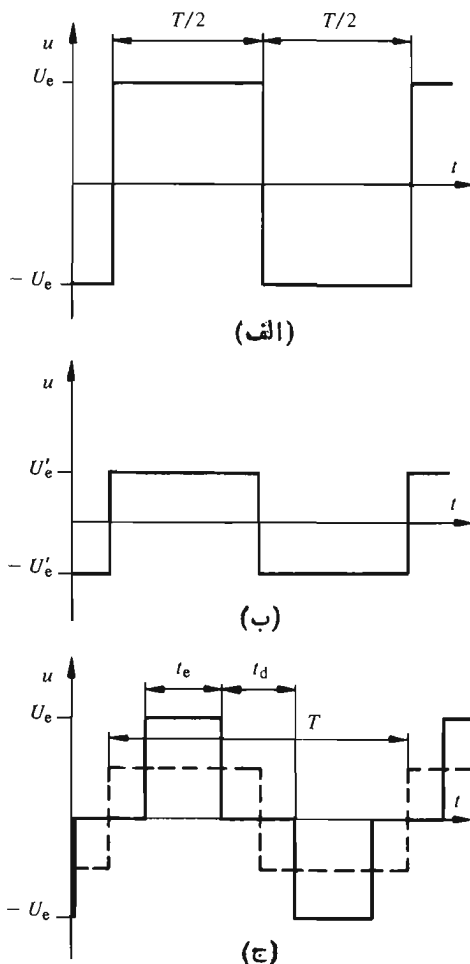
۵-۳-۱۴ تغییر مستطیلی فشار الکتریکی

ماکزیمم مقدار فشار الکتریکی باروند تغییرات مستطیلی در شکل ۱۴-۱۲ (الف) نشان داده شده است. در فاصله های زمانی یکسان و برابر $T/2$ ، فشار الکتریکی متناوب یکی از دو مقدار $U_e +$ و $U_e -$ را دارد.

برای تغییر مستطیلی فشار الکتریکی دوامکان وجود دارد و در هر دو حالت نسبت به فشار الکتریکی ماکزیمم کاهش حاصل می شود.

با کاهش فشار الکتریکی دایم U_e در ورودی پل اندولر (شکل ۱۴-۱۲ ب)، کاهش فشار الکتریکی متناوب امکان پذیر است. هرگاه U_e توسط یک مبدل جریان تولید شده باشد، انجام امر به سادگی صورت می گیرد. مع هذا باید توجه داشت که معمولاً بارخازن خاموش کننده در کنتاکتورهای ایستا با فشار الکتریکی U_e متناسب است. با کاهش این فشار الکتریکی، بارخازن خاموش کننده نیز کاهش پیدا می کند. از فشار الکتریکی مشخصی به پایین، مدار خاموش کننده قادر نخواهد بود تا جریان جاری در کنتاکتورهای ایستا را قطع کند. از این لحاظ این روش تغییر، (جز برای تغییرات کم) به کار نمی رود.

چنانکه شکل ۱۴-۱۲ (ج) نشان می دهد، مقدار متوسط فشار الکتریکی u در نیم دوره را می توان، با تبادل تناوبی آن بین $U_e +$ ، 0 ، $U_e -$ ، ...، نسبت به فشار الکتریکی مستطیلی ماکزیمم کاهش داد. تقلیل فشار الکتریکی، به مدت زمان وصل و قطع t_e و t_r بستگی دارد. مدت زمان وصل عبارت از فاصله های زمانی است که در آنها فشار الکتریکی u مخالف صفر است در صورتی که مدت زمان قطع مربوط به فاصله های زمانی است که در آنها فشار الکتریکی u صفر است. بنابراین فشار الکتریکی به صورت پله ای و متقارن تغییر می یابد. اگر $t_e \ll T/2$ باشد، هارمونیکهای از مراتب بالا در مقابل موج اصلی مهم خواهند بود. از این رو تغییر فشار الکتریکی در یک دامنه وسیع، مناسب نیست.



شکل ۱۴-۱۲ تغییر مستطیلی فشار الکتریکی.

۱۴-۳-۶ تغییر ضربانی فشار الکتریکی

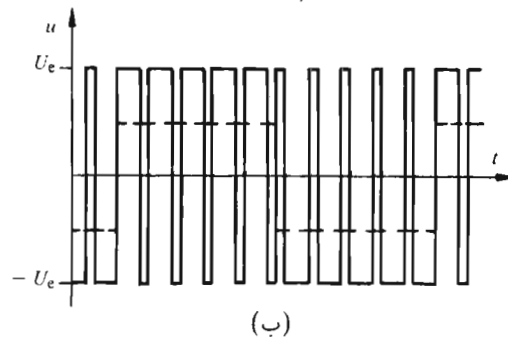
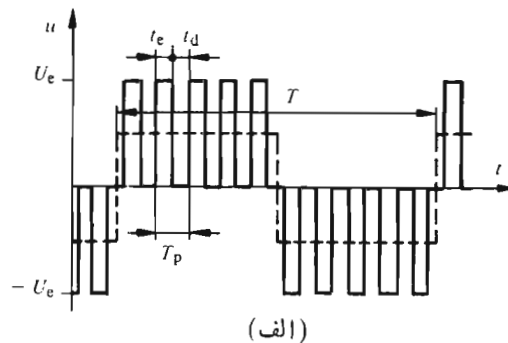
برای تغییر فشار الکتریکی در دامنه‌ای وسیع، از روشهایی که در شکل‌های ۱۴-۱۳ (الف) و (ب) نشان داده شده‌اند استفاده می‌شود. در طول هر نیم دوره $T/2$ ، فشار الکتریکی چندین بار بین مقادیر $+U_e$ و 0 یا 0 و $-U_e$ (شکل ۱۴-۱۳ الف) یا بین $+U_e$ و $-U_e$ (شکل ۱۴-۱۳ ب) تعویض می‌شود. انتخاب یکی از این دوامکان، به مدارهای فرمان و کارکرد خاص خاموش شدن کنتاکتورهای ایستابستگی دارد. در حالت شکل



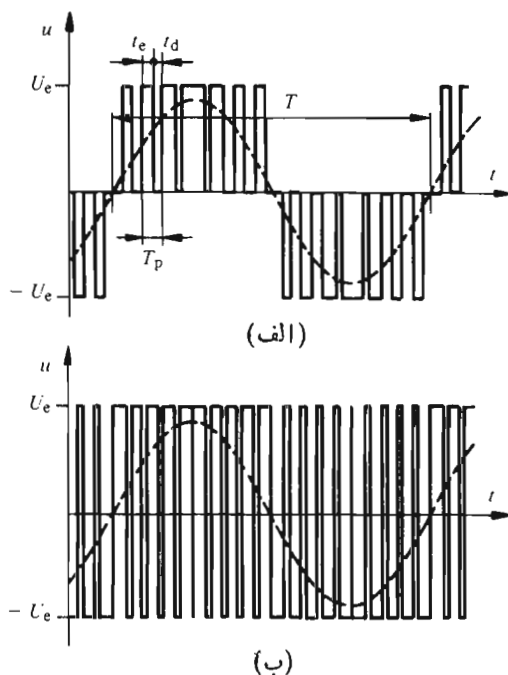
۱۳-۱۴ (الف) درهر نیم دوره، عمل کموتاسیون فقط در یکی از شاخه‌ها صورت می‌پذیرد. در صورتی که در حالت شکل ۱۳-۱۴ (ب) کموتاسیون در هر دو شاخه به‌طور هم‌زمان رخ می‌دهد.

در هر دو حالت، اصطلاح «تغییر به وسیله ضربان» به کار برده می‌شود. کاهش فشار الکتریکی به نسبت مدت زمان وصل t_e بر مدت زمان قطع t_d بستگی دارد. مجموع t_e و t_d دوره تب (T_p) است. چنانچه t_e و t_d ثابت باشند، در هر دوره موج اصلی (T) مقدار متوسط فشار الکتریکی مستطیل‌وار تغییر می‌یابد.

در شکل‌های ۱۴-۱۴ (الف) و (ب)، تغییر سینوسی مقدار متوسط در هر دوره موج اصلی (T) نشان داده شده است. مزیت این حالت، در این است که هارمونیک‌ها دارای فرکانس بالایی هستند و با فرکانس $f_p = 1/T_p$ رابطه دارند. جریان برای بارهای و القا، روندی تقریباً سینوسی با دوره‌ای برابر دوره موج اصلی (T) پیدا می‌کند. در این روش تغییر ضربانی که «روش زیرنوسانی» نیز نامیده می‌شود، مدت زمانهای وصل و قطع t_e و t_d به‌طور مداوم تغییر می‌یابند.



شکل ۱۳-۱۴ تغییر ضربانی فشار الکتریکی، ضربان ثابت.



شکل ۱۴-۱۴ تغییر ضربانی فشار الکتریکی، ضربان سینوسی.

مانند برشگرهای جریان دایم، فرکانس تب f_p معمولاً درمقادیری بین 5kHz و 1kHz محدود می‌شود (به بند ۱۳-۴-۸ مراجعه شود). برای اینکه تعداد ضربانها در نیم‌دوره به اندازه کافی باشد، فرکانس موج اصلی نمی‌تواند از حدود 50 الی 100 هرتز تجاوز کند. برای فرکانسهای بالاتر، از تغییر مستطیلی فشار الکتریکی مطابق روش نشان داده شده در شکل ۱۴-۱۲ (ج) استفاده می‌شود.

۱۴-۳-۷ خازن میانگیر

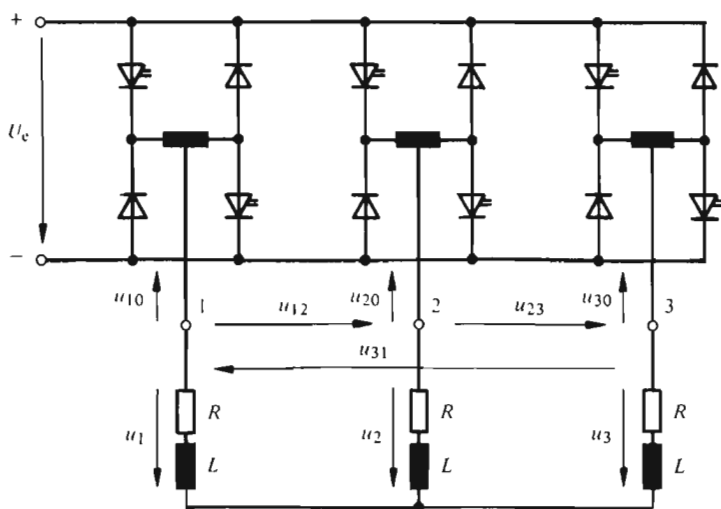
تا اینجا به طور ضمنی فرض کردیم منبع تغذیه که فشار الکتریکی U_e را در ورودی پل اندولر تأمین می‌کند، فاقد هرگونه القاگری داخلی است. این فرض درمورد باتریها تقریباً صادق است. چنانچه این شرط برقرار نباشد، باید در ورودی پل اندولر خازن میانگیری پیش‌بینی بشود (به قسمت ۱۲-۵ مراجعه شود). این پیش‌بینی برای حالتی که تقلیل فشار الکتریکی به روش ضربانی انجام می‌شود، اجتناب ناپذیر است.

۴-۱۴ اندولرهای سه فازه با اتصال پل

۴-۱۴-۱ کلیات

اندولر سه فازه از تک فازه مهمتر است و بیشتر مورد استفاده قرار می گیرد. کاربرد اساسی آن در تغذیه بافرکانس متغیر موتورهای آسنکرون است. در این حالت، فشار الکتریکی متناوب باید عملاً متناسب با فرکانس باشد.

یکی از اتصالهای متداول، «اندولر با اتصال پل سه فازه» است که از اتصال پل تک فازه با اضافه کردن یک شاخه سوم به دست می آید. این شاخه کاملاً مشابه دوشاخه اتصال تک فازه است که در بند ۴-۱۳ بررسی شد. طرح وارده این اتصال در شکل ۴-۱۵ نشان داده شده است.



شکل ۴-۱۵ اندولر با اتصال پل سه فازه.

معمولاً بار سه فازه به صورت ستاره و با نقطه خنثای آزاد است. هر فاز دارای مقاومت اهمی R و القاگری L است و فرض می شود که فازها متعادل اند. ابتدا ترکیب سیستم فشار الکتریکی سه فازه تشریح می شود سپس تغییر فشار الکتریکی به روش ضربانی بیان خواهد شد.

۴-۱۴-۲ ترکیب سیستم فشار الکتریکی سه فازه

یک اندولر سه فازه باید در خروجی خود سیستم فشار الکتریکی سه فازه متعادل تولید

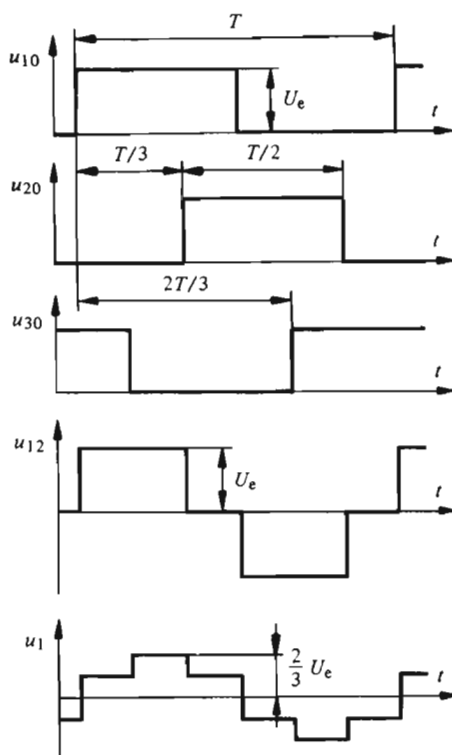
کند. چگونگی ترکیب فشارهای الکتریکی درسهای پل سه فاز و فشار الکتریکی ساده درسهای بار از شکل ۱۴-۱۵ به دست می آید.

بسته به حالت هدایت، فشار الکتریکی هر شاخه از اندولر پل سه فاز (u_{10}, u_{20}, u_{30}) و u_{12} می تواند $+U_e$ یا 0 باشد. چنانکه شکل ۱۴-۱۶ نشان می دهد هر فشار الکتریکی مستطیلی باید، در طول نیم دوره اول $(T/2)$ برابر U_e و در طول نیم دوره دوم برابر صفر باشد. T بازهم دوره تناوب موج اصلی است. فشار الکتریکی هر شاخه باید به اندازه $T/3$ نسبت به فشار الکتریکی شاخه دیگر جابه جایی داشته باشد تا سیستم سه فاز متعادلی تشکیل شود.

بنابر شکل ۱۴-۱۵، در خروجی پل اندولر، فشارهای الکتریکی مرکب از روابط زیر به دست می آیند

$$u_{12} = u_{10} - u_{20} \quad (۱۴-۳)$$

$$u_{23} = u_{20} - u_{30} \quad (۱۴-۴)$$



شکل ۱۴-۱۶ ترکیب فشار الکتریکی سه فاز برای پل سه فاز.

$$u_{31} = u_{30} - u_{10} \quad (5-14)$$

در شکل ۱۴-۱۶ فقط روند تغییرات فشار الکتریکی مرکب u_{12} نشان داده شده است. u_{23} و u_{31} هم همان روند تغییرات را دارند ولی به ترتیب به اندازه $T/3$ و $2T/3$ جابه‌جا شده‌اند.

از طرف دیگر، بین فشارهای الکتریکی مرکب و ساده بار سه فاز روابط زیر برقرار است

$$u_{12} = u_1 - u_2 \quad (6-14)$$

$$u_{23} = u_2 - u_3 \quad (7-14)$$

$$u_{31} = u_3 - u_1 \quad (8-14)$$



در حالتی که بار با اتصال ستاره است و نقطه خنثای آزاد دارد، مجموع جریانهای سد فاز صفر است. چنانچه بار متعادل باشد این رابطه در مورد فشارهای الکتریکی ساده نیز برقرار است

$$u_1 + u_2 + u_3 = 0 \quad (9-14)$$

از روابط فوق نتیجه می‌شود

$$u_1 = \frac{1}{3} (u_{12} - u_{31}) = \frac{1}{3} (2u_{10} - u_{20} - u_{30}) \quad (10-14)$$

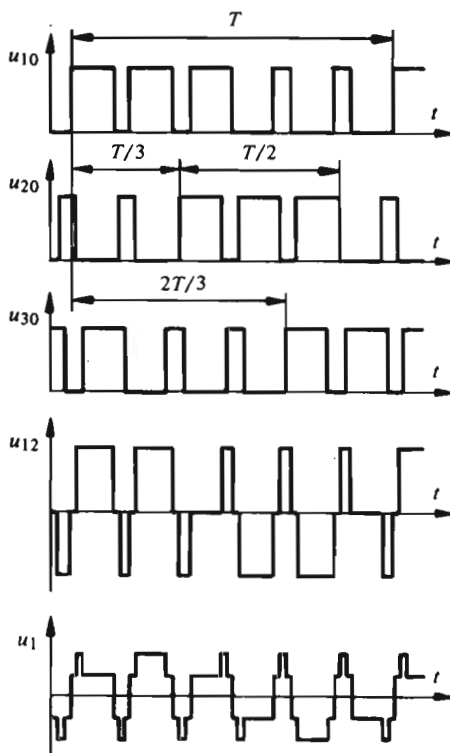
$$u_2 = \frac{1}{3} (u_{23} - u_{12}) = \frac{1}{3} (2u_{20} - u_{10} - u_{30}) \quad (11-14)$$

$$u_3 = \frac{1}{3} (u_{31} - u_{23}) = \frac{1}{3} (2u_{30} - u_{10} - u_{20}) \quad (12-14)$$

روند تغییرات فشار الکتریکی ساده u_1 در پایین شکل ۱۴-۱۶ نشان داده شده است. فشارهای الکتریکی u_2 و u_3 با همان روند تغییرات به ترتیب به اندازه $T/3$ و $2T/3$ نسبت به u_1 جابه‌جایی دارند. ملاحظه می‌شود که فشار الکتریکی ساده دارای روندی پله‌ای و بسیار نزدیک به شکل سینوسی است.

۳-۴-۱۴ تغییر ضربانی فشار الکتریکی

برای تغییر فشار الکتریکی باید از روش ضربانی، که قبلاً در شکل‌های ۱۳-۱۴ و ۱۴-۱۴ دربارهٔ اندولر تک‌فازه نشان داده شد، استفاده شود. در شکل ۱۷-۱۴ روند تغییرات فشارهای الکتریکی شاخه‌ها (u_{10} ، u_{20} و u_{30}) و فشار الکتریکی مرکب u_{12} و فشار الکتریکی ساده u_1 برای حالتی نشان داده شده‌اند که در هر نیم‌دوره، سه ضربان در فشار الکتریکی شاخه‌ای پل اندولر سه‌فازه به‌وجود می‌آید. برای اینکه مقدار متوسط فشارهای الکتریکی u_{10} ، u_{20} و u_{30} ، در طول دورهٔ تناوب T موج اصلی، برابر $U_e/2$ بماند، باید دقت شود که در هر نیم‌دوره عمل کموتاسیون معکوس شود و گرنه فشارهای الکتریکی ساده u_1 ، u_2 و u_3 روند نامتقارن خواهند یافت.



شکل ۱۷-۱۴ تغییر ضربانی فشار الکتریکی برای پل سه‌فازه.

شکل ۱۷-۱۴ فقط‌نمایی طرح‌وار از روش ضربانی را نشان می‌دهد. معمولاً فشار الکتریکی را به‌طور سینوسی (به‌شکل ۱۴-۱۴ مراجعه شود) تغییر می‌دهند و دورهٔ تناوب ضربان (T_p) در مقابل دورهٔ تناوب موج اصلی (T) خیلی کوچک است.



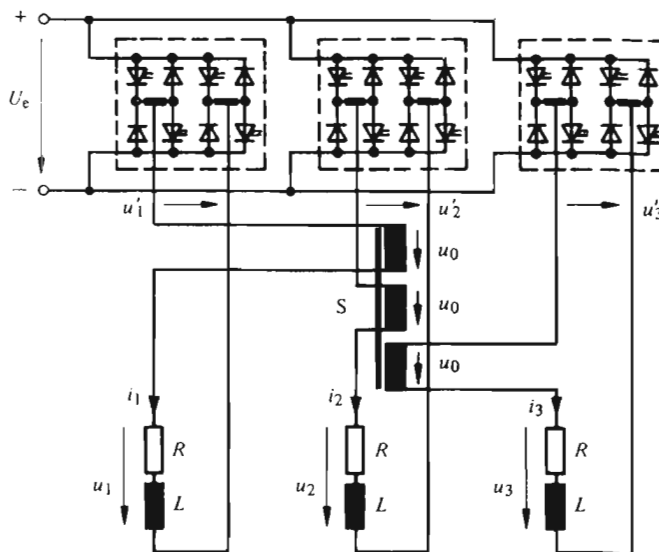
استفاده از روش تغییر مستطیلی که در شکل ۱۴-۱۲ (ج) نشان داده شده است، برای پل سه فاز امکان پذیر نیست. زیرا در این روش لازم است تا مدت زمان t که طی آن فشار الکتریکی هر شاخه برابر U_e است، کاهش پیدا کند. در نتیجه فشار الکتریکی شاخه، حالت نامتقارن پیدا می کند و در سیستم سه فاز، هارمونیکهای زوج پدید می آیند.

۱۴-۵ اندولرهای سه فاز متشکل از سه اندولر تک فاز

۱۴-۵-۱ کلیات

تغییر فشار الکتریکی در پل سه فاز شکل ۱۴-۱۵ فقط به روش ضربانی امکان پذیر است. در این روش، فرکانس موج اصلی به مقادیر بین ۵۰ و ۱۰۰ هرتز منحصر می شود. برای به دست آوردن فرکانسهای بالاتر، باید مطابق شکل ۱۴-۱۲ (ج) از تغییر مستطیلی فشار الکتریکی استفاده کرد. در این حالت ضرورت دارد به جای پل سه فاز اتصالهای دیگری به کار رود.

شکل ۱۴-۱۸، اتصال متشکل از سه اندولر تک فاز را نشان می دهد و هر اندولر، همان پل تک فاز تشریح شده در بند ۱۴-۳ است. سه اندولر در طرف فشار الکتریکی ورودی U_e از نظر الکتریکی به هم متصل اند. تشکیل نقطه خنثی در طرف سه فاز امکان پذیر نیست و فازهای بار باید مجزا از همدیگر بمانند تا از پدید آمدن اتصال کوتاه بین چندین شاخه اندولر جلوگیری به عمل آید.



شکل ۱۴-۱۸ اندولر سه فاز متشکل از سه اندولر تک فاز.

در هر حال برای بهره بردن از خاصیت سیستمهای سه فازه با نقطه خنثای آزاد (حذف هارمونیک سوم و مضارب آن)، به کمک يك پيچك القاگر S که سه سیم پیچ دارد (القاگر تزویج)، تزویجی القایی بین سه فاز برقرار می شود. برای تشریح چگونگی تغییر مستطیلی فشار الکتریکی در این اتصال، ابتدا ترکیب سیستم فشار الکتریکی سه فازه مطالعه خواهد شد.

۱۴-۵-۲ ترکیب سیستم فشار الکتریکی سه فازه

با صرف نظر کردن از جریان مغناطیس کننده پيچك القاگر S، نیروی محرك مغناطیسی آن باید صفر باشد. چون سه سیم پیچ تعداد دورهای مساوی دارند، شرط فوق به صورت زیر درمی آید

$$i_1 + i_2 + i_3 = 0 \quad (14-13)$$

چنانچه بار سه فازه متقارن باشد، فشارهای الکتریکی u_1 ، u_2 و u_3 در دوسر هر فاز با جریانهایی i_1 ، i_2 و i_3 و مشتقهای آنها متناسب خواهند بود و به جای معادله (۱۴-۱۳) می توان نوشت

$$u_1 + u_2 + u_3 = 0 \quad (14-14)$$

در هر يك از سیم پیچهای پيچك S، فشار الکتریکی یکسانی، مانند u_0 القا می شود که متناسب با $d\Phi/dt$ است (Φ فوران در پيچك S است). سرانجام بین فشارهای الکتریکی دو سر هر فاز بار (u'_1 ، u'_2 و u'_3)، روابط زیر به دست می آیند

$$u_1 = u'_1 - u_0 \quad (14-15)$$

$$u_2 = u'_2 - u_0 \quad (14-16)$$

$$u_3 = u'_3 - u_0 \quad (14-17)$$

از جمع کردن این سه رابطه و استفاده از معادله (۱۴-۱۴) نتیجه می شود

$$u_0 = \frac{1}{3} (u'_1 + u'_2 + u'_3) \quad (14-18)$$

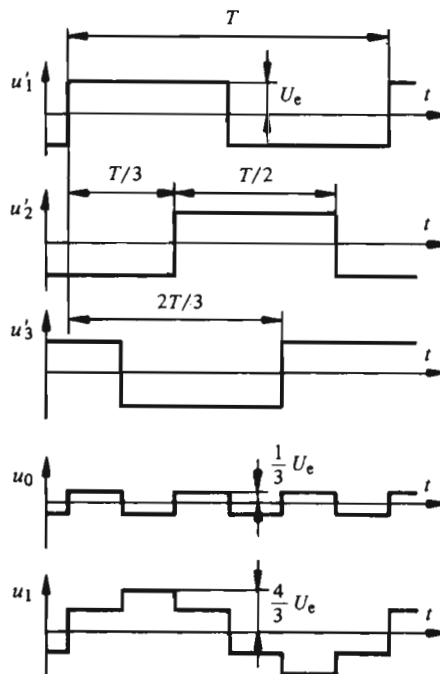
و در نتیجه

$$u_1 = \frac{1}{3} (2u'_1 - u'_2 - u'_3) \quad (۱۹-۱۴)$$

$$u_2 = \frac{1}{3} (2u'_2 - u'_1 - u'_3) \quad (۲۰-۱۴)$$

$$u_3 = \frac{1}{3} (2u'_3 - u'_1 - u'_2) \quad (۲۱-۱۴)$$

فشارهای الکتریکی فاز u_1 ، u_2 و u_3 به روشی مشابه آنچه در بند ۱۴-۳-۲ برای پل سه فازه بیان شد ترکیب می شوند، با این تفاوت که در اینجا u'_1 ، u'_2 و u'_3 بین $+U_e$ و $-U_e$ تغییر می کنند.

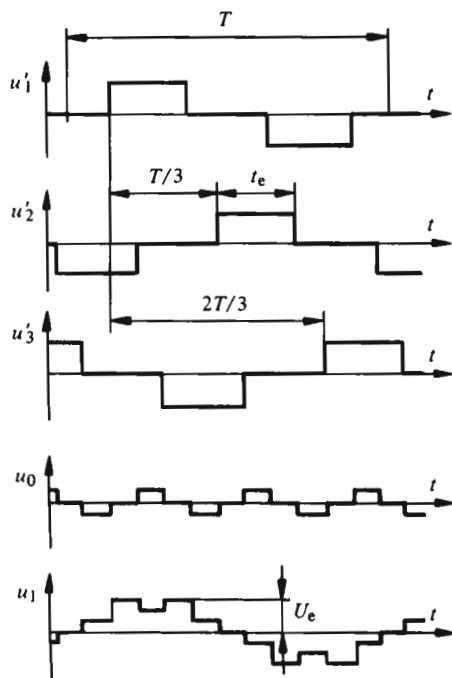


شکل ۱۴-۱۹ ترکیب فشار الکتریکی در اندولر سه فازه متشکل از سه اندولر تک فازه.

روند تغییرات فشارهای الکتریکی u_1, u_2, u_3, u_0 و u_1 در شکل ۱۴-۱۹ نشان داده شده است. دو فشار الکتریکی دیگر u_2 و u_3 به ترتیب به اندازه $T/3$ و $2T/3$ نسبت به u_1 جابه جایی دارند. فشار الکتریکی u_0 همان روند شکل ۱۴-۱۶ را دارد. با این تفاوت که مقدار ماکزیمم (بیشینه) آن برابر $4U_e/3$ است.

۱۴-۵-۳ تغییر مستطیلی فشار الکتریکی

چنانکه شکل ۱۴-۲۰ نشان می دهد، در اندولر سه فازه متشکل از سه اندولر تک فازه، تغییر مستطیلی فشارهای الکتریکی u_1, u_2 و u_3 در خروجی هر اندولر تک فازه امکان پذیر است. به سبب توزیع حاصل از پیچك القاگری S، حتی برای مدت زمانهای وصل t_e نسبتاً



شکل ۱۴-۲۰ تغییر مستطیلی فشار الکتریکی برای اندولر سه فازه متشکل از سه اندولر تک فازه.



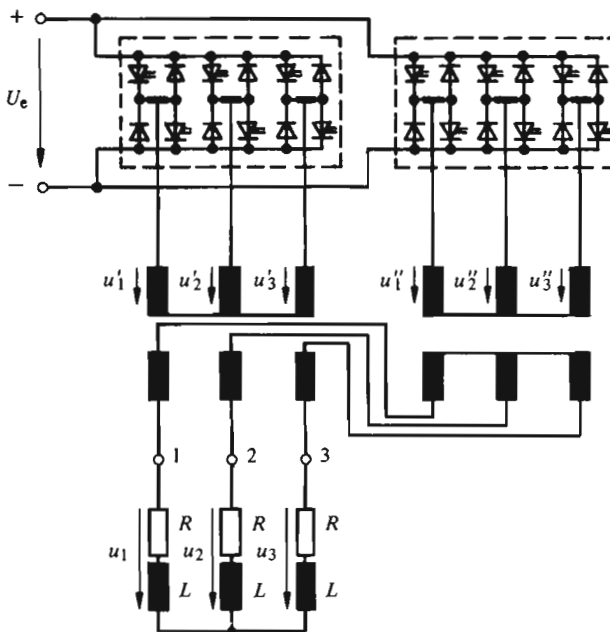
کوتاه فشار الکتریکی در خروجی اندولرهای تک فازه، هارمونیکهای فشار الکتریکی را در دوسر هرفاز بار، دامنه کمتری دارند.

بدیهی است که تغییر فشار الکتریکی هر یک از اندولرهای تک فازه می تواند به روش ضربانی نیز انجام گیرد. برای تغذیه موتورهای الکتریکی در فرکانسهای بالا، هنگامی که دامنه تغییر فرکانس و در نتیجه تغییر فشار الکتریکی وسیع است، اغلب از ترکیب روش ضربانی و روش مستطیلی استفاده می شود. برای فرکانسهای خروجی در حدود ۷۰ الی ۱۰۰ هرتز تغییر فشار الکتریکی به روش ضربانی انجام می گیرد، در صورتی که برای فرکانسهای بالاتر، روش مستطیلی به کار می رود. بدین ترتیب می توان تلفات مربوط به کموتاسیون را محدود ساخت.

۱۴-۶ اتصال متوالی اندولرهای سه فازه

۱۴-۶-۱ کلیات

تغییر مستطیلی فشار الکتریکی را می توان با متوالی بستن دو اندولر با اتصال پل نیز انجام داد.

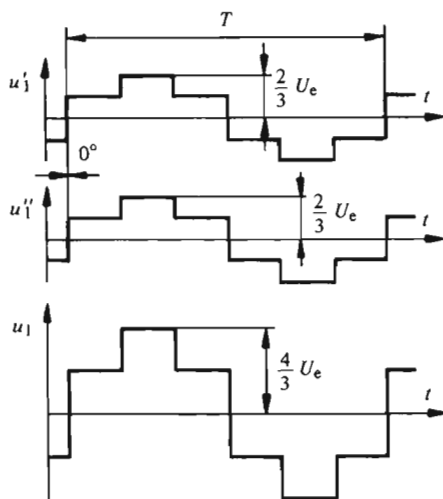


شکل ۱۴-۲۱ اتصال متوالی اندولرهای سه فازه.

طرح وارده اساسی کار را شکل ۱۴-۲۱ نشان می‌دهد. به علت وجود اتصال الکتریکی بین دو اندولر در طرف فشار الکتریکی ورودی U_e ، اتصال متوالی در طرف سه‌فازه باید به کمک دو ترانسفورماتور انجام گیرد تا از نظر الکتریکی از هم جدا شوند. در اینجا نیز ترکیب فشار الکتریکی و چگونگی روش مستطیلی برای تغییر آن بیان می‌شود.

۱۴-۶-۲ ترکیب سیستم فشار الکتریکی سه‌فازه

فشارهای الکتریکی ساده u'_1 ، u'_2 ، u'_3 ، u''_1 ، u''_2 و u''_3 در اولیه ترانسفورماتورها، همان روند تغییرات فشارهای ساده در سرهای بار سه‌فازه تغذیه شده به وسیله اندولر با اتصال پل سه‌فازه را دارند (به شکل ۱۴-۱۶ مراجعه شود).



شکل ۱۴-۲۲ ترکیب فشار الکتریکی سه‌فازه در اتصال متوالی اندولرها.

چنانچه نسبت تبدیل ترانسفورماتور، برابر يك باشد، فشارهای الکتریکی ساده، در سرهای بار، از رابطه‌های زیر به دست می‌آیند

$$u_1 = u'_1 + u''_1 \quad (14-22)$$

$$u_2 = u'_2 + u''_2 \quad (14-23)$$

$$u_r = u_r' + u_r'' \quad (۱۴-۲۴)$$

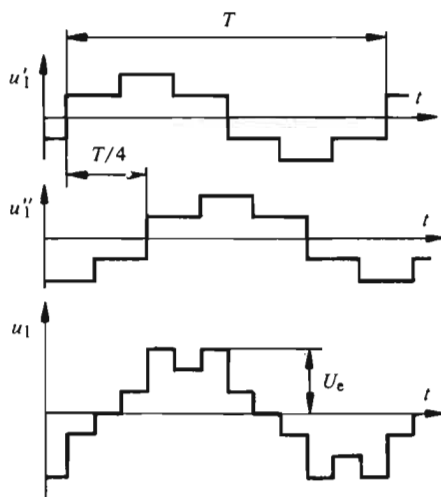
درحالتی که فشارهای u_1' و u_1'' نسبت به یکدیگر جابه‌جایی ندارند؛ روند تغییرات فشار الکتریکی u_1 مطابق شکل ۱۴-۲۲ است. فشار الکتریکی ساده بار (u_1) دارای همان روند تغییرات فشار الکتریکی دراولیه ترانسفورماتورهاست و فقط دامنه‌اش دو برابر شده است.

این اتصال عموماً برای فرکانسهای بالا مسدود استفاده قرار می‌گیرد، زیرا وجود ترانسفورماتورها، فرکانس پایین را درمقادیر بین ۱۰ تا ۲۰ هرتز محدود می‌کند.

۱۴-۶-۳ تغییر مستطیلی فشار الکتریکی

برای کاهش فشار الکتریکی، ضمن حفظ صورت پله‌ای، می‌توان فشار الکتریکی اندولر دوم را نسبت به فشار الکتریکی اندولر اول جابه‌جا کرد. به‌عنوان مثال اگر فشار الکتریکی ساده u_1'' نسبت به فشار الکتریکی u_1' به اندازه $T/4$ جابه‌جا شود، فشار الکتریکی u_1 در سرهای بار روند تغییراتی مطابق شکل ۱۴-۲۳ خواهد داشت. دراین حالت فشار الکتریکی نسبت به فشار الکتریکی ماکزیمم (بیشینه) کاهش یافته است.

هرگاه جابه‌جایی برابر $T/2$ باشد، دو فشار الکتریکی u_1' و u_1'' همدیگر را خنثی می‌کنند و فشار الکتریکی u_1 صفر می‌شود. بنابراین، با تغییر جابه‌جایی بین دو فشار الکتریکی از ۰ تا $T/2$ ، فشار الکتریکی در سرهای بار را می‌توان از مقدار ماکزیمم تا صفر تغییر داد.



شکل ۱۴-۲۳ تغییر مستطیلی فشار الکتریکی برای اتصال متوالی اندولرهای سه‌فازه.

فصل پانزدهم

اندولرهای با کموتاسیون اجباری

پدیده کموتاسیون

۱-۱۵ مقدمه

۱-۱-۱۵ کلیات

پدیده کموتاسیون اجباری در برشگرهای جریان دایم، در فصل سیزدهم عمیقاً مورد مطالعه قرار گرفت. در اینجا به بررسی همین پدیده در اندولرهای با کموتاسیون اجباری خواهیم پرداخت.

در بند ۱۵-۲ چند نوع کنتاکتور ایستا و مدارهای خاموش کننده آنها نشان داده خواهد شد. سپس در بند ۱۵-۳ خاموش شدن مجرد يك شاخه و در بند ۱۵-۴ خاموش شدن فاز به فاز مورد بررسی قرار خواهند گرفت.

۱-۲-۱۵ فرضهای بررسی کموتاسیون اجباری

برای مطالعه پدیده کموتاسیون اجباری در این فصل فرض می‌کنیم که جریان بار (i) در طول پدیده گذرا در موقع کموتاسیون ثابت است

$$i = I = \text{cte} \quad (1-15)$$

در حقیقت جریان بار جریانی است متناوب که با فرکانس موج اصلی تغییر می‌کند. بنا بر این،

فرض بالا در صورتی معتبر خواهد بود که مدت زمان کموتاسیون اجباری در مقابل دوره تناوب موج اصلی کوچک باشد، که معمولاً چنین است.

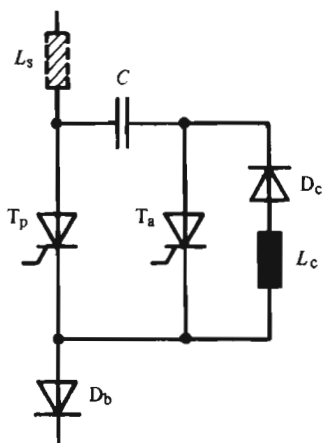
۱۵-۲ دیگر مدارهای خاموش کننده

۱۵-۲-۱ کلیات

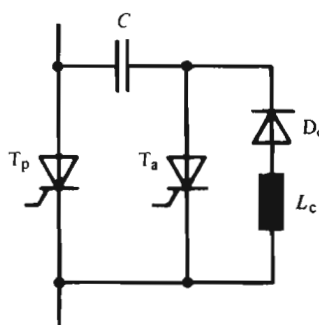
مدار خاموش کننده ویژه برشگرهای جریان دایم را به تفصیل در فصل سیزدهم مطالعه کردیم. برای اندولرهای با کموتاسیون اجباری هم تعداد زیادی مدار خاموش کننده ساخته شده است. عموماً همگی این مدارها براساس خالی شدن یک خازن خاموش کننده کار می کنند. مهمترین این مدارها که به خاموش کردن یک کنتاکتور ایستای تنها مربوط می شوند در زیر بررسی خواهند شد. رفتار یک شاخه از اندوار در بند ۱۵-۳ بیان خواهد شد. حال آنکه بند ۱۵-۴ به امکانی دیگر برای خاموش کردن کنتاکتورهای ایستای یک شاخه به توسط مدار خاموش کننده ای واحد اختصاص خواهد یافت.

۱۵-۲-۲ اتصالهای با مدار نوسانگر

شکل ۱۵-۱ مدار خاموش کننده ای را نشان می دهد که در برشگر جریان دایم به کار می رود. در مورد اندولرها، چنانکه در شکل ۱۵-۲ نشان داده شده است، تقریباً همواره ضرورت



شکل ۱۵-۲ مدار خاموش کننده با مدار نوسانگر همراه با دیود مسدود کننده والفاگر متوالی.



شکل ۱۵-۱ مدار خاموش کننده با مدار نوسانگر.

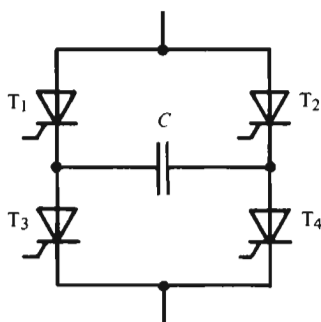
دارد مدار فوق به توسط دیود مسدود کننده ای (D_b) تکمیل شود. این دیود مانع تخلیه خازن C از طریق هر شاخه دیگر در حال هدایت پل اندولر می شود و اگر نباشد چنانکه قبلاً در مورد برشگر جریان دیدیم، این تخلیه می تواند از طریق القاگر L_c و دیود D_c انجام پذیرد.

برای افزایش القاگری اتصالات (L_o) کنتاکتور، القاگر L_s با آن متوالی می شود. مقدار ماگزیمم (بیشینه) فشار الکتریکی در دو سر خازن C به جریان خاموش شده در تیرستور اصلی بستگی دارد [به معادله (۱۳-۲۵) مراجعه شود]. به سبب دیود مسدود کننده D_b ، این اضافه فشار الکتریکی در خازن C انباشته می ماند. فشار الکتریکی U_{co} در دسترس برای خاموشی با افزایش جریان افزایش می یابد و این موضوع برای خاموش کردن جریانها در حالت اضافه بار مناسب است.

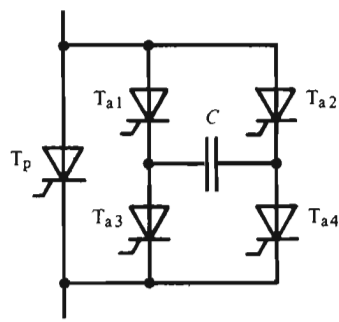
۳-۲-۱۵ اتصالات ران و کش (پوش - پول)

اساس کار کرد دیگری در شکل ۳-۱۵ به نام «مدار خاموش کننده ران و کش (پوش-پول)» نشان داده شده است. برای قطع جریان در تیرستور اصلی (T_p) باید (بسته به جهت بار خازن خاموش کننده C) از چهار تیرستور کمکی T_{a1} تا T_{a4} دو تیرستور T_{a1} و T_{a4} یا T_{a3} و T_{a2} به طور همزمان روشن بشوند.

مطابق شکل ۳-۱۵، چهار تیرستور فوق را می توان برای هدایت جریان اصلی نیز



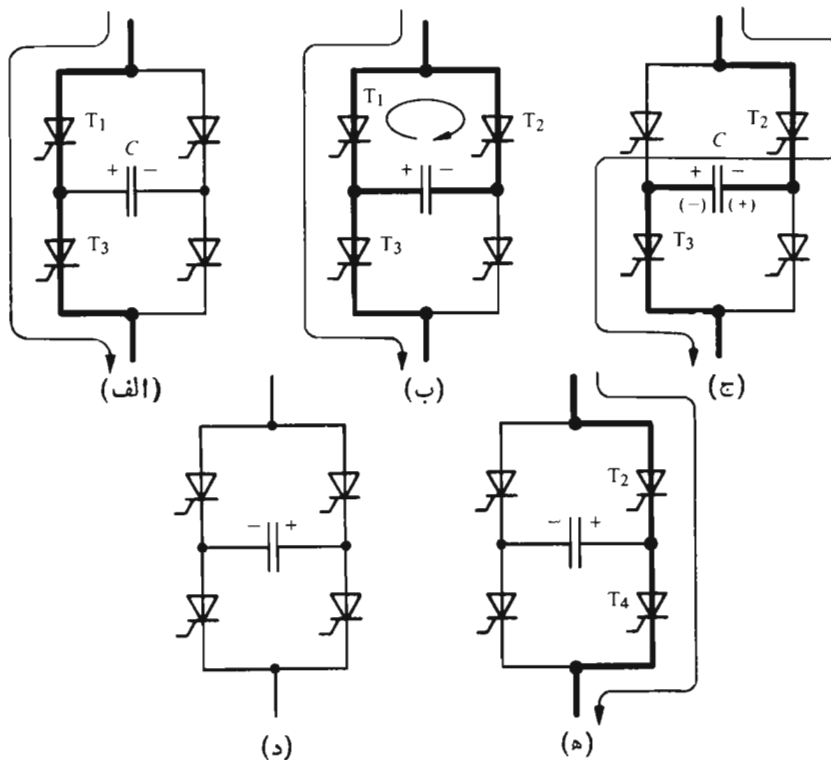
شکل ۳-۱۵ مدار خاموش کننده ران و کش (پوش-پول) با چهار تیرستور اصلی.



شکل ۳-۱۵ مدار خاموش کننده ران و کش (پوش-پول) با چهار تیرستور کمکی.

به کار برد. در این حالت کنتاکتور ایستا از چهار تیریس‌تور و یک خازن خاموش کننده تشکیل می‌شود.

کارکرد مدار خاموش کننده ران و کش با چهار تیریس‌تور اصلی در شکل ۵-۱۵ نشان داده شده است. فرض می‌کنیم که جریان بار از طریق تیریس‌تورهای T_1 و T_3 جاری می‌شود و جهت بار خازن خاموش کننده مطابق شکل ۵-۱۵ (الف) است. برای قطع کنتاکتور ایستا باید مطابق شکل ۵-۱۵ (ب) تیریس‌تور T_3 روشن شود. مقداری از بار خازن C از طریق تیریس‌تور T_3 که جریانش به سرعت به صفر می‌رسد تخلیه می‌شود. در این صورت جریان اصلی از طریق تیریس‌تور T_1 ، خازن خاموش کننده C و تیریس‌تور T_3 عبور می‌کند (شکل ۵-۱۵ ج). خازن خاموش کننده C به طور کامل تخلیه می‌شود سپس با جهت



شکل ۵-۱۵ مراحل هدایت مدار خاموش کننده ران و کش با چهار تیریس‌تور اصلی.

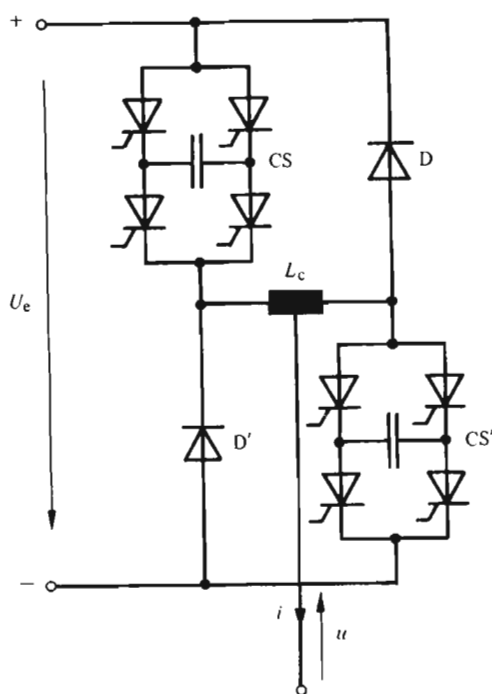
مشخص شده در داخل پراونتز دوباره بار می‌گیرد و علامت فشار الکتریکی دو سر خازن عوض می‌شود. چنانکه بعداً در بند ۳-۱۵ خواهیم دید، روند تغییرات جریان به وسیله

عناصر خارجی، یعنی پل اندولر، تعیین می‌شود. هنگامی که فشار الکتریکی دو سر خازن خاموش‌کننده C به مقدار فشار الکتریکی ورودی پل اندولر می‌رسد، این جریان صفر می‌شود. از این پس، مطابق شکل ۵-۱۵ (د) کنتاکتور ایستا قطع است. برای وصل کردن دوباره کنتاکتور ایستا، باید مطابق شکل ۵-۱۵ (ه) تیرستورهای T_4 و T_5 روشن شوند. خاموشی بعدی باروشن شدن تیرستور T_4 و تا آخر انجام خواهد پذیرفت. کنتاکتور ایستا را می‌توان همواره با روشن کردن تیرستورهای T_4 و T_5 وصل کرد در این صورت خاموش کردن آن به تنایب با تیرستورهای T_4 یا T_5 خواهد بود. مزیت مدار خاموش‌کننده ران و کش در این است که از هر دو جهت بار شدن خازن استفاده می‌شود و احتیاجی به دوباره بار کردن آن به کمک مدار نوسانگر نیست.

۳-۱۵ خاموش شدن مجرد

۱-۳-۱۵ کلیات

در اتصال به صورت پل که در بند ۲-۱۴ تشریح و در شکل ۹-۱۴ نشان داده شده است، امکان خاموش شدن مجرد هر یک از کنتاکتورهای ایستا وجود دارد، زیرا هر کنتاکتور مجهز

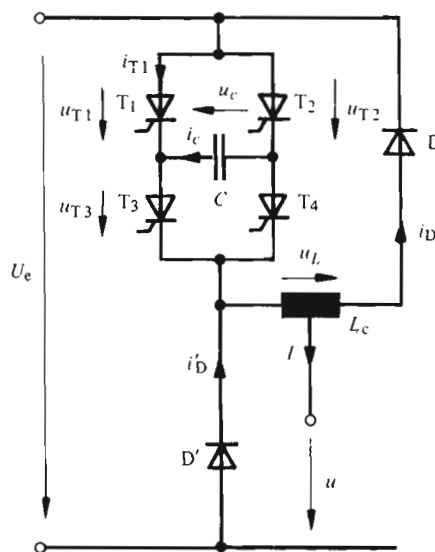


شکل ۹-۱۵ شاخه‌ای از اندولر با خاموش شدن مجرد.

به یک مدار خاموش کننده مخصوص به خود است. در زیر کارکرد این اتصال را، با فرض اینکه هر کنتاکتور مطابق شکل ۱۵-۴ چهار تیرستور اصلی به صورت اتصال دان و کش دارد، مطالعه می کنیم. برای این منظور کافی است تنها یک شاخه اندولر را مورد بررسی قرار دهیم. نتایج به دست آمده هم برای اتصال پل تک فاز و هم برای اتصال پل سه فاز معتبر خواهند بود. شکل ۱۵-۶ طرحواره کامل یک شاخه از اندولر را نشان می دهد.

۱۵-۳-۲ کموتاسیون اجباری

ابتدا پدیده کموتاسیون اجباری را بررسی می کنیم. برای این منظور فرض می کنیم که کنتاکتور ایستای CS هادی و کنتاکتور ایستای CS' قطع است. در این صورت جریان بار (i) مثبت است. هر دو دیود مسدودند و کنتاکتور ایستای CS' مدام بسته می ماند. بنابراین برای بررسی کموتاسیون اجباری می توان طرحواره ساده شده شکل ۱۵-۷ را به کار برد. بار القایی، جریان $i = I$ را در دوران کموتاسیون ثابت نگه می دارد.



شکل ۱۵-۷ طرحواره ساده شده یک شاخه از اندولر با خاموش شدن مجرد، و جریان بار مثبت.

برای قطع کردن کنتاکتور ایستای CS، تیرستور T_4 روشن می شود. خازن خاموش کننده C که دارای بار اولیه منفی است ($u_c < 0$) مقداری از بار خود را از طریق T_4 تخلیه

می‌کند. جریان i_{T_1} در تیرستور T_1 به سرعت صفر می‌شود. سرعت کاهش این جریان را فقط القاگرهای اتصالها، که برای سادگی از آنها صرف نظر شده است، محدود می‌کنند. در موقع قطع شدن تیرستور T_1 ، جریان i_c جاری در خازن خاموش کننده C به مقدار جریان بار (I) می‌رسد. در این موقع جریان بار از طریق تیرستورهای T_4 و T_3 عبور می‌کند (به شکل ۱۵-۵-ج مراجعه شود). در ضمن جریانی مانند i_D از طریق القاگر L_c و دیود D بسته می‌شود. این جریان گردشی به جریان I اضافه و باعث افزایش جریان i_c می‌شود. در غیاب القاگر L_c ، دیود D باعث اتصال کوتاه و تخلیه سریع خازن خاموش کننده می‌شود و از کموتاسیون صحیح جریان بار جلوگیری می‌کند.

خازن خاموش کننده، تخلیه و سپس در جهت مخالف دوباره بار می‌شود. به محض رسیدن u_c به مقدار U_c ، جریان i_D صفر و دیود D قطع می‌گردد. در این موقع دیود D' شروع به هدایت می‌کند و جریان i_c صفر می‌شود. خازن خاموش کننده به صورت بار شده با فشار الکتریکی $u_c = +U_c$ باقی می‌ماند.

بدین ترتیب کموتاسیون اجباری انجام می‌پذیرد و جریان بار I از کنتاکتور ایستای CS به دیود D' منتقل می‌شود.

در صورتی که جریان بار منفی باشد، کنتاکتور ایستای CS' هادی و کنتاکتور ایستای CS قطع است (به شکل ۱۵-۶ مراجعه شود) و پدیده گذرای قطع کنتاکتور ایستا به طریقی مشابه انجام می‌پذیرد.

در طول کموتاسیون جریانی گذرا از دیود D' عبور می‌کند، حال آنکه در پایان کموتاسیون جریان بار از دیود D می‌گذرد. دیودهای D و D' بدین ترتیب عملی دوگانه دارند. از طرفی قسمتی از جریان خازن خاموش کننده را، در دوران کموتاسیون، هدایت می‌کنند (دیود با اتصال موازی معکوس با کنتاکتور ایستایی که باید قطع شود) و از طرف دیگر چنانچه کنتاکتورهای ایستا قطع باشند، جریان بار را از طریق خود عبور می‌دهند (دیودی که به طور معکوس با کنتاکتور ایستایی که تازه خاموش شده متوالی است).

۱۵-۳-۳ محاسبه پدیده گذرا

چنانچه بار خیلی القایی باشد، می‌توان پذیرفت که جریان بار (i) در طول زمان پدیده گذرا در موقع کموتاسیون اجباری ثابت و برابر I می‌ماند. در اینجا به بررسی پدیده گذرا برای جریان بار مثبت اکتفا خواهد شد و برای این منظور شکل ۱۵-۷ می‌تواند مورد نظر قرار گیرد.

از زمان لازم برای کاهش یافتن و صفر شدن جریان i_{T_1} در تیرستور T_1 می‌توان صرف نظر کرد و فقط پدیده اصلی یعنی تخلیه و دوباره بار شدن خازن خاموش کننده را مورد توجه قرار داد.

خازن خاموش کننده C و القاگر L_c يك مدار نوسانگر تشکیل می‌دهند. برای این



مدار، هنگامی که تیرستورهای T_1 و T_2 و همچنین دیود D هادی هستند، روابط زیر به دست می آیند

$$i_c = I + i_D \quad (2-15)$$

$$u_c + L_c \frac{di_D}{dt} = 0 \quad (3-15)$$

$$i_c = C \frac{du_c}{dt} \quad (4-15)$$

از آنجا که جریان I ثابت است، هیچگونه افت فشار الکتریکی در دوسر القاگر L_c به وجود نمی آید.

چنانکه در بند ۱۳-۴ به تفصیل دیده شد، پاسخ معادله های بالا را می توان به کمک تبدیل لاپلاس به دست آورد. با در نظر گرفتن اینکه مقدار اولیه فشار الکتریکی u_c در دو سر خازن خاموش کننده برابر $-U_c$ و جریان اولیه در دیود D برابر صفر ($i_D = 0$) است، نتیجه می شود

$$i_c = \frac{I}{\cos \varphi} \cos (\omega_c \tau - \varphi) \quad (5-15)$$

$$u_c = \frac{I}{\cos \varphi} \sqrt{\frac{L_c}{C}} \sin (\omega_c \tau - \varphi) \quad (6-15)$$

که در این رابطه ها

$$\omega_c = \frac{1}{\sqrt{L_c C}} \quad (7-15)$$

$$\tan \varphi = \frac{U_c}{I} \sqrt{\frac{C}{L_c}} \quad (8-15)$$

روند تغییرات فشارهای الکتریکی و جریانها در شکل ۸-۱۵ نشان داده شده است. فشار الکتریکی u_{T1} در دو سر تیرستور T_1 برابر u_c است. در طول زمانی مانند t_f ، به نام زمان حفاظت، این فشار الکتریکی منفی است و قطع شدن مطمئن تیرستور را تضمین می کند. از معادله (۶-۱۵) و با قرار دادن $u_c = 0$ ، زمان حفاظت t_f چنین به دست می آید

$$t_f = \frac{\varphi}{\omega_c} = \sqrt{L_c C} \arctan \left(\sqrt{\frac{C}{L_c}} \frac{U_c}{I} \right) \quad (9-15)$$

زمان حفاظت t_f با افزایش جریان I کاهش می‌یابد و به‌ازای $I = 0$ که $\varphi = \pi/2$ است، ماگزیمم (بیشینه) خواهد بود.

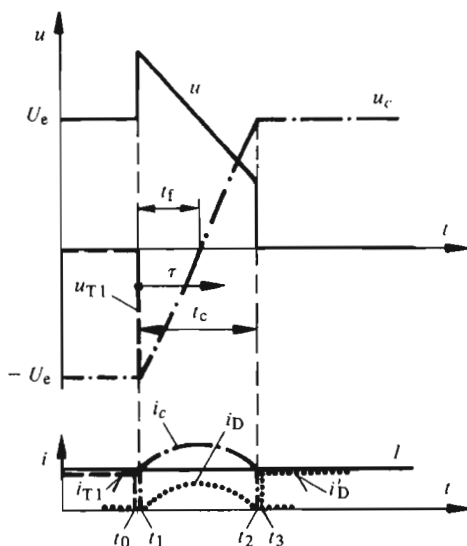
در لحظه $\tau = t_c$ جریان i_D صفر و دیود D قطع می‌شود. در این لحظه جریان i_c برابر جریان I است و از رابطه (۵-۱۵) نتیجه می‌شود

$$\cos \varphi = \cos (\omega_c t_c - \varphi) \quad (10-15)$$

پاسخ معادله فوق عبارت است از

$$t_c = \frac{2\varphi}{\omega_c} = 2 \sqrt{L_c C} \arctan \left(\sqrt{\frac{C}{L_c}} \frac{U_c}{I} \right) \quad (11-15)$$

ملاحظه می‌شود که t_c دو برابر t_f است. فشار الکتریکی u_c ، به‌ازای $\omega_c \tau = \omega_c t_c = 2\varphi$ و با در نظر گرفتن $\tan \varphi$ از رابطه (۸-۱۵)، برابر است با



شکل ۸-۱۵ روند تغییرات جریانها وفشارهای الکتریکی درحالت خاموش شدن مجرد جریان بار مثبت.

$$u_e = \frac{I}{\cos \varphi} \sqrt{\frac{L_c}{C}} \sin \varphi = U_e \quad (12-15)$$

برای $t > t_c$ فشار الکتریکی u_e نمی‌تواند افزایش پیدا کند، زیرا در این صورت فشار الکتریکی بین‌آند و کاتد دیود D' که برابر $u_e - U_e$ است، مثبت خواهد شد و در نتیجه دیود D' هادی می‌شود و فشار الکتریکی u_e را در مقدار U_e محدود می‌سازد. جریان i_D به صفر می‌رسد و جریان $i_{D'}$ تا مقدار جریانی بار (I) افزایش می‌یابد. در اینجا نیز سرعت تغییرات جریان به مقدار القاگرهای کوچک اتصالها بستگی دارد. در طول کموتاسیون، فشار الکتریکی دوسر القاگر L_c عبارت است از

$$u_L = -u_e \quad (13-15)$$

این القاگر، برای فشار الکتریکی خروجی u ، به عنوان تقسیم‌کننده القایی فشار الکتریکی به کار می‌رود. بنابراین فشار الکتریکی خروجی از رابطه زیر به دست می‌آید

$$u = U_e + \frac{u_L}{2} = U_e - \frac{u_e}{2} \quad (14-15)$$

مطابق شکل ۱۵-۸، فشار الکتریکی خروجی u در طول زمان کموتاسیون t_c روند تغییراتی دوزنقه‌ای از خود نشان می‌دهد و پس از کموتاسیون صفر می‌شود ($u = 0$).

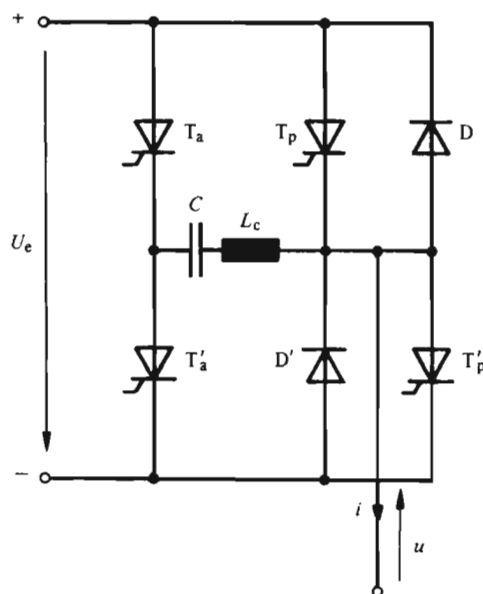
۱۵-۳ خاموش شدن فاز به فاز

۱۵-۴-۱ کلیات

خاموش شدن مجرد که در بند قبل مورد مطالعه قرار گرفت، خاموش شدن و عبور خیلی آرام از حالت هدایتی به حالت هدایتی دیگر را امکان پذیر می‌سازد. هرچند، لوازم به کار رفته مخصوصاً در مورد مدارهای خاموش‌کننده نسبتاً زیاد می‌شوند. برای صرفه‌جویی در لوازم به کار رفته، می‌توان به‌ازای هر شاخه از اندولر تنها یک مدار خاموش‌کننده به کار برد. این موضوع امکان‌پذیر است زیرا دو کنتاکتور ایستای هر شاخه از پل اندولر، هرگز به‌طور همزمان در حالت وصل نیستند. بنابراین مدار خاموش‌کننده واحدی را می‌توان به تناوب برای خاموش کردن تک تک کنتاکتورهای ایستا به کار برد. مدار چنین شاخه‌ای در شکل ۱۵-۹ نشان داده شده است.

هر شاخه از دو تیرستور اصلی T_p و T_p' تشکیل شده است و دیودهای D و D'

به طور موازی معکوس با آنها قرار گرفته اند. مدار خاموش کننده از یک پیچک القاگر L_c ، یک خازن C و دو تیرستور کمکی T_a و T'_a تشکیل می شود. از آنجا که تخلیه خازن C به توسط L_c محدود می شود، دیودهای D و D' نمی توانند این خازن را اتصال کوتاه کنند. دو شاخه فرعی متشکل از T_p و D' و D و T'_p دیگر لازم نیست با یک پیچک القاگر از هم مجزا شده باشند و سرخروجی شاخه اندولر می تواند مستقیماً به توسط این دو شاخه فرعی متصل باشد. در این صورت اصطلاح «خاموش شدن فاز به فاز» به کار می رود ولی اصطلاح شاخه به شاخه صحیحتر است.



شکل ۹-۱۵ شاخه اندولر با خاموش شدن فاز به فاز.

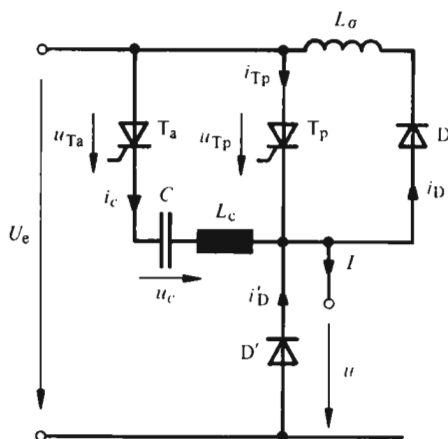
۲-۴-۱۵ کموتاسیون اجباری

برای مطالعه کارکرد مدار خاموش کننده فرض می کنیم که تیرستور اصلی T_p هادی است. در این صورت جریان بار مثبت خواهد بود. اگر تیرستور اصلی T'_p همواره در حالت قطع بماند، طرحواره ساده شده شکل ۱۵-۱۰ امکان می دهد تا پدیده خاموش شدن جریان در تیرستور T_p را بررسی کنیم. با توجه به اهمیت القاگری بار، جریان $i = I$ در دوران کموتاسیون اجباری، ثابت می ماند.

در لحظه روشن شدن تیرستور کمکی T_a ، چون تیرستور اصلی T_p هادی است،



مدار خاموش کننده اتصال کوتاه می شود. در اثر بار اولیه منفی خازن خاموش کننده جریانی مانند i_c در خلاف جهت هدایت در تیرستور T_p برقرار می گردد.



شکل ۱۵-۱۰ طرح وارده ساده شده شاخه ای از اندولر با خاموش شدن فاز به فاز و جریان بار مثبت.

اگر جریان i_c افزایش پیدا کند، جریان i_{Tp} کاهش خواهد یافت، زیرا مجموع این دو جریان باید ثابت و برابر جریان بار (I) بماند. در یک لحظه مشخص، جریان i_{Tp} صفر و تیرستور T_p قطع می شود. باید در نظر داشت که چون تخلیه خازن خاموش کننده مستقیماً در تیرستور اصلی T_p انجام نمی گیرد بلکه از طریق القاگر L_c صورت می پذیرد، کاهش جریان i_{Tp} نسبتاً کند است.

جریان i_c پس از قطع شدن تیرستور T_p نیز به افزایش خود ادامه می دهد و از جریان بار بیشتر می شود. تفاوت این دو جریان باید از طریق دیود D بگذرد. i_c از آنجا که جریان مداری نوسان کننده است، به مقداری ماگزیمم (پیشینه) می رسد و سپس شروع به کاهش می کند. در لحظه ای که این جریان دوباره به مقدار جریان بار I می رسد، دیود D قطع می شود. چون جریان بار I باید ثابت بماند، کاهش اضافی جریان i_c باید به توسط جریانی مانند $i_{D'}$ جاری در دیود D' جبران شود. در حالتی که دیود D' هادی است، فشار الکتریکی خروجی u صفر است و کمی پس از آن جریان i_c هم صفر می شود.

در پایان کموتاسیون اجباری، فشار الکتریکی u در دو سر خازن خاموش کننده C مثبت است. بدین ترتیب خازن C برای خاموش کردن تیرستور اصلی T_p (که جریانی منفی از بار خواهد گذراند) به کمک تیرستور کمکی T'_p مناسب است (به شکل ۱۵-۹ مراجعه شود). بنابراین در چنین شاخه ای از اندولر با خاموش شدن فاز به فاز، تیرستورهای

اصلی T_p و T'_p باید به تناوب روشن و خاموش و در نتیجه جریان بار به تناوب مثبت و منفی شود.

چنانچه به دلیلی (مانند تغییر ضربانی فشار الکتریکی) وصل و قطع شاخه اندولر برای یک جهت مشخص جریان بار، الزامی باشد، باید خازن خاموش کننده را در جهت مناسب دوباره بار کرد. برای این منظور، در فاصله زمانی که با جریان بار مثبت، دیود D' هادی است، تیرستور T'_a روشن می شود. بدین ترتیب یک نیم نوسان در مدار نوسان کننده L_c و C پدید می آید. سرانجام، فشار الکتریکی u_c در دو سر خازن خاموش کننده دوباره منفی و تیرستور T'_a خاموش می شود. بدین ترتیب مدار خاموش کننده برای خاموش کردن دوباره تیرستور T_p ، با جریان بار مثبت، آماده است. برای جریان بار منفی، از نو بار شدن خازن خاموش کننده باید بار روشن شدن تیرستور کمکی T_a در طول هدایت جریان بار به توسط دیود D ، انجام پذیرد.

۱۵-۴-۳ محاسبه پدیده گذرا

برای مطالعه پدیده گذرا در دوران کموتاسیون اجباری، از شکل ۱۵-۱۰ استفاده می کنیم و خاموش شدن تیرستور اصلی T_p را برای جریان بار مثبت در نظر می گیریم. پس از روشن شدن تیرستور کمکی T_a در لحظه t_0 ، روابط زیر برقرارند

$$u_c + L_c \frac{di_c}{dt} = 0 \quad (15-15)$$

$$i_c = C \frac{du_c}{dt} \quad (15-16)$$

پاسخ این معادلات به کمک تبدیل لاپلاس و با در نظر گرفتن مقادیر اولیه $i_c = 0$ و $u_c = -U_{c0}$ به دست می آیند

$$i_c = \sqrt{\frac{C}{L_c}} U_{c0} \sin \omega_c \tau \quad (15-17)$$

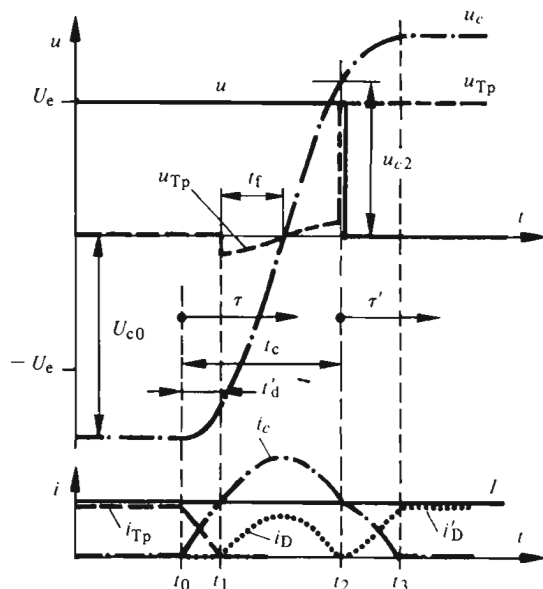
$$u_c = -U_{c0} \cos \omega_c \tau \quad (15-18)$$

و داریم

$$\omega_c = \frac{1}{\sqrt{L_c C}} \quad (15-19)$$



روند تغییرات u_c و i_c و همچنین کسیت‌های دیگر در شکل ۱۵-۱۱ نشان داده شده‌اند. جریان $i_{Tp} = I - i_c$ کاهش می‌یابد و در لحظه t_1 صفر می‌شود. از این لحظه به بعد، دیود D به هدایت و عبور جریان $i_D = i_c - I$ می‌پردازد. این امر که در این حالت مسدود



شکل ۱۵-۱۱ روند تغییرات جریان‌ها و فشارهای الکتریکی برای حالت خاموش شدن فاز به فاز و جریان بار مثبت.

خاموش کننده به توسط دیود D اتصال کوتاه شده است. در روابط ذکر شده در بالا تغییری نمی‌دهد. در لحظه t_1 جریان i_D صفر و دیود D قطع می‌شود و به شرط آنکه $u_c = u_{c\gamma} > U_e$ باشد دیود D' به هدایت می‌پردازد. در این حالت برای جریان i_c و فشار الکتریکی u_c ، رابطه‌های زیر معتبرند

$$u_c = U_e - L_c \frac{di_c}{dt} \quad (۱۵-۲۰)$$

$$i_c = C \frac{du_c}{dt} \quad (۱۵-۲۱)$$

در لحظه $t_c = \tau$ مقادیر اولیه عبارتند از: $i_c = I$ و $u_c = u_{c\gamma}$ که فشار الکتریکی

دو سر خازن خاموش کننده در لحظه‌ای است که دیود D قطع می‌شود. فشار الکتریکی u_e به طور سینوسی به افزایش خود ادامه می‌دهد و در لحظه t_p به مقدار ماکزیمم (بیشینه) می‌رسد. در لحظه t_p جریان i_e صفر می‌شود و از این لحظه به بعد جریان i_D که در دیود D' جاری است برابر جریان بار (I) باقی می‌ماند. بدین ترتیب کموتاسیون جریان از تیرستور اصلی T_p به دیود D' پایان می‌پذیرد.

در دوران کموتاسیون و به عبارت دقیقتر در دورانی که دیود D هادی است، فشار الکتریکی دوسر تیرستور اصلی T_p کمی منفی و برابر فشار الکتریکی مستقیم دیود D است. ولی به سبب وجود القاگرهای اتصالها (L_n)، تغییرات جریان i_D ، فشار الکتریکی اضافی مانند u_{Tp} القا می‌کند که چنانکه شکل ۱۵-۱۱ نشان می‌دهد ابتدا منفی و سپس مثبت است. زمان حفاظت t_f ، که در طول آن u_{Tp} منفی است (زمان لازم برای قطع شدن مطمئن تیرستور اصلی)، عملاً برابر فاصله زمانی بین لحظه t_p و لحظه ماکزیمم شدن جریانهای i_D و i_e است.

از معادله (۱۷-۱۵) نتیجه می‌شود

$$t_f = \frac{\pi}{\omega_c} - t'_d = \sqrt{L_c C} \arccos\left(\sqrt{\frac{L_c}{C}} \frac{I}{U_{co}}\right) \quad (15-22)$$

t'_d از معادله (۱۷-۱۵) با قرار دادن $i_e = I$ به دست می‌آید که پاسخ نظیر $\pi/2 \leq \omega_c t'_d \leq \pi$ معتبر است.

در حالت خاموش شدن فاز به فاز، فشار الکتریکی u در دوران کموتاسیون هیچ گونه اضافه فشار الکتریکی نشان نمی‌دهد و با یک تأخیر زمانی t_e نسبت به لحظه روشن شدن تیرستور کمکی T_a از مقدار U_e به صفر می‌رسد. این زمان کموتاسیون t_e نیز با قرار دادن $i_e = I$ در معادله (۱۷-۱۵) به دست می‌آید ولی برای t_e باید پاسخ نظیر $\pi/2 \leq \omega_c t_e \leq \pi$ انتخاب بشود.

فشار الکتریکی اولیه خازن خاموش کننده (U_{co}) به پدیده گذرای قبلی بستگی دارد و در حالت تکرار تناوبی می‌تواند بدروش آزمون و خطا محاسبه شود. در این محاسبه باید مقاومت اهمی پیچک القاگر L_c یا به عبارت دیگر تلفات مدار نوسان کننده را در نظر گرفت و گر نه مقدار U_{co} بینهایت می‌شود. در اینجا از بیان استدلالهای مربوط به این مطلب خودداری می‌شود.



فصل شانزدهم

مبدل‌های فرکانس با کموتاسیون اجباری

۱-۱۶ مقدمه

۱-۱-۱۶ کلیات

مبدل فرکانس، فرکانسی مانند f (معمولاً ۵۰ هرتز) را به فرکانس عموماً متغیر دیگری مانند p تبدیل می‌کند.

مبدل فرکانس با کموتاسیون اجباری معمولاً از یک مبدل جریان با کموتاسیون طبیعی و یک اندولر با کموتاسیون اجباری تشکیل می‌شود. این دو مبدل ایستابه کمک یک مدار میانجی به هم متصل می‌شوند. بسته به چگونگی کارکرد، مدار میانجی می‌تواند با فشار الکتریکی دایم یا با جریان دایم باشد. این دو نوع به ترتیب در بند ۱۶-۲ و بند های ۱۶-۳ و ۱۶-۴ تشریح خواهند شد.

از آنجا که قسمتهای اساسی تشکیل دهنده مبدل‌های فرکانس با مدار میانجی با فشار الکتریکی دایم به‌طور کامل در فصل‌های ۵، ۶، ۱۴ و ۱۵ بررسی شده‌اند، تشریح مدارها و کارکرد این مبدل‌ها در اینجا به اختصار انجام خواهند پذیرفت. در عوض، پدیده کموتاسیون اجباری در مورد مبدل‌های فرکانس با مدار جریان دایم میانجی که بر اصل دیگری استوار است، باید دقیقتر مطالعه شود.

۲-۱-۱۶ کاربرد مبدل‌های فرکانس با کموتاسیون اجباری

مهمترین کاربرد مبدل‌های فرکانس با کموتاسیون اجباری در تغذیه موتورهای آسنکرون برای به-

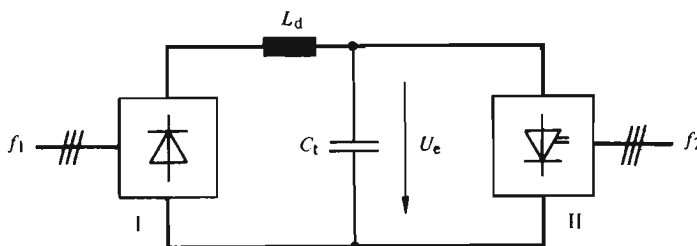
دست آوردن سرعت متغیر است. در بند ۱۴-۱-۲ توضیحات بیشتری داده شده است.

۲-۱۶ مبدل‌های فرکانس بامدار میانجی با فشار الکتریکی دایم

۱-۲-۱۶ مدار اساسی

مدار اساسی مبدل فرکانس بامدار میانجی با فشار الکتریکی دایم در شکل ۱-۱۶ نشان داده شده است.

شبکه سه فازه‌ای با فرکانس ثابت f_1 ، مبدل جریان با کموتاسیون طبیعی I را تغذیه می‌کند. امکانات متفاوت موجود در این قسمت در بند ۱۶-۲-۲ تشریح خواهند شد.



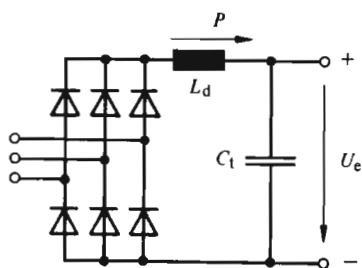
شکل ۱-۱۶ نمایش طرح واره‌ای مبدل فرکانس بامدار میانجی با فشار الکتریکی دایم.

مبدل جریان I، فشار الکتریکی دایم U_e را در ورودی اندولر با کموتاسیون اجباری II تأمین می‌کند. این اندولر معمولاً سه فازه است و فرکانس و حتی دامنه فشار الکتریکی متناوب تولید شده آن، با استفاده از روشهای بیان شده در فصل ۱۴، متغیرند.

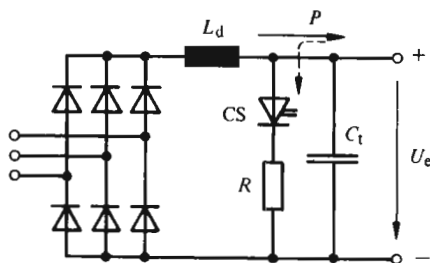
برای اعمال فشار الکتریکی دایم و ثابتی در ورودی اندولر با کموتاسیون اجباری، بین این اندولر و مبدل جریان I، مدار میانجی با فشار الکتریکی دایم قرار می‌گیرد. این مدار میانجی شامل خازن C_t است که تغییرات سریع جریان ورودی اندولر را تأمین می‌کند و به عنوان خازن حایل (میانگیر) در ورودی اندولر به کار می‌رود. این خازن همچنین وظیفه صاف کردن فشار الکتریکی یکسو شده را نیز عهده‌دار است. برای این منظور، گاهی یک پیچک القاگر L_d نیز اضافه می‌شود که همراه خازن C_t یک صافی پایین-گذر تشکیل می‌دهد. عموماً القاگری اتصال کوتاه شبکه تغذیه (القاگری کموتاسیون مبدل جریان I) کافی است تا همراه خازن C_t صاف بودن فشار الکتریکی یکسو شده را تضمین کند.

۲-۲-۱۶ تغذیه مدار میانجی

در شکل‌های ۲-۱۶ تا ۴-۱۶ سه نوع تغذیه مدار میانجی نشان داده شده‌اند. در ساده‌ترین روش از یکسوکننده بادیود و به صورت پل سه فازه استفاده می‌شود. در این حالت فشار الکتریکی داریم ثابت است. چون پل با دیود نمی‌تواند جریان داریم را در جهت معکوس هدایت کند، قدرت اکتیو P همواره به طرف اندولر با کموتاسیون اجباری خواهد بود. چنانچه در مواردی، مانند ترمز کردن موتور آسنکرونی که به توسط اندولر با کموتاسیون اجباری تغذیه شده است، لازم باشد علامت قدرت اکتیو عوض شود، می‌توان مطابق شکل ۳-۱۶، از یک مقاومت R و یک کنتاکتور ایستای CS استفاده کرد. در چنین حالتی، چنانکه در بند ۴-۱۲ بیان شد، مقدار مقاومت ظاهری و در نتیجه مقدار قدرت اکتیو قابل تغییر خواهد بود. قدرت اکتیو به توسط اندولر با کموتاسیون اجباری از بار سه فازه اخذ و در مقاومت R مدار میانجی تلف می‌شود.



شکل ۲-۱۶ تغذیه مدار میانجی به توسط یکسوکننده.

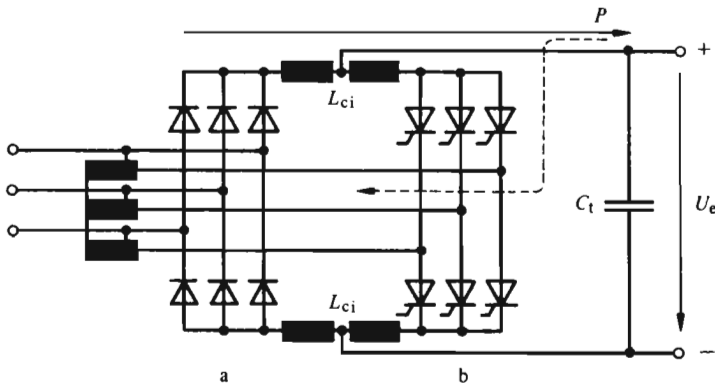


شکل ۳-۱۶ تغذیه مدار میانجی به توسط یکسوکننده همراه با مقاومت تعویض جهت قدرت اکتیو.

اگر تعویض جهت قدرت اکتیو به تواتر پیش آید، بهتر است یک مبدل جریان (با کموتاسیون طبیعی) که به صورت اندولر کار می‌کند (چنانکه شکل ۶-۱۴ نشان



می‌دهد*)، موازی معکوس با یکسو کننده سوار شود. در این حالت قدرت اکتیو برگشتی از طریق این اندولر در شبکه اولیه تزریق خواهد شد. برای جلوگیری از به وجود آمدن جریانهای گردشی خیلی زیاد (یکسو کننده با دیود را می‌توان به عنوان مبدل جریانی با زاویه تأخیر آتش $\alpha = 0^\circ$ در نظر گرفت)، فشار الکتریکی تغذیه پل اندولر باید کمی بیشتر از یکسو کننده با دیود باشد، تا برای زاویه تأخیر آتش $\alpha = 150^\circ$ ، قدر مطلق فشار الکتریکی دایم اندولر برابر فشار الکتریکی دایم یکسو کننده با دیود شود. برای این منظور می‌توان از یک اتوترانسفورماتور استفاده کرد. پیچکهای جریان گردشی در عین حال القاگرهای صاف کننده نیز خواهند بود.



شکل ۱۶-۴ تغذیه مدار میانجی به توسط مبدل جریان دو طرفه.

رابطه بین فشارهای الکتریکی متناوبی که پل با دیود (یکسو کننده) (a) و پل باتریستور (اندولر) (b) را تغذیه می‌کنند، از شرط اعمال شده به فشارهای الکتریکی دایم دو مبدل جریان با اتصال موازی معکوس [به معادله (۱۵-۴) مراجعه شود] به دست می‌آید. برای این دو مبدل رابطه زیر برقرار است

$$U_{di\circ a} \cos \alpha_a = -U_{di\circ b} \cos \alpha_b \quad (1-16)$$

در این حالت $\alpha_a = 0^\circ$ و $\alpha_b = 150^\circ$ است و نتیجه می‌شود

$$U_{di\circ a} = \frac{\sqrt{3}}{2} U_{di\circ b} \quad (2-16)$$

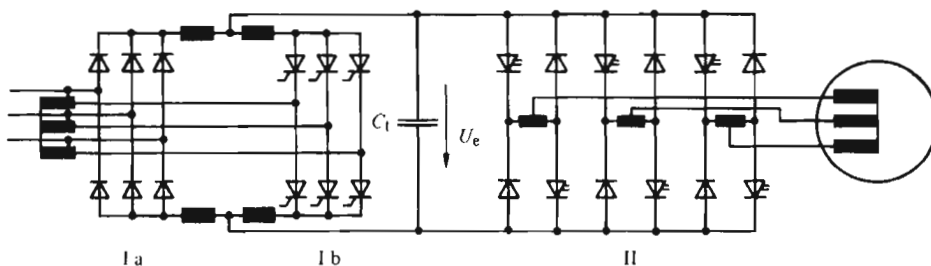
با توجه به اینکه $U_{di,c} = 1.35 U$ می‌باشد، که در آن U فشار الکتریکی مرکب است، می‌توان نوشت

$$U_b = \frac{2}{\sqrt{3}} U_a = 1.155 U_a \quad (3-16)$$

بنابراین، اتوترانسفورماتور به کار رفته باید دارای نسبت تبدیل ۱ : ۱.۱۵۵ باشد.

۳-۳-۱۶ مدار کامل مبدل فرکانس

در شکل ۵-۱۶ مثالی برای مدار کامل مبدل فرکانس با مدار میانجی بسا فشار الکتریکی داریم نشان داده شده است.



شکل ۵-۱۶ مدار کامل مبدل فرکانس با مدار میانجی با فشار الکتریکی داریم.

تغذیه با اتصال موازی معکوس مطابق شکل ۴-۱۶ انجام می‌شود، در صورتی که اندولر با کموتاسیون اجباری به صورت اتصال پل سه فاز با خاموش شدن مجرد است (به شکل ۱۴-۱۵ مراجعه شود). این مبدل مواتور آسنکرون سه فاز ای را تغذیه می‌کند. بدیهی است که هر کدام از اتصالهای بیان شده در فصل ۱۴ می‌تواند به جای اندولر با کموتاسیون اجباری به کار برود.

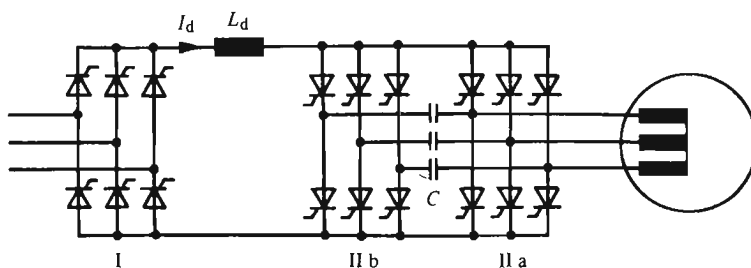
۳-۱۶ مبدل فرکانس با مدار جریان داریم میانجی واندولر با پل خاموش کننده کمکی

۱-۳-۱۶ مدار

مدار مبدل فرکانس با مدار جریان داریم میانجی در شکل ۶-۱۶ نشان داده شده است. این مدار از یک مبدل جریان I (با کموتاسیون طبیعی) و یک اندولر با کموتاسیون اجباری تشکیل



شده است. مبدل جریان I مدار میانجی با جریان دایم را تغذیه می کند و اندولر با کموتاسیون اجباری از دو اتصال پل سه فازه (IIa و IIb) ساخته شده است که شاخه های شان به توسط خازنهای خاموش کننده C به هم متصل اند. در مدار میانجی با جریان دایم، یک پیچک القاگر L_d قرار دارد که وظیفه اش صاف کردن جریان دایم I_d است. بار مبدل فرکانس، موتور آسنکرونی سه فازه است.



شکل ۱۶-۶ مدار مبدل فرکانس با مدار جریان دایم میانجی و اندولر با پل خاموش کننده کمکی.

این مدار به مدار بیان شده در بند ۱۱-۳ که با کموتاسیون طبیعی کار می کند (به شکل ۱۱-۹ مراجعه شود) شبیه است. با این تفاوت که در اینجا اندولر دارای پل سه فازه دومی (IIb) است که از تیرستورهای کمکی تشکیل شده. این پل برای خاموش کردن تیرستورهای اصلی پل اول (IIa) که جریان بار را هدایت می کنند، به کار می رود. کارکرد این مبدل فرکانس با آنچه در بند ۱۶-۲ بیان شد کاملاً تفاوت دارد. اولین تفاوت این است که در این حالت، جریان دایم I_d در مدار میانجی اعمال می شود و فشار الکتریکی دایم، بسته به احتیاج اندولر، متغیر است. تفاوت دوم در چگونگی کموتاسیون اجباری است. چنانکه در بند بعد تشریح خواهد شد، کموتاسیون اجباری از طریق بار صورت می پذیرد.

۱۶-۳-۲ کموتاسیون اجباری

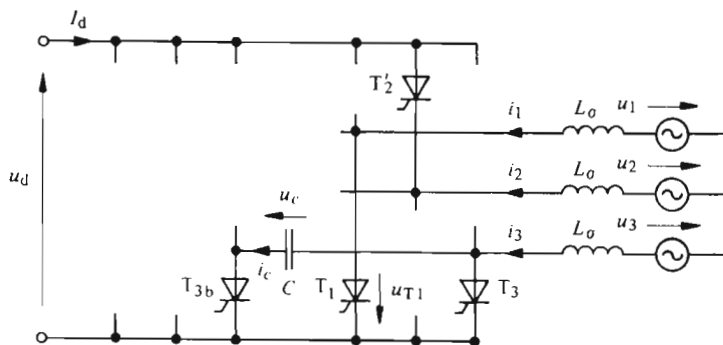
برای انتقال جریان دایم I_d از یک فاز بار به فاز دیگر، باید تیرستور کمکی (از پل IIb) مربوط به تیرستور اصلی (از پل IIa) که باید خاموش شود، روشن گردد. خازن خاموش کننده که از پیش بار شده، بخشی از بار خود را در خلاف جهت هدایت تیرستور اصلی تخلیه می کند و به سرعت آن را خاموش می سازد. چون جریان دایم I_d ، به توسط پیچک القاگر اعمال می شود، جریان بار از طریق تیرستور کمکی و خازن خاموش کننده عبور می کند. خازن خاموش کننده کاملاً تخلیه و سپس با جهت معکوس تا جایی بار می شود که

فشار الکتریکی بین آن‌د و کاتد تیرستور اصلی که باید روشن شود مثبت گردد و این تیرستور بتواند به حالت هدایت درآید. پس از روشن شدن تیرستور اصلی، جریان دائم I_d از تیرستور کمکی به این تیرستور اصلی منتقل می‌شود و بدین ترتیب جریان از فاز u_3 به فاز دیگر بار انتقال می‌یابد. در بند بعد این پدیده به طور کامل بررسی خواهد شد.

۳-۳-۱۶ پدیده گذرا در دوران کموتاسیون اجباری

برای مطالعه پدیده گذرای که در دوران کموتاسیون اجباری اتفاق می‌افتد، از شکل ۷-۱۶ استفاده می‌شود. در این شکل فقط تیرستورهای اصلی و کمکی که در هدایت جریان در طول پدیده مورد نظر درگیرند نشان داده شده‌اند.

بار با طرح واره معادلی نمایش داده شده و هر فاز آن شامل یک منبع فشار الکتریکی متناوب و یک القاگری نشتی L_o است. در حالتی که بار، ماشین آسنکرون باشد، فشار الکتریکی القا شده در هر سیم پیچ به جریان استاتور بستگی دارد. عملاً جریان استاتوری مستطیلی (همانند جریان متناوب یک مبدل جریان با کموتاسیون طبیعی)، ولی فشار الکتریکی استاتور عملاً سینوسی است. بنابراین برای مطالعه کموتاسیون اجباری می‌توان از طرح-واره معادل نشان داده شده در شکل ۷-۱۶، با این فرض که فشارهای الکتریکی u_1 ، u_2 و u_3 سینوسی‌اند و سیستم سه فاز متقارنی رامی‌سازند، استفاده کرد.



شکل ۷-۱۶ قسمت‌های اساسی اندوار برای مطالعه کموتاسیون اجباری در مدار شکل ۶-۱۶.

قبل از کموتاسیون، جریان دائم I_d مدار میانجی از طریق تیرستور اصلی T_1 ، فازهای ۲ و ۳ بار، و تیرستور اصلی T_3 جاری می‌شود. بنابراین داریم

$$i_1 = 0, \quad i_2 = -I_d, \quad i_3 = +I_d$$

تیرستور اصلی T_1 و تیرستور کمکی T_{3b} قطع‌اند (کلیه تیرستورهایی که در شکل



۷-۱۶ نشان داده نشده اند نیز قطع اند). فشار الکتریکی خازن خاموش کننده C منفی و برابر $u_c = -U_c$ است.

فرض کنیم بخواهیم جریان دائم I_d از فاز ۳ به فاز ۱ منتقل شود. برای این منظور باید در لحظه مربوط به $\omega t = -\pi/3 + \alpha'$ (به شکل ۸-۱۶ مراجعه شود) تیرستور کمکی T_{3b} روشن شود. همانند حالت مبدل جریان با کموتاسیون طبیعی، زاویه تأخیر آتش α' از محل تلاقی فشارهای الکتریکی مورد نظر اندازه گیری می شود. در مثال نمایش داده شده، $\alpha' > 180^\circ$ است و این به جهت کموتاسیون اجباری امکان پذیر است. بار منفی خازن خاموش کننده C باعث برقراری جریانی در حلقه متشکل از این خازن و تیرستورهای T_{3b} و T_p می شود. جهت این جریان در تیرستور T_p در خلاف جهت هدایت آن است. در نتیجه، جریان کل تیرستور T_{3b} به سرعت صفر و باعث قطع شدن آن می شود. پس از قطع شدن T_p ، جریان $i_p = I_d$ از طریق خازن خاموش کننده C و تیرستور کمکی T_{3b} عبور می کند. در دوران کموتاسیون اجباری می توان فرض کرد جریان دائم I_d ثابت است. فشار الکتریکی در دوسر خازن خاموش کننده از رابطه زیر به دست می آید

$$u_c = \frac{1}{C} \int i_c d\tau = \frac{1}{C} I_d \tau - U_c \quad (۴-۱۶)$$

فشار الکتریکی U_c از پیش مشخص نیست و بعداً محاسبه خواهد شد. در لحظه روشن شدن تیرستور کمکی T_{3b} ، تب روشن کننده ای هم به تیرستور اصلی T_1 اعمال می شود. این تیرستور که فشار الکتریکی بین آنند و کاندش منفی است، هنوز قادر به هدایت نیست. فشار الکتریکی u_{T1} از رابطه زیر به دست می آید

$$u_{T1} = u_1 - u_p + L_o \frac{di_p}{dt} + u_c = u_1 - u_p + u_c \quad (۵-۱۶)$$

این رابطه با در نظر گرفتن $i_p = I_d = cte$ ساده شده است. با قرار دادن

$$u_1 = \hat{U}_y \cos \omega t \quad (۶-۱۶)$$

$$u_p = \hat{U}_y \cos (\omega t - 2\pi/3) \quad (۷-۱۶)$$

نتیجه می شود

$$u_1 - u_p = -\sqrt{3} \hat{U}_y \sin (\omega t - 2\pi/3) = \sqrt{3} \hat{U}_y \sin (\omega t + \alpha') \quad (۸-۱۶)$$

در لحظه مربوط به $\omega t = \alpha_v$ ، فشار الکتریکی u_{T1} که تا به حال منفی بود، صفر می شود

و بنا به معادله‌های بالا می‌توان نوشت

$$\sqrt{3} \hat{U}_y \sin(\alpha_v + \alpha') + \frac{1}{\omega C} I_d \alpha_v - U_{co} = 0 \quad (9-16)$$

به شرط اینکه تپ روشن‌کننده هنوز هم برچکانسده تیرستور T_1 اثر کند، این تیرستور از این لحظه شروع به هدایت می‌کند. بنابراین، مدت زمان این تپ باید به اندازه کافی بلند باشد.

کموتاسیون جریان فاز در این لحظه شروع می‌شود و زاویه تأخیر آتش واقعی را می‌توان بنا بر شکل ۸-۱۶ به صورت $\alpha = \alpha_v + \alpha'$ تعریف کرد. در این لحظه فشار الکتریکی دوسرخازن خاموش‌کننده عبارت است از

$$u'_c = \frac{1}{\omega C} I_d \alpha_v - U_{co} = -\sqrt{3} \hat{U}_y \sin \alpha \quad (10-16)$$

در اثر هادی بودن تیرستورهای T_{1b} و T_1 ، خازن خاموش‌کننده C و القاگرهای نشتی (L_o) دو فاز ۱ و ۳، مدار نوسان‌کننده‌ای می‌سازند که معادله‌های دیفرانسیل زیر برایش معتبر است.

$$-L_o \frac{di_1}{dt} + u_1 - u_3 + L_o \frac{di_3}{dt} + u_c = 0 \quad (11-16)$$

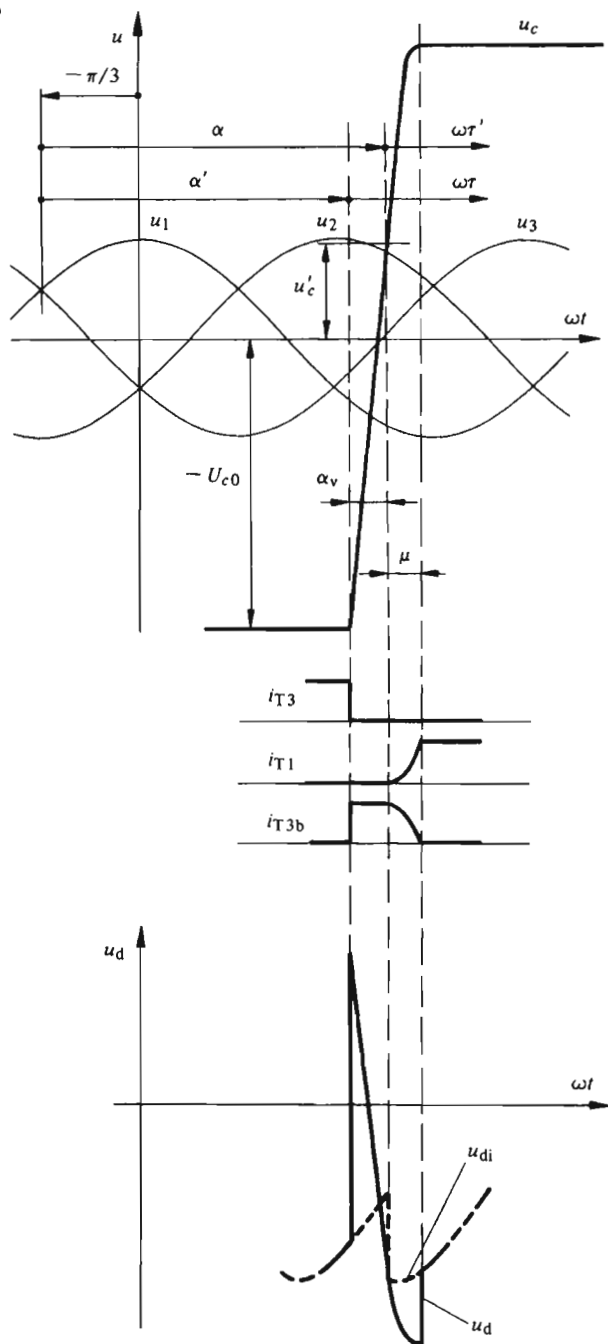
$$i_c = C \frac{du_c}{dt} \quad (12-16)$$

جریان i_c برابر جریان i_3 است. به لحاظ شناور (آزاد) بودن نقطه خنثای بار، مجموع $i_1 + i_2 + i_3$ باید صفر باشد. چون جریان i_2 برابر $-I_d$ است، داریم

$$i_1 = I_d - i_3 \quad (13-16)$$

بدین ترتیب با قراردادن مقدار $u_1 - u_3$ از رابطه (۸-۱۶)، معادله‌های (۱۱-۱۶) و (۱۲-۱۶) به صورت زیر درمی‌آیند

$$2 L_o \frac{di_3}{d\tau'} + \sqrt{3} \hat{U}_y \sin(\omega\tau' + \alpha) + u_c = 0 \quad (14-16)$$



شکل ۸-۱۶ روند تغییرات جریانها و فشارهای الکتریکی در دوران کموتاسیون اجباری در مدار شکل ۶-۱۶.

$$u_c = \frac{1}{C} \int_0^{\tau'} i_r d\tau' + u'_c \quad (15-16)$$

مقدار اولیه برای جریان i_r برابر I_d است و مقدار اولیه فشار الکتریکی دوسر خازن خاموش کننده در معادله (15-16)، به صورت u'_c در نظر گرفته شده. معمولاً پدیده کموتاسیون سریعتر از تغییرات فشارهای الکتریکی سینوسی است به طوری که می توان در جمله دوم معادله (14-16) از زاویه $\omega\tau'$ در مقابل α صرف نظر کرد و این جمله را به صورت ساده شده زیر نوشت

$$\sqrt{3} \hat{U}_y \sin(\omega\tau' + \alpha) \cong \sqrt{3} \hat{U}_y \sin \alpha = -u'_c \quad (16-16)$$

چنانچه معادله (15-16) در معادله (14-16) قرار داده شود، برای جریان i_r معادله دیفرانسیل زیر به دست می آید

$$2 L_o C \frac{d^2 i_r}{d\tau'^2} + i_r = 0 \quad (17-16)$$

پاسخ این معادله عبارت است از

$$i_r = I_d \cos \omega_c \tau' \quad (18-16)$$

که در آن

$$\omega_c = \frac{1}{\sqrt{2 L_o C}} \quad (19-16)$$

ω_c ضریب تشدید مدار نوسان کننده است و معمولاً خیلی بزرگتر از ω است. برای فشار الکتریکی دوسر خازن خاموش کننده با استفاده از معادله (15-16) رابطه زیر به دست می آید

$$u_c = \frac{I_d}{\omega_c C} \sin \omega_c \tau' - \sqrt{3} \hat{U}_y \sin \alpha \quad (20-16)$$

انتقال جریان از فاز ۳ به فاز ۱ در لحظه ای پایان می پذیرد که جریان i_r صفر شود. برای این لحظه از معادله (15-16) شرط $\omega_c \tau' = \pi/2$ به دست می آید. با وارد کردن زاویه تداخل μ (به شکل ۸-۱۶ مراجعه شود)، در پایان کموتاسیون $\mu = \omega\tau'$ است، در

نتیجه زاویه تداخل چنین خواهد بود

$$\mu = \frac{\omega}{\omega_c} \frac{\pi}{2} \quad (21-16)$$

در پایان کموتاسیون، تیرستور T_{3b} قطع و جریان i_c صفر می شود. فشار الکتریکی دو سر خازن خاموش کننده از این به بعد تغییر نمی کند و مقدارش از رابطه (۱۶-۲۰) به ازای $\tau' = \pi/2$ به دست می آید. این فشار الکتریکی برای کموتاسیون اجباری بعدی، یعنی خاموش کردن تیرستور T'_3 که با تیرستور T_3 متوالی است، به کار خواهد رفت و بنابراین با مقدار اولیه U_{co} برابر است. چنانچه تبدیل زیر در معادله (۱۶-۲۰) صورت گیرد

$$\frac{1}{\omega_c C} = \frac{2 L_o}{\omega_c 2 L_o C} = 2 L_o \omega_c \quad (22-16)$$

برای مقدار اولیه فشار الکتریکی دوسر خازن خاموش کننده رابطه زیر به دست می آید

$$U_{co} = 2\omega_c L_o I_d - \sqrt{3} \hat{U}_y \sin \alpha \quad (23-16)$$

با توجه به $\alpha > \pi$ (بد رابطه ۱۶-۸ مراجعه شود)، U_{co} مثبت است. ملاحظه می شود که این فشار الکتریکی به جریان دائم I_d در مدار میانجی نیز بستگی دارد.

۱۶-۳-۴ فشار الکتریکی دائم در مدار میانجی

مقدار لحظه ای فشار الکتریکی دائم در مدار میانجی (u_d)، از ترکیب فشارهای الکتریکی سینوسی دوفازی از بار که به تیرستورهای اصلی در حال هدایت مربوط اند، به دست می آید (به شکل ۱۶-۷ مراجعه شود). بنابراین، هرگاه از پدیده کموتاسیون صرف نظر شود، فشار الکتریکی دائم u_d همان روند تغییرات به دست آمده در حالت کار به صورت اندولر مبدل جریان با کموتاسیون طبیعی را خواهد داشت. برای مقدار متوسط فشار الکتریکی دائم ایدئال، نتایج به دست آمده در قسمت (۵-۹) را می توان به کار برد

$$U_{di\alpha} = U_{dio} \cos \alpha \quad (24-16)$$

فشار الکتریکی U_{dio} در اتصال پل سه فاز عبارت است از

$$U_{dio} = \frac{3\sqrt{6}}{\pi} U_y \quad (25-16)$$

برای تعیین اثر کموتاسیون اجباری، لازم است روند تغییرات فشار الکتریکی دایم u_d در طول دوران کموتاسیون مورد بررسی قرار گیرد (به شکل ۱۶-۸ مراجعه شود).
پیش از روشن شدن تیرستور کمکی T_{3b} ، فشار الکتریکی دایم $u_d = u_{di} = u_3 - u_2$ است. پس از روشن شدن این تیرستور، با توجه به اینکه جریانهای جاری در القاگرهای ناشی L_σ ثابت اند و تولید هیچ گونه افت فشار الکتریکی القایی نمی کنند، از شکل ۱۶-۷ نتیجه می شود

$$u_d = -u_c + u_3 - u_2 = -u_c + u_{di} \quad (۱۶-۲۶)$$

فشار الکتریکی u_c در دوسرخازن خاموش کننده از رابطه (۱۶-۴) به دست می آید.
از لحظه ای که تیرستور اصلی T_1 شروع به هدایت می کند، از آنجا که جریان i_1 ثابت است و فشار الکتریکی دایم ایدئال u_{di} در این حالت تفاوت فشارهای الکتریکی u_1 و u_2 است، مقدار لحظه ای فشار الکتریکی دایم می تواند به صورت زیر نوشته شود

$$u_d = -L_\sigma \frac{di_1}{dt} + u_1 - u_2 + L_\sigma \frac{di_2}{dt} = -L_\sigma \frac{di_1}{dt} + u_{di} \quad (۱۶-۲۷)$$

مقدار متوسط مؤلفه ناشی از کموتاسیون اجباری فشار الکتریکی دایم چنین است

$$U_{dc} = \frac{3}{\pi} \int_0^{\pi/2} (u_d - u_{di}) d\omega t \quad (۱۶-۲۸)$$

فشار الکتریکی u_d بیرون دوران کموتاسیون برابر u_{di} است و در دوران کموتاسیون به ترتیب از رابطه های (۱۶-۲۶) و (۱۶-۲۷) به دست می آید. بدین ترتیب می توان نوشت

$$U_{dc} = -\frac{3}{\pi} \left(\int_0^{\alpha_v} u_c d\omega\tau + L_\sigma \int_0^{\mu} \frac{di_1}{d\tau'} d\omega\tau' \right) \quad (۱۶-۲۹)$$

در انتگرال اول، u_c با رابطه (۱۶-۴) مشخص می شود. در انتگرال دوم باید در نظر داشت که در فاصله انتگرال گیری، i_1 از ۰ تا I_d تغییر می کند. بدین ترتیب داریم

$$U_{dc} = -\frac{3}{\pi} \left(\frac{1}{\omega C} I_d \frac{\alpha_v^2}{2} - U_{co} \alpha_v + \omega L_\sigma I_d \right) \quad (۱۶-۳۰)$$

این رابطه به کمک رابطه (۱۶-۹) و با در نظر گرفتن $\alpha_v + \alpha' = \alpha$ به صورت زیر در می آید

$$U_{dc} = -\frac{3}{\pi} \left[-(\sqrt{3} \hat{U}_y \sin \alpha + U_{co}) \frac{\alpha_v}{\gamma} + \omega L_o I_d \right] \quad (31-16)$$

که با قراردادن U_{co} از رابطه (۲۳-۱۶) چنین خلاصه می‌شود

$$U_{dc} = -\frac{3}{\pi} \omega L_o I_d \left(1 - \frac{\omega_c}{\omega} \alpha_v \right) \quad (32-16)$$

با قراردادن مقدار U_{co} بنابر رابطه (۲۳-۱۶) در معادله (۹-۱۶) و با استفاده از رابطه (۲۲-۱۶)، زاویه α_v چنین به دست می‌آید

$$\alpha_v = \frac{\omega}{\omega_c} \frac{\omega_c L_o I_d - \sqrt{3} \hat{U}_y \sin \alpha}{\omega_c L_o I_d} \quad (33-16)$$

بدین ترتیب U_{dc} به صورت نهایی زیر درمی‌آید

$$U_{dc} = -\frac{3}{\pi} \frac{\omega}{\omega_c} \sqrt{3} \hat{U}_y \sin \alpha = -\frac{\omega}{\omega_c} U_{dio} \sin \alpha \quad (34-16)$$

ملاحظه می‌شود که مؤلفه ناشی از کموتاسیون اجباری فشار الکتریکی دایم، مستقل از جریان I_d است. از آنجا که معمولاً $\alpha > 180^\circ$ است، این مؤلفه مثبت است. بنابراین برای فشار الکتریکی دایم خواهیم داشت

$$U_d = U_{dio} \left(\cos \alpha - \frac{\omega}{\omega_c} \sin \alpha \right) \quad (35-16)$$

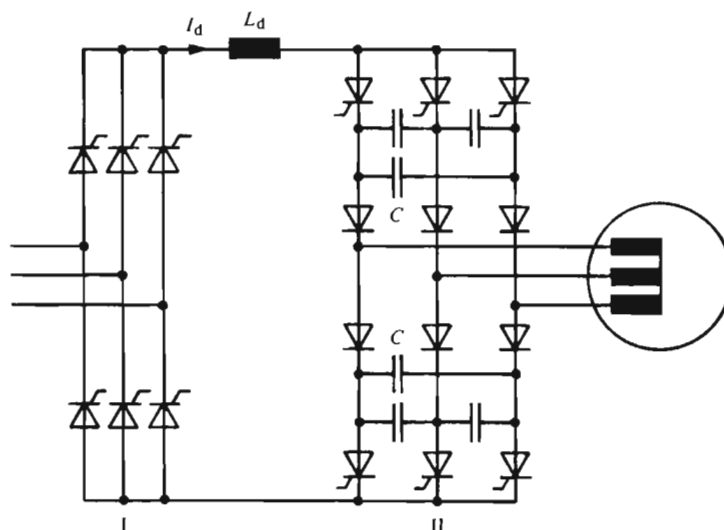
مقدار متوسط فشار الکتریکی دایم در دوسر مبدل جریان I (به شکل ۱۶-۶ مراجعه شود) که مدار میانجی را تغذیه می‌کند نیز باید همین مقدار (از نظر قدر مطلق) باشد.

۴-۱۶ مبدل‌های فرکانس با مدار جریان دایم میانجی، و اندولر با خاموش شدن مرحله‌ای فاز

۱-۴-۱۶ مدار

مدار دیگری برای مبدل فرکانس، با مدار جریان دایم میانجی، در شکل ۱۶-۹ نشان داده شده است. همانند حالت قبلی، مبدل جریان I (با کموتاسیون طبیعی)، مدار میانجی با جریان دایم را تغذیه می‌کند. اندولر کموتاسیون اجباری تنها یک اتصال پل سه فاز II

است. با هر تیریس‌تور، دیودی متوالی شده و در هر نیمه‌پل سدخازن خاموش کننده C وجود دارد. بار، موتور آسنکرون است و مدار جریان دایم میانجی دارای یک پیچک القاگر L_d است.



شکل ۱۶-۹ مدار مبدل فرکانس با مدار جریان دایم میانجی و اندولر با خاموش شدن مرحله‌ای فاز.

این مبدل فرکانس کارکردی مشابه آنچه در بند ۱۶-۳ بیان شد دارد. جریان دایم I_d به مدار میانجی اعمال و در نتیجه فشار الکتریکی دایم بر حسب احتیاج اندولر برقرار می‌شود. چنانکه در بند بعد تشریح خواهد شد، کموتاسیون اجباری در این حالت نیز از طریق بار صورت می‌پذیرد.

۱۶-۴-۲ کموتاسیون اجباری

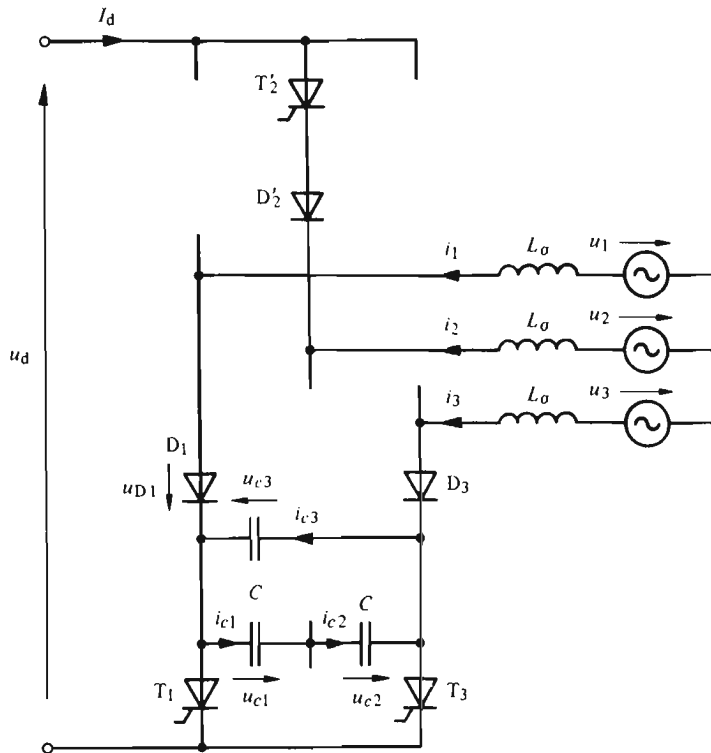
برای انتقال جریان دایم I_d از فازی به فاز دیگر، کافی است تاتیریس‌تور مربوط به حالت هدایت جدید روشن شود. در این نیمه‌پل، خازنهای خاموش کننده بار شده از پیش، مقداری از بار خود را بر روی تیریس‌توری که تا به حال هدایت می‌کرد تخلیه می‌کنند و باعث خاموش شدن سریع آن می‌شوند. از این پس، جریان بار از طریق تیریس‌تور تازه روشن شده، خازنهای خاموش کننده و دیودی که تا به حال هادی بود عبور می‌کند. خازنهای خاموش کننده کاملاً تخلیه و در جهت مخالف دوباره بار می‌شوند تا جایی که فشار الکتریکی بین آن‌ها کاند دیود متوالی با تیریس‌تور تازه روشن شده مثبت شود. در این لحظه، دیود نامبرده شروع

به‌دهدایت می‌کند. بدین ترتیب جریان دایم از دیودی که قبلاً هادی بود به این دیود منتقل می‌شود. در نتیجه جریان از یک فاز بار به فاز دیگر انتقال می‌یابد. پدیده کموتاسیون، در بند بعد به‌طریق دقیقتر مطالعه خواهد شد.

۳-۴-۱۶ پدیده گذرا در طول کموتاسیون اجباری

برای مطالعه دقیقتر پدیده گذرای که در طول کموتاسیون اجباری روی می‌دهد از شکل ۱۵-۱۶ استفاده می‌شود. در این شکل فقط عناصر یکسوسازی (تیرستورها و دیودها) نشان داده شده‌اند که در طول کموتاسیون در هدایت جریان، درگیرند. بار، باز هم به‌صورت مدار معادل نمایش داده شده است (به بند ۳-۳-۱۶ مراجعه شود).

پیش از کموتاسیون، جریان دایم مدار میانجی (I_d) از طریق تیرستور T_2 ، دیود D_2 ، فازهای ۳ و ۲، دیود D_3 و تیرستور T_3 عبور می‌کنند و داریم: $i_1 = 0$ ، $i_2 = -I_d$ و $i_3 = +I_d$. تیرستور T_1 و دیود D_1 در حالت قطع‌اند. فرض می‌شود که فشارهای الکتریکی در



شکل ۱۵-۱۶ اجزای اساسی اندولر برای مطالعه کموتاسیون اجباری در مدار شکل ۱۶-۹.

دوسرخازنهای خاموش کننده عبارتند از $u_{c3} = -U_{c0}$ و $u_{c2} = U_{c0}$ ، $u_{c1} = 0$ جریان دایم باید از فاز ۳ به فاز ۱ انتقال یابد. برای این منظور تیرستور T_1 باید در لحظه مربوط به $\omega t = -\pi/3 + \alpha'$ روشن گردد (به شکل ۱۶-۱۱ مراجعه شود). زاویه تأخیر آتش α' از محل تلاقی فشارهای الکتریکی ساده مورد نظر اندازه گیری می شود. بار خازنهای خاموش کننده باعث افزایش جریان تیرستور T_1 و کاهش جریان تیرستور T_3 می شود. بنابراین جریان کل تیرستور T_3 به سرعت به صفر می رسد و این تیرستور به حالت قطع درمی آید. جریان $i_3 = I_d$ حالا از طریق خازنهای خاموش کننده و تیرستور T_1 عبور می کند. در اینجا نیز فرض می شود که، جریان دایم I_d در دوران کموتاسیون اجباری مقداری است ثابت. از آنجا که سه خازن خاموش کننده یکسان اند و چنانکه از شکل ۱۶-۱۰ برمی آید، جریان در سه خازن خاموش کننده عبارت است از

$$i_{c1} = i_{c2} = -i_3/3 ; i_{c3} = 2i_3/3 \quad (16-36)$$

باتوجه به $i_3 = I_d = cte$ ، فشار الکتریکی در دوسرخازنهای خاموش کننده چنین به دست می آید

$$u_{c1} = -\frac{1}{C} \frac{I_d}{3} \tau \quad (16-37)$$

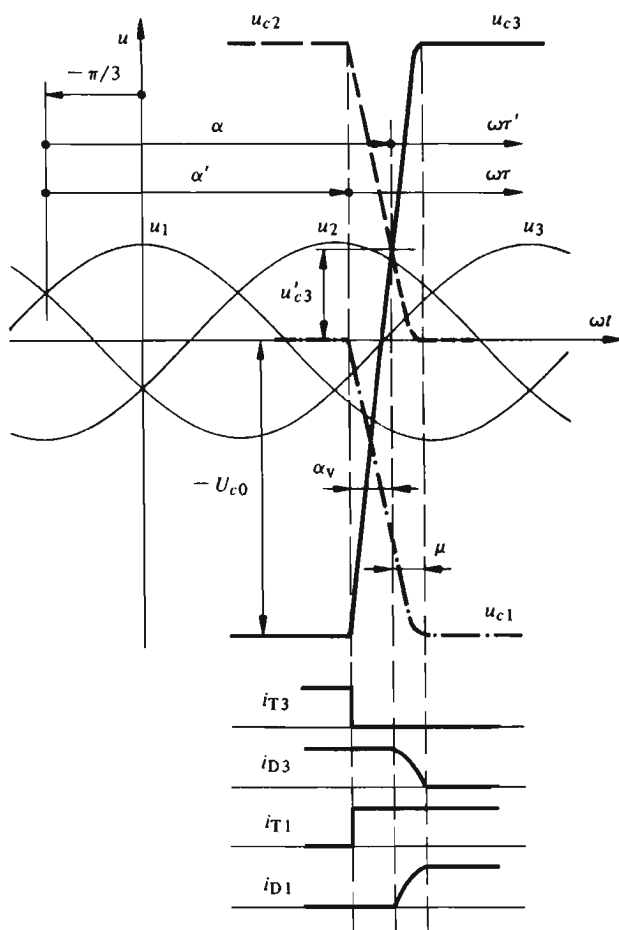
$$u_{c2} = -\frac{1}{C} \frac{I_d}{3} \tau + U_{c0} \quad (16-38)$$

$$u_{c3} = \frac{1}{C} \frac{2I_d}{3} \tau - U_{c0} \quad (16-39)$$

فشار الکتریکی اولیه U_{c0} از پیش مشخص نیست و از وضع حاصل در پایان دوران کموتاسیون تعیین می شود.

با در نظر گرفتن اینکه i_3 ثابت است، فشار الکتریکی بین آند و کاتد دیود D_1 به صورت زیر خلاصه می شود

$$u_{D1} = u_1 - u_3 + L_\sigma \frac{di_3}{dt} + u_{c3} = u_1 - u_3 + u_{c3} \quad (16-40)$$



شکل ۱۱-۱۶ روند تغییرات جریانها و فشارهای الکتریکی در دوران کموتاسیون اجباری در مدار شکل ۹-۱۶.

اختلاف بین فشارهای الکتریکی u_1 و u_3 را، رابطه (۸-۱۶) مشخص می کند. ملاحظه می شود که فشار الکتریکی u_{D1} ابتدا منفی است و D_1 هدایت نمی کند. در لحظه مربوط به $\omega t = \alpha_v$ فشار الکتریکی u_{D1} صفر می شود و بنا بر رابطه های (۸-۱۶)، (۳۹-۱۶) و (۴۰-۱۶) می توان نوشت

$$\sqrt{3} \hat{U}_y \sin(\alpha_v + \alpha') + \frac{1}{\omega C} \frac{2I_d}{3} \alpha_v - U_{c_c} = 0 \quad (41-16)$$

دیود D_1 از این لحظه شروع به هدایت می‌کند. چنانچه مطابق شکل ۱۱-۱۶ فرض شود، فشارهای الکتریکی بین سرهای خازنهای خاموش‌کننده در این لحظه چنین به دست می‌آیند

$$u'_{c1} = -\frac{1}{\omega C} \frac{I_d}{3} \alpha_v = -\frac{1}{3} (U_{c_o} - \sqrt{3} \hat{U}_y \sin \alpha) \quad (42-16)$$

$$u'_{c2} = -\frac{1}{\omega C} \frac{I_d}{3} \alpha_v + U_{c_o} = \frac{1}{3} (U_{c_o} + \sqrt{3} \hat{U}_y \sin \alpha) \quad (43-16)$$

$$u'_{c3} = \frac{1}{\omega C} \frac{2I_d}{3} \alpha_v - U_{c_o} = -\sqrt{3} \hat{U}_y \sin \alpha \quad (44-16)$$

از لحظه‌ای که دیود D_1 شروع به هدایت می‌کند، خازنهای خاموش‌کننده و القاگرهای نشتی فازهای ۱ و ۳ مداری نوسان‌کننده می‌سازند. برای این مدار معادله‌های دیفرانسیل زیر برقرارند

$$-L_\sigma \frac{di_1}{dt} + u_1 - u_r + L_\sigma \frac{di_r}{dt} + u_{c3} = 0 \quad (45-16)$$

$$i_{c3} = C \frac{du_{c3}}{dt} \quad (46-16)$$

بنا بر رابطه (۳۶-۱۶)، $i_{r3} = 2i_r/3$ است. بدسبب آزاد بودن نقطه خنثای بار $i_1 + i_2 + i_3 = 0$ است. علاوه بر این، چون i_2 همواره برابر $-I_d$ است داریم: $i_1 = I_d - i_r$ (بر رابطه ۱۳-۱۶ مراجعه شود). بدین ترتیب معادله‌های دیفرانسیل بالا می‌توانند به صورت زیر نوشته شوند

$$2L_\sigma \frac{di_r}{d\tau'} + \sqrt{3} \hat{U}_y \sin(\omega\tau' + \alpha) + u_{c3} = 0 \quad (47-16)$$

$$u_{c3} = \frac{2}{3C} \int i_r d\tau' + u'_{c3} \quad (48-16)$$



PowerEn.ir

مقدار اولیه برای جریان i_p برابر I_d و برای فشار الکتریکی u_{cp} برابر u'_{cp} است. با فرض اینکه پدیده کموتاسیون که u'_{cp} قبلاً در معادله (۴۸-۱۶) در نظر گرفته شده است. برای این که پدیده کموتاسیون خیلی سریعتر از تغییرات فشار الکتریکی سینوسی روی می دهد، در جمله دوم معادله (۴۷-۱۶) می توان از زاویه $\omega\tau'$ در مقابل α صرف نظر و آن را به صورت زیر ساده کرد

$$\sqrt{3} \hat{U}_y \sin(\omega\tau' + \alpha) \cong \sqrt{3} \hat{U}_y \sin \alpha = -u'_{cp} \quad (۴۹-۱۶)$$

با استفاده از معادله های (۴۷-۱۶) و (۴۸-۱۶)، معادله دیفرانسیل زیر را می توان به دست آورد

$$3 L_o C \frac{d^2 i_p}{d\tau'^2} + i_p = 0 \quad (۵۰-۱۶)$$

پاسخ معادله فوق با در نظر گرفتن وضع اولیه به صورت زیر درمی آید

$$i_p = I_d \cos \omega_c \tau' \quad (۵۱-۱۶)$$

ω_c ، ضربان تشدید مدار نوسان کننده برابر است با

$$\omega_c = \frac{1}{\sqrt{3 L_o C}} \quad (۵۲-۱۶)$$

فشار الکتریکی u_{cp} از معادله های (۴۸-۱۶) و (۴۹-۱۶) به دست می آید

$$u_{cp} = \frac{2 I_d}{3 \omega_c C} \sin \omega_c \tau' - \sqrt{3} \hat{U}_y \sin \alpha \quad (۵۳-۱۶)$$

انتقال جریان از فاز ۳ به فاز ۱ موقعی پایان می پذیرد که جریان i_p صفر شود. معادله (۵۱-۱۶) نشان می دهد که صفر شدن جریان i_p در لحظه مربوط به $\omega\tau' = \pi/2$ اتفاق می افتد. در این حالت نیز زاویه تداخل μ را رابطه (۲۱-۱۶) مشخص می کند (به شکل ۱۱-۱۶ مراجعه شود).

در پایان کموتاسیون، دیود D_p قطع می شود. جریان i_p و در نتیجه جریانهای خازنهای خاموش کننده صفر می مانند. فشار الکتریکی دوسر خازنهای خاموش کننده از رابطه (۵۳-۱۶) و بدای $\omega_c \tau' = \pi/2$ به دست می آید. این فشار الکتریکی برای خاموش کردن اجباری بعدی بدکار خواهد رفت و بنابراین مقدار آن متناظر با قدر مطلق فشار الکتریکی اولیه U_{co} است. از رابطه

$$\frac{1}{\omega_c C} = \frac{3 L_o}{\omega_c 3 L_o C} = 3 L_o \omega_c \quad (۵۴-۱۶)$$

فشار الکتریکی اولیه چنین به دست می آید

$$U_{c0} = 2 \omega_c L_\sigma I_d - \sqrt{3} \hat{U}_y \sin \alpha \quad (55-16)$$

و این همان فشار الکتریکی اولیه به دست آمده برای اندولر بررسی شده در بند پیش است (رابطه ۲۳-۱۶).

به کمک رابطه‌های (۳۶-۱۶)، (۵۱-۱۶)، (۵۴-۱۶)، (۴۲-۱۶) و (۵۵-۱۶) فشارهای الکتریکی u_{c1} و u_{c2} در پایان کموتاسیون چنین محاسبه می‌شوند

$$\begin{aligned} u_{c1}'' &= \frac{1}{\omega_c C} \int_0^{\pi/2} i_{c1} d\omega_c \tau' + u_{c1}' = -\frac{I_d}{3\omega_c C} + u_{c1}' = \\ &= -\omega_c L_\sigma I_d - \frac{1}{3} (U_{c0} - \sqrt{3} \hat{U}_y \sin \alpha) = -U_{c0} \quad (56-16) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} u_{c2}'' &= \frac{1}{\omega_c C} \int_0^{\pi/2} i_{c2} d\omega_c \tau' + u_{c2}' = -\frac{I_d}{3\omega_c C} + u_{c2}' = \\ &= -\omega_c L_\sigma I_d + \frac{1}{3} (U_{c0} + \sqrt{3} \hat{U}_y \sin \alpha) = 0 \quad (57-16) \end{aligned}$$

ملاحظه می‌شود که فشارهای الکتریکی دوسرخازنهای خاموش کننده به‌طور دوره‌ای عوض شده‌اند و چنان ترتیبی دارند که انتقال جریان فاز ۱ به فاز ۲ را امکان پذیر می‌سازند. از این روست که، در مورد این اندولر اصطلاح خاموش شدن مرحله‌ای فاز بدکار رفته است.

۴-۴-۱۶ فشار الکتریکی دایم در مدار میانجی

روند تغییرات فشار الکتریکی دایم در مدار میانجی را می‌توان با عملیاتی مشابه بند ۴-۳-۱۶ به دست آورد. بدین ترتیب ملاحظه می‌شود که در دوران و بیرون دوران کموتاسیون، روند تغییرات لحظه‌ای فشار الکتریکی u_d برای این مدار مشابه مدار مطابق شده در بند ۳-۱۶ است (به شکل ۸-۱۶ مراجعه شود). در اینجا از تکرار محاسبات خودداری می‌شود. در این حالت نیز، برای تعیین مقدار متوسط فشار الکتریکی دایم U_d می‌توان رابطه (۳۵-۱۶) را بدکار برد.



واژه‌نامه انگلیسی به فارسی

Absorbtion	جذب کننده
Ajustation	میزان کردن
amortissement	میرایی
Amplificateur operationnel	تقویت کننده عملیاتی
Analogique	آنالوگی (قیاسی)
Angle de retard d' allumage	زاویه تأخیر آتش
Antiparalléle	موازی معکوس
Boole	بول
Calculateur de processus	حسابگر فرآیند
Cartes enfichables	کارت‌های فیش خور
Cascade	زنجیره‌ای
Commutation	کمو تاسیون
Contacteur de Courant	کنتاکتور جریان
Convection naturelle	جابده جایی طبیعی
Convertisseur de Courant	مبدل جریان
Convertisseur de Courant bidirectionnel	مبدل جریان دوطرفه
Convertisseur de fréquence a'Circuit intermediaire	مبدل فرکانس با مدار میانی
Convertisseur de fréquence direct	مبدل مستقیم فرکانس
Courant de maintien	جریان نگهدارنده
Culasse	یوغ
Cycloconvertisseur	مبدل سیکل

Direct	مستقیم
Empietement	تداخل
Equipements de puissance	تجهیزات قدرت
Feuilles d' application	ورقه‌های کارشناختی
Flanc montant	پیشانی باشیب تند
Flux de fuite	فوران نشتی
Fonctino de transfert	تابع تبدیلی
Foucault	فوکو
Fourier	فوریه
Gachette	چکانه
hacheur	برشگر
Hybride	دورگه
Indice de pulsation	شاخص ضربان
Impulsion d' allumage	پالس (تپ) روشن‌کننده
Inductance Cyclique	القاگری ظاهری
Inductance de fuite	اندوکنانس (القاگری) نشتی
Jonction	پیوندگاه
Logique	منطقی
Microprocesseur	میکروپروسسور
Module	مدول
Nyquist ou Bode	نایکیست یا بد
Onduleur	اندولر
Pointes de tension	جهشهای فشار
Pont	پل



PowerEn.ir

Porteurs de charge

Processus

Programmation

push - pull

rack

Reactance

Redresseur

Regulateur

Sous - station

Schéma

Schéma - bloc

Self de Lissage

Simulation

Superposition

Tampon

Tension de seuil

tête - bêche

Traction

typique

Variateur de Courant

Varistor

ناقلهای بار الکتریکی

فرآیند

برنامه ریزی

ران و کش (پوش-پول)

راک

رئکتانس

یکسو کننده

تنظیم کننده

پست فرعی

طرح واره (شما)

شما - بلوک

الفا گر صاف کننده

شبیه سازی

برهم نهی

حایل (میانیگیر)

فشار الکتریکی آستانه

سر بده

حمل و نقل (کشند)

نوعی

تغییر دهنده (برشگر) جریان

وارستور



POWEREN.IR