



حفاظت ترانسفورماتورهای قدرت

بخش اول : ترانسفورماتورهای اندازه گیری

مدرس : علی اصغر فرخی راد

کارشناس ارشد برق منطقه ای خوزستان

روشهای اندازه گیری جریان در شبکه فشار قوی

➤ اندوکتیو

➤ **پیچک روگوفسکی:** در پیچک روگوفسکی، هسته از مقوا ساخته می شود لذا و L مقدار کمی خواهد داشت لذا ولتاژ ثانویه کم خواهد شد، لذا نمی توان از این پیچک برای مقاصد حفاظتی استفاده نمود. اگر بخواهیم توان خروجی آن را زیاد کنیم حجم این پیچک بسیار بزرگ می شود بنابراین در عمل از پیچک های با هسته آهنی استفاده می شود.

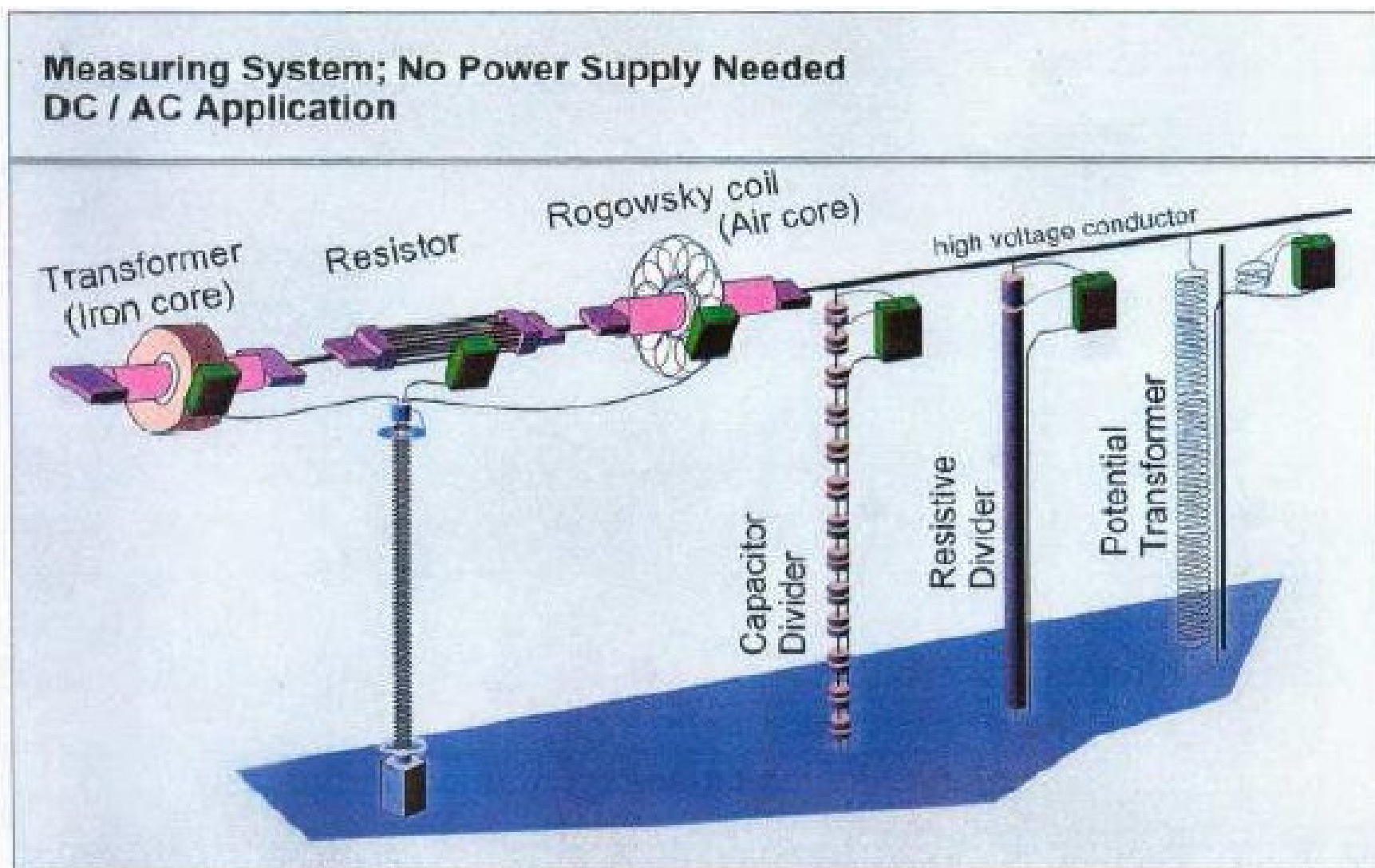
➤ **اندازه گیری مقاومتی در سیستم DC ($V=RI$):** از این روش در سیستم AC بخاطر تلفات زیاد استفاده نمی شود.

➤ **اندوکتیو / نوری:** این روش، در آینده مورد استفاده قرار خواهد گرفت.

➤ **نوری:** این روش، در آینده مورد استفاده قرار خواهد گرفت.



روشهای اندازه گیری جریان در شبکه فشار قوی



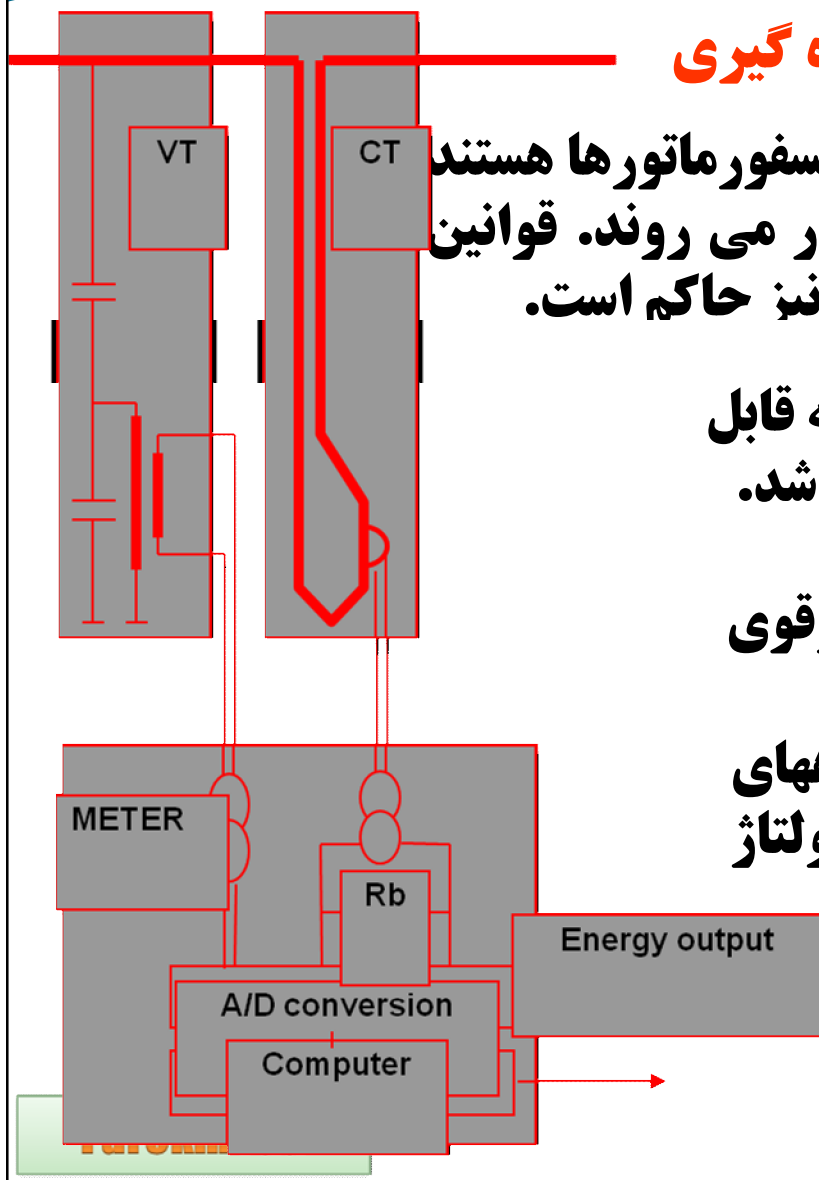
وظایف اصلی ترانسفورماتورهای اندازه گیری

ترانسفورماتورهای اندازه گیری نوع خاصی از ترانسفورماتورها هستند که برای مقاصد اندازه گیری ولتاژ و جریان به کار می روند. قوانین عمومی ترانسفورماتور بر کار این ترانسفورماتورها نیز حاکم است.

تبدیل جریان یا ولتاژ از مقدار زیاد به مقداری که قابل استفاده برای دستگاههای اندازه گیری و حفاظتی باشد.

جداسازی عایقی مدار اندازه گیری از شبکه فشارقوی

فراهم نمودن امکان استاندارد کردن دستگاههای اندازه گیری و رله ها به تعداد محدودی جریان و ولتاژ استاندارد.



تعاریف

ترانسفورماتور جریانی: یک نوع ترانسفورماتور اندازه گیری است که در آن، جریان ثانویه متناسب با جریان اولیه است و اختلاف فاز این دو جریان تقریباً برابر با صفر می باشد.

سیم پیچ اولیه: سیم پیچی است، که جریانی تبدیل شونده از میان آن می گذرد.

سیم پیچ ثانویه: سیم پیچی است، که برای تغذیه کردن مدارهای جریانی وسایل اندازه گیری، میترینگ، رله های حفاظتی و سایر دستگاههای مشابه استفاده می شود.

جریان نامی اولیه: مقدار جریان اولیه، که ترانس جریانی برای آن ساخته شده است. مقادیر استاندارد جریان اولیه ترانسهای جریانی اعداد زیر یا ضربایی از آنها هستند: ۷۵-۶۰-۵۰-۴۰-۳۰-۲۵-۲۰-۱۵-۱۲.۵-۱۰-۵. برای ترانسهایی که به صورت دلتا بسته شوند، مقادیر فوق بر $\sqrt{3}$ تقسیم می شوند.

جریان نامی ثانویه: مقدار جریان ثانویه، که ترانس جریانی برای آن ساخته شده است. مقادیر استاندارد برای جریان ثانویه هم ۵، ۲، ۱ آمپر می باشند.

نسبت تبدیل نامی: نسبت مقدار جریان نامی اولیه به جریان نامی ثانویه ترانس است.

تعاریف

نسبت تبدیل واقعی: نسبت مقدار جریان واقعی اولیه به جریان واقعی ثانویه ترانس است.

خطای جریان: مقدار خطایی است که در اندازه گیری جریان ایجاد می شود و از این واقعیت ناشی می شود که نسبت تبدیل واقعی ترانس برابر با نسبت تبدیل نامی ترانس نیست. مقدار خطای جریان بر حسب درصد از فرمول زیر محاسبه می شود.

$$\text{Current error \%} = \frac{(K_n \cdot I_s - I_p) \cdot 100}{I_p}$$

جابجایی فاز جریان: اختلاف فاز بین بردارهای جریانی اولیه و ثانویه ترانس است و در یک ترانس جریان با ساختار خوب برابر با صفر است.

کلاس دقت: یکی از علائم مشخصه ترانس جریان است که معرف باقی ماندن خطای ترانس جریان، تحت شرایط استفاده از قبل تعیین شده در یک محدوده مشخص است.

بردن (burden): امپدانس مدار سمت ثانویه ترانس، بر حسب اهم و ضریب توان است. مقدار Burden معمولاً بر حسب VA نمایش داده می شود و نشانگر مقدار ولت – آمپر جذب شده توسط مدار ثانویه در جریان نامی ثانویه و تحت ضریب توان مشخص است. مقدار Burden نامی ترانس، مقداری از VA است که در آن دقت ترانس جریانی حفظ می شود. بردن نامی مقاومتی مقدار نامی مقاومت متصل شونده به ثانویه ترانس جریان است مقادیر استاندارد نامی خروجی ترانس جریان عبارتند از ۳۰-۱۵-۱۰-۵-۲.۵ ولت آمپر. مقادیر بزرگتر از 30MVA نیز با توجه به نوع کاربرد ممکن است انتخاب شوند.

جریان حرارتی پیوسته نامی: جریان حرارتی پیوسته نامی هم برابر با مقدار جریان نامی اولیه می باشد.

تعاریف

➤ **مقاومت سیم پیچ ثانویه:** مقاومت ترانس جریان است و در دمای ۷۵ درجه سانتی گراد و یا هر دمای مشخص داده می شود.

➤ **بالاترین ولتاژ برای تجهیز:** بالاترین مقدار مؤثر (RMS) فاز – فاز ولتاژ است که ترانس با توجه به خاصیت عایقی اش برای آن ساخته شده است.

➤ **سطح عایقی نامی:** بیانگر خاصیت عایقی ترانس با توجه به مقاومت دی الکتریک آن در مقابل فشارهای ولتاژی وارده است.

➤ **مقدار نامی جریان حرارتی در مدت زمان کم (Ith):** مقدار مؤثر جریان اولیه ترانس در اتصال کوتاه سمت ثانویه، برای مدت ۱ ثانیه بدون هیچ گونه اثر مخرب بر روی آن است.

➤ **مقدار نامی جریان دینامیک (Idyn):** مقدار پیک جریان اولیه ترانس در اتصال کوتاه سمت ثانویه، است که ترانس بدون هیچ گونه اثر مخرب الکتریکی یا مکانیکی تحت نیروی الکترو مغناطیسی می تواند تحمل کند. مقدار این جریان برابر با ۲.۵ برابر مقدار نامی جریان حرارتی در مدت زمان کم است و در صورت متفاوت بودن با مقدار فوق در Name plate ترانس داده می شود.

➤ **مقدار نامی جریان حرارتی پیوسته:** مقداری مجاز جریان پیوسته گذرنده از سیم پیچ اولیه در حالی که سیم پیچ

ثانویه به Burden نامی وصل باشد بدون اینکه درجه حرارت سیم پیچ از حد مجاز تعیین شده تجاوز کند.

تعاریف

جریان تحریک: مقدار مؤثر جریانی است که توسط سیم پیچ ثانویه ترانس کشیده می شود وقتی که ولتاژی سینوسی با فرکانس نامی به ترمینالهای ثانویه وصل شده، و سیم پیچهای اولیه و سایر سیم پیچهای ترانس مدار باز باشند.

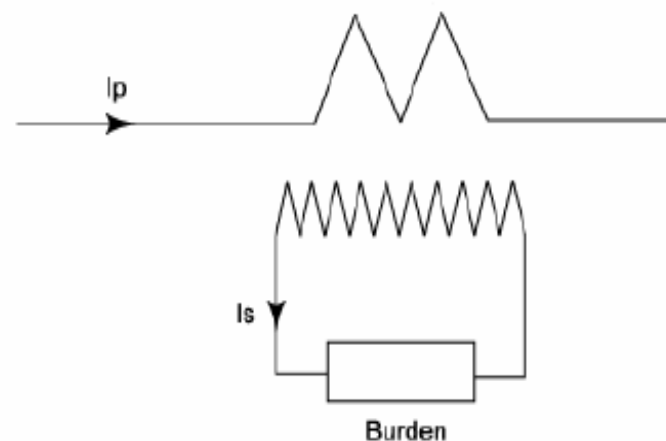
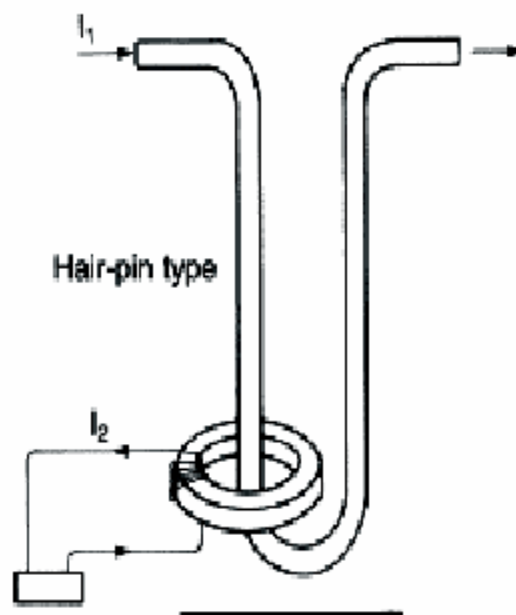
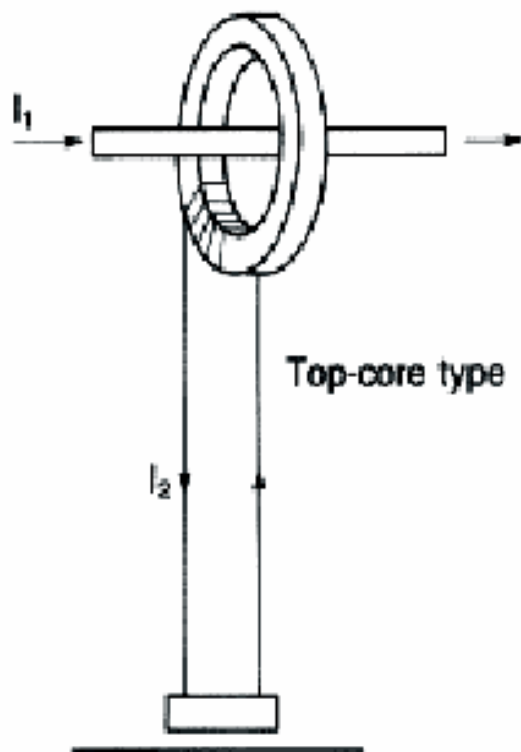
خطای مرکب: تحت شرایط حالت ماندگار مقدار مؤثر (r.m.s) اختلاف مقادیر لحظه ای جریان اولیه، مقادیر لحظه ای جریان ثانویه واقعی ضرب در نسبت تبدیل نامی است. علائم مثبت جریانهای اولیه و ثانویه متناسب با قرارداد علامت گذاری ترمینالهای ترانس است. در واقع خطای مرکب نشان دهنده بالاترین مقدار ممکن برای خطای جریان و یا جابجایی فاز ثانویه است. خطای مرکب معمولاً از فرمول زیر محاسبه می شود:

$$\varepsilon_c = \frac{100}{I_p} \cdot \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T (K_n \cdot i_s - i_p)^2 dt}$$



اصول عملکرد ترانسفورماتورهای جریان

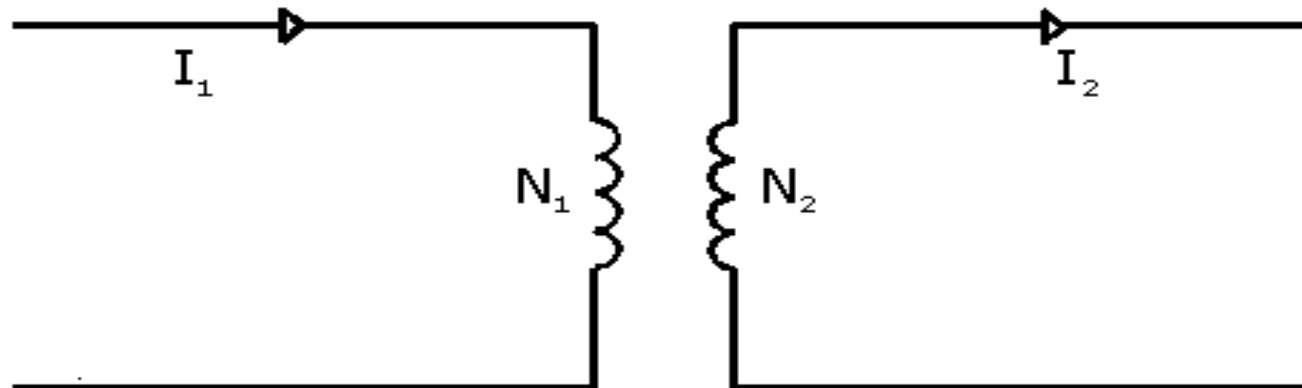
اولیه ترانس جریان با شبکه سری است، یعنی اینکه جریان اولیه مستقل از ثانویه و بار ثانویه است. از اینرو جریان ثانویه نیز مستقل از بار ثانویه است.



ترانس جریان ایده آل

برای یک ترانس اتصال کوتاه شده رابطه زیر برقرار است:

یک ترانسفور ماتور جریان ایده آل ، ترانسفورماتور اتصال کوتاه شده ای است که ولتاژ ترمینال ثانویه آن صفر و جریان مغناطیس شونده آن ناچیز باشد.



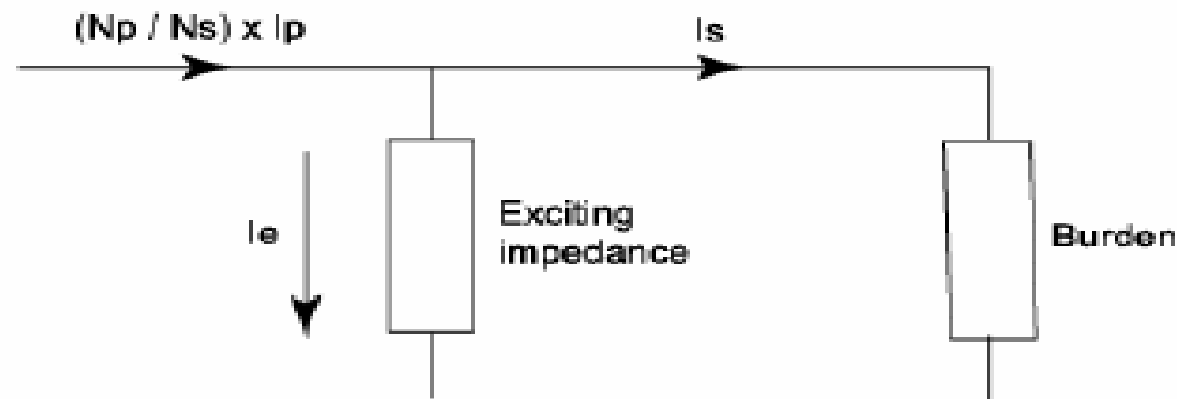
$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{N_2}{N_1}$$

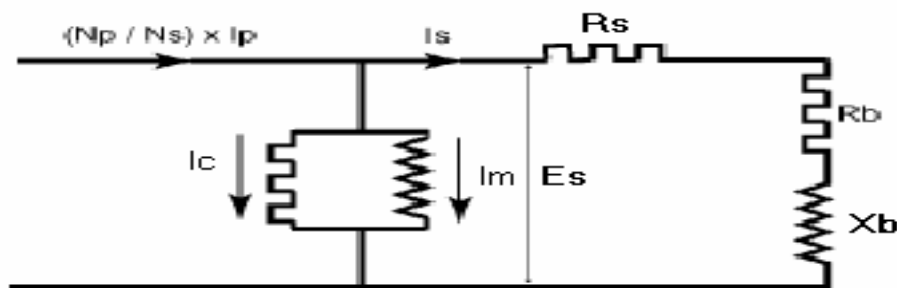
مدار معادل و خطای اندازه گیری ترانس جریان

در صورتیکه جریان تحریک ناچیز باشد ترانسفورماتور جریان اولیه را بدون خطا انتقال میدهد و معادلات زیر حاکم است (ترانس ایده آل).

$$I_s = \frac{N_p}{N_s} * I_p$$

مدار معادل ساده شده ترانس جریان انتقال داده شده به سمت ثانویه با در نظر گرفتن جریان تحریک.





محاسبات خطای ترانس جریان

❖ مدار معادل کامل

❖ دیاگرام برداری جریانه

❖ محاسبه خطا

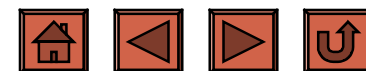
۱- محاسبه ولتاژ القایی E_s

$$E_s = I_s * Z \quad [V]$$

$$Z_s = \sqrt{(R_s + R_b)^2 + X_b^2}$$

۲- محاسبه چگالی شار مورد نیاز برای ایجاد ولتاژ القایی E_s

$$B_m = \frac{E_s i}{4.44 * f * A_j * N_s} * 10^8$$



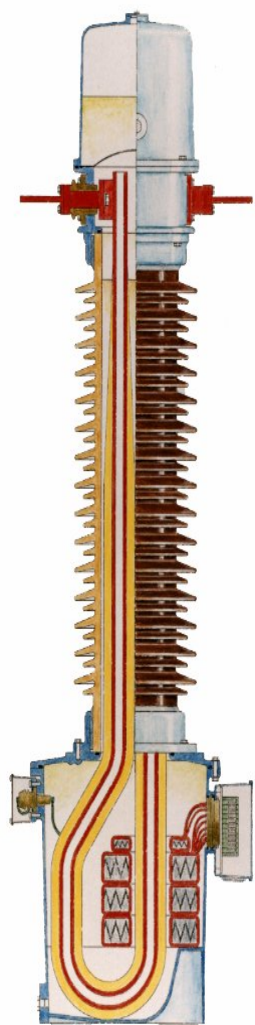
انواع ترانسهای جریان





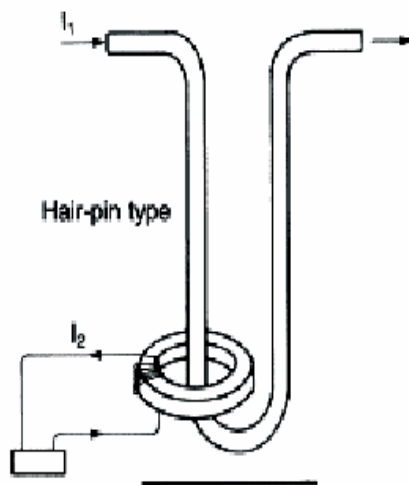
ترانس جریان هسته بالا
و هسته پائین

ترانس جریان هسته پائین



مزایای عمومی ترانسفورماتورهای جریان هسته پائین:

- ✓ مقاومت زیاد در برابر زلزله
- ✓ استفاده از هسته های سنگین بدون تحمیل فشار بر روی مقره
- ✓ پائین بودن مرکز ثقل و در نتیجه پایداری مکانیکی بالا
- ✓ داشتن حرارت یکنواخت به دلیل گردش روغن در لوله هادی اولیه و عدم وجود نقاط گرم



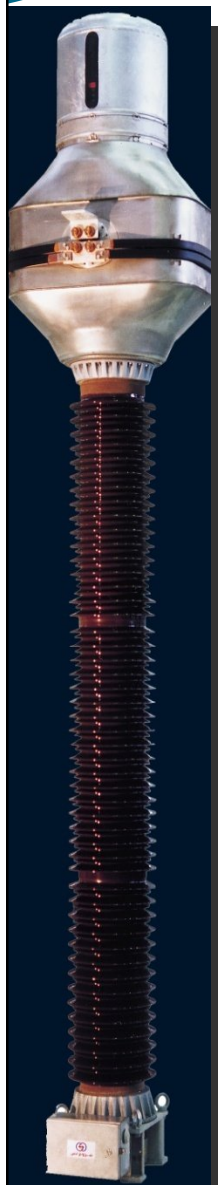
محدودیت‌های ترانسهای جریان هسته پائین:

✓ محدودیت جریان اولیه به علت طول زیاد اولیه که باعث تلفات حرارتی زیاد و محدودیت در قدرت تحمل اتصال کوتاه می شود.

✓ محدودیت جریان دینامیک اولیه

✓ محاسبه میدانهای مغناطیسی هسته در طراحی

ترانسفورماتورهای جریان هسته بالا

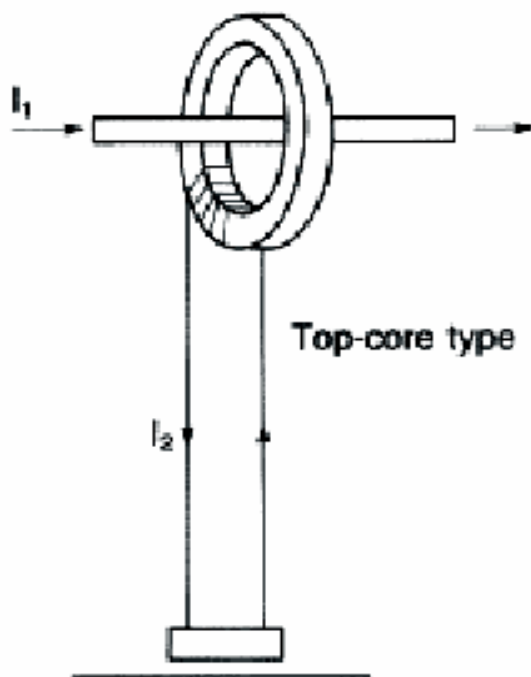


مزایای عمومی ترانسهای جریان هسته بالا :

تلفات حرارتی کم بعثت کوتاه بودن هادی اولیه

✓ قدرت تحمل اتصال کوتاه بالا

✓ اقتصادی بودن در سطح ولتاژهای بالا تر از ۳۳۰ کیلو ولت



محدودیتها :

✓ مرکز ثقل بالا

✓ تحمیل فشار به مقره به خاطر بالا بودن هسته ها

✓ محدود شدن حجم هسته بعثت محدود بودن فضای هسته

ها

✓ دشواری خنک کردن سیم پیچ ثانویه بدلیل محصور شدن

در کاغذ عایقی

✓ پایداری نسبتا کم از نقطه نظر مکانیکی

تفاوت ترانسفورماتورهای جریان هسته بالا و هسته پائین

- از نظر میدانهای الکتریکی
- از نظر نیروهای دینامیکی
- از نظر میدان مغناطیسی
- از نظر پایداری حرارتی
- از نظر نیروهای خارجی و زلزله
- از نظر تعداد سیم پیچ ثانویه

انواع ترانسهای جریان از نظر ساخت و نوع کاربرد

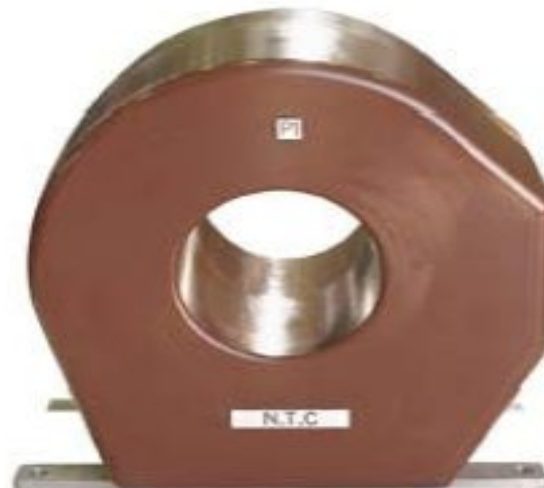
(a) ترانس جریان نوع میله ای یا پوشینگی

(b) ترانس جریان نوع قالبی

(c) ترانس جریان نوع حلقه ای

(d) ترانس جریان نوع شمشی

ترانس جریان نوع پنجره ای (Wound Type)



ترانس جریان پنجره ای

ترانسهای جریان نوع پنجره ای در مواردی کاربرد دارند که مسیر عبور جریان بصورت کابل و یا شینه بوده و امکان قطع آن و ایجاد ترمینال مناسب جهت اتصال به ترانس جریان معمولی وجود نداشته باشد. در این حالت، بسته به اینکه ترانس جریان روی کابل شیلد شده و یا شینه دارای ولتاژ قرار گیرد، می توان از یکی از مدل های MVWT3 و یا MVWT1, MVWT2, WT1, WT2 استفاده نمود.

توجه :

در مدل های MVWT1, MVWT2, MVWT3 محل عبور هادی اولیه در وسط ترانس شامل یک شیلد آلومینیومی است که بایستی به شینه دارای ولتاژ متصل گردد.

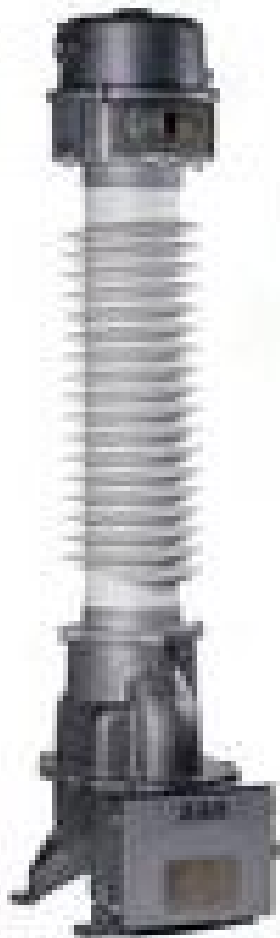


ترانس جریان نوع پوشینگی



Bushing type (medium voltage switchgear)





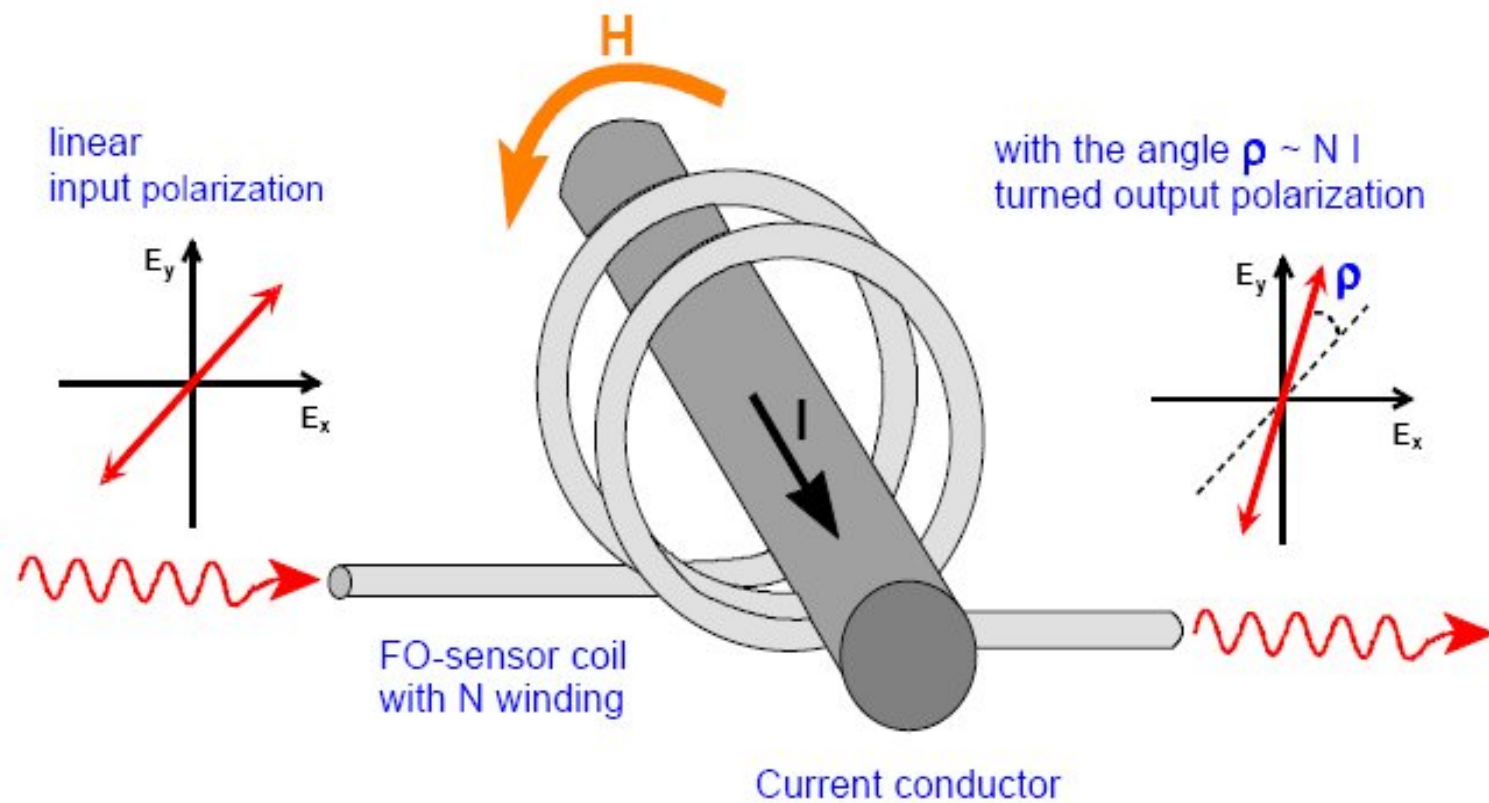
Oil insulated current
transformer (35kV up to 800kV)



Gas (SF6) insulated current
transformer

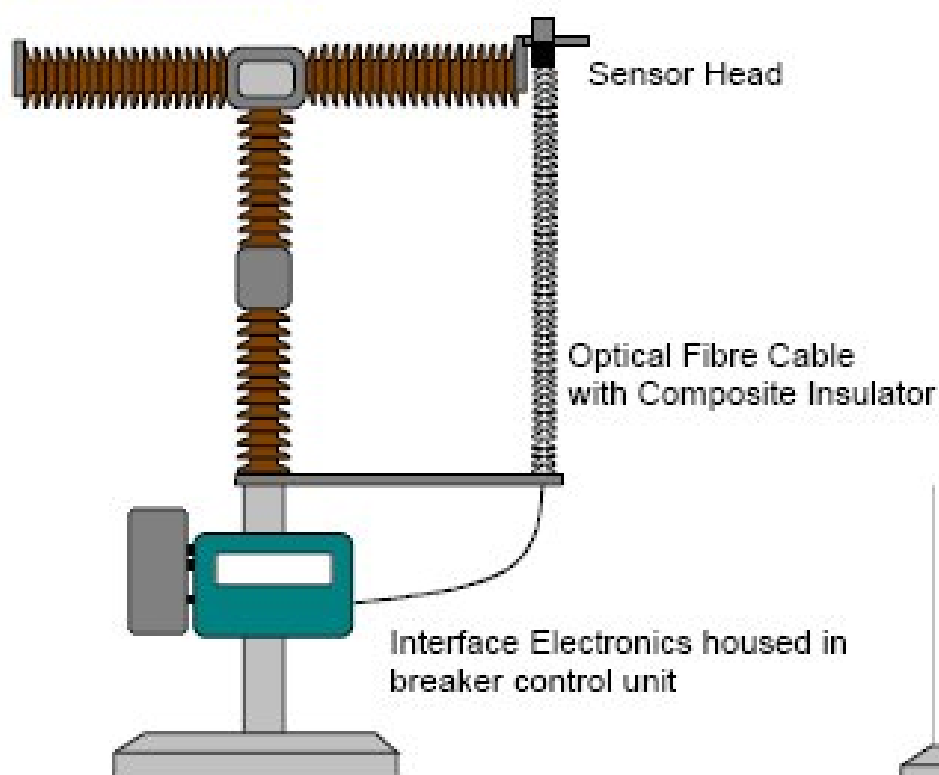
ترانس جریان نوع
گازی و روغنی

ترانس جریان نوری

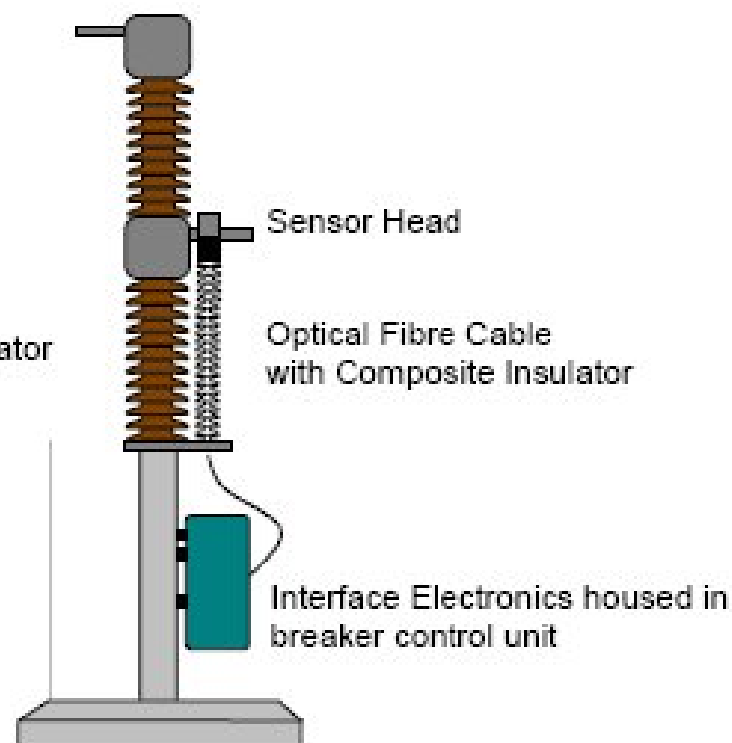


ترانس جریان نوری

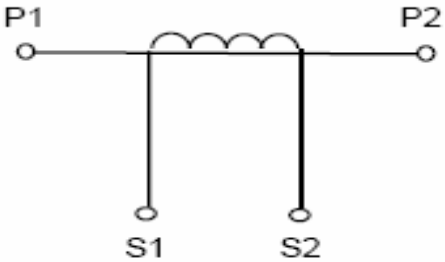
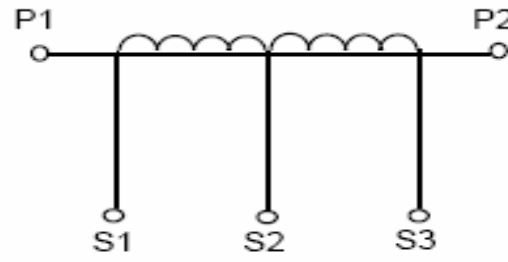
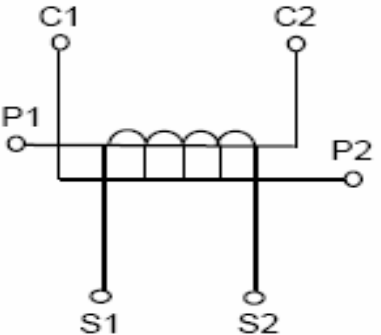
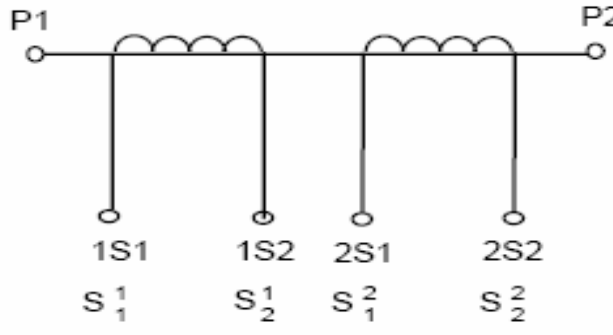
Add-On Scheme:



Integrated Scheme:



علامت گذاری ترمینالهای ترانسهای جریان

Primary terminals		
Secondary terminals	Figure 1 – Single ratio transformer.	Figure 2 – Transformer with an intermediate tapping on secondary winding.
Primary terminals		
Secondary terminals	Figure 3 – Transformer with primary winding in 2 sections intended for connections either in series or in parallel.	Figure 4 – Transformer with 2 secondary windings; each with its own magnetic core. (Two alternative markings for the secondary terminals.)

تعاریف مربوط به ترانسهای جریانی مخصوص اندازه گیری

ترانس جریانی مخصوص اندازه گیری: ترانسفورماتوری است که برای تغذیه کردن وسایل اندازه گیری، مترینگ و سایر دستگاههای مشابه استفاده می شود. کلاسهای دقت مربوط به ترانسهای جریانی مخصوص اندازه گیری عبارتند از : ۵-۳-۱-۰.۵-۰.۲-۰.۱ در کلاسهای دقت ۱-۰.۵-۰.۲-۰.۱، خطای جریان و جابجایی فاز ثانویه در فرکانس نامی در صورتی که Burden ثانویه بین ۲۵ درصد تا ۱۰۰ درصد مقدار نامی باشد، از مقادیر موجود در جدول زیر تجاوز نمی کند.

Accuracy class	± Percentage current (ratio) error at percentage of rated current shown below				± Phase displacement at percentage of rated current shown below							
					Minutes				Centiradians			
	5	20	100	120	5	20	100	120	5	20	100	120
0.1	0,4	0,2	0,1	0,1	15	8	5	5	0,45	0,24	0,15	0,15
0.2	0,75	0,35	0,2	0,2	30	15	10	10	0,9	0,45	0,3	0,3
0.5	1,5	0,75	0,5	0,5	90	45	30	30	2,7	1,35	0,9	0,9
1.0	3,0	1,5	1,0	1,0	180	90	60	60	5,4	2,7	1,8	1,8

تعاریف مربوط به ترانسهای جریانی مخصوص اندازه گیری

در کلاسهای دقت ۳ و ۵ خطای جریان و جابجایی فاز ثانویه در فرکانس نامی در صورتی که Burden ثانویه بین ۵۰ درصد تا ۱۰۰ درصد مقدار نامی باشد، از مقادیر موجود در جدول زیر تجاوز نمی کند.

Class	± Percentage current (ratio) error at percentage of rated current shown below	
	50	120
3	3	3
5	5	5

تعاریف مربوط به ترانسهای جریانی مخصوص اندازه گیری

مقدار نامی حد جریان اولیه^[1] (IPL): مقدار حداقل جریان اولیه است که در آن، خطای مرکب ترانس جریانی مخصوص اندازه گیری بزرگتر یا مساوی ۱۰٪ است و ثانویه به Burden نامی وصل شده است. توجه شود که مقدار خطای مرکب بزرگتر یا مساوی ۱۰٪ به خاطر این است که وسایل تغذیه شونده توسط ترانس جریان در مقابل جریانهای بزرگ ایجاد شده در حین وقوع فالت در سیستم محافظت شوند.

فاکتور امنیت دستگاه (FS): نسبت IPL به جریان نامی اولیه است.

توجه شود که در حین وقوع فالت در سیستم که جریان اتصال کوتاه از سیم پیچ اولیه ترانس جریان عبور می کند، ایمنی وسیله تغذیه شونده با ترانس جریان وقتی بزرگتر است که مقدار FS کوچک است. هسته ترانس جریانی مخصوص اندازه گیری به صورت زیر مشخص می گردد.

15 VA class 0.5 FS 10)

[1] - rated instrument limit primary current
instrument security factor

تعاریف مربوط به ترانسهای جریانی مخصوص حفاظت

ترانس جریانی مخصوص حفاظت: ترانسفورماتور جریانی است که برای تغذیه کردن رله های حفاظتی، استفاده می شود.

مقدار نامی حد دقت جریان اولیه^[۱]: مقداری از جریان اولیه است که با شرایط ملزوم با خطای مرکب موافق باشد.

ضریب محدودکننده دقت^[۲]: نسبت مقدار نامی حد دقت جریان اولیه به جریان اولیه ترانس جریان. مقادیر استاندارد ALF برابر با ۲۰، ۳۰، ۱۵، ۱۰ و ۵ هستند. برای ترانس جریانی مخصوص حفاظت، کلاس دقت مورد نظر، متناسب با حد جریان اولیه است و همراه با حرف P معین می گردد. کلاسهای دقت مربوط به این ترانسها به صورت 5P و یا 10P می باشند. در فرکانس نامی و وقتی که Burden نامی به دو سر ترانس جریان وصل شده باشد، خطای جریان، جابجایی فاز ثانویه و خطای مرکب نباید از مقادیر موجود در جدول ۳ تجاوز کند.

[1] - rated accuracy limit primary current

Farokh[2] - accuracy limit factor

تعاریف مربوط به ترانسهای جریانی مخصوص حفاظت

• مقادیر مجاز خطای جریان و جابجایی فاز ثانویه و خطای مرکب در فرکانس و Burden نامی

Accuracy class	Current error at rated primary current %	Phase displacement at rated primary current		Composite error at rated accuracy limit primary current %
		minutes	centiradians	
5P	± 1	± 60	$\pm 1,8$	5
10P	± 3	–	–	10

هسته ترانس جریانی مخصوص اندازه گیری به صورت زیر مشخص می گردد.

30 VA class 5P 10

تعاریف مربوط به ترانسهای جریانی مخصوص حفاظت

مقدار E.M.F محدود کننده ثانویه: حاصل ضرب ALF، جریان نامی ثانویه ترانس جریان و جمع برداری Burden نامی و امپدانس سیم پیچ ثانویه است.

$$\text{Secondary limiting e.m.f} = \text{ALF} \cdot I_{ns} \cdot (R_{bn} + R_s)$$

شار اشباع: مقدار پیک شاری است که در هسته ترانس در حالت گذر از حالت غیر اشباع به حالت اشباع کامل وجود دارد و مربوط به نقطه ای از منحنی B-H هسته است که در آن افزایش ۱۰٪ در B باعث افزایش ۵۰٪ در H می شود.

شار پسماند: مقداری از شار است که ۳ دقیقه بعد از برداشته شدن جریان تحریک با مقدار کافی برای القای شار اشباع، در هسته ترانس جریان باقی می ماند.

ضریب پسماند: نسبت شار پسماند به شار اشباع است و بر حسب درصد می باشد.

$$K_r = \frac{\psi_r}{\psi_s} \cdot 100$$

- Saturation flux
- Remanent flux
- Remanence factor

تعاریف مربوط به ترانسهای جریانی مخصوص حفاظت

ثابت زمانی نامی حلقه ثانویه: مقدار ثابت زمانی حلقه ثانویه است و با توجه به مقادیر مجموع اندوکتانس مغناطیسی کنندگی و اندوکتانس نشتی (L_s)، و مقاومت حلقه ثانویه (R_s) بدست می آید.

$$T_s = \frac{L_s}{R_s}$$

منحنی مشخصه تحریک: منحنی رابطه بین مقدار مؤثر جریان تحریک و مقدار مؤثر ولتاژ داده شده به ثانویه ترانس جریان با مدار باز بودن سمت اولیه و سایر سیم پیچها. محدوده جریان تحریک از مقدار تحریک کم تا تحریک متناظر با ولتاژ نقطه زانو را شامل می شود.

نیروی محرکه الکترومغناطیسی نامی نقطه زانویی (E_k): حداقل مقدار مؤثر نیروی محرکه الکترومغناطیسی در فرکانس نامی توان شبکه، داده شده به ثانویه ترانس جریان با مدار باز بودن سمت اولیه و سایر سیم پیچها است که در آن نقطه با افزایش ۱۰ درصدی این مقدار نیروی محرکه، حدود ۵۰ درصد افزایش در جریان تحریک ایجاد شود.

- Rated secondary loop time constant
- Excitation characteristic
- Rated knee point e.m.f.

تعاریف مربوط به ترانسهای جریانی مخصوص حفاظت در حالت گذرا

جریان اتصال کوتاه نامی سمت اولیه : مقدار مؤثر جریان اتصال کوتاه متقارن سمت اولیه که در آن، دقت ترانس جریان حفظ می شود.

جریان خطای لحظه ای : تفاضل بین مقدار لحظه ای جریان ثانویه ضربدر نسبت تبدیل نامی ترانس جریان و مقدار لحظه ای جریان اولیه $i_{\varepsilon} = K_n \cdot i_s - i_p$ که این جریان، شامل مؤلفه ac و dc می باشد. فرمول زیر به صورت تفکیک شده عبارت است از:

$$i_{\varepsilon} = i_{\varepsilon ac} + i_{\varepsilon dc} = (K_n \cdot i_{sac} - i_{pac}) + (K_n \cdot i_{sdc} - i_{pdc})$$

خطای لحظه ای پیک : حداکثر جریان خطای لحظه ای برای یک سیکل مشخص است و به صورت درصدی از پیک جریان اتصال کوتاه لحظه ای نامی سمت اولیه بیان می شود.

$$\hat{\varepsilon} = 100 \cdot \frac{i_{\varepsilon}}{\sqrt{2} \cdot I_{psc}}$$

جریان خطا، شامل مؤلفه ac و dc می باشد.

Rated primary short circuit current—

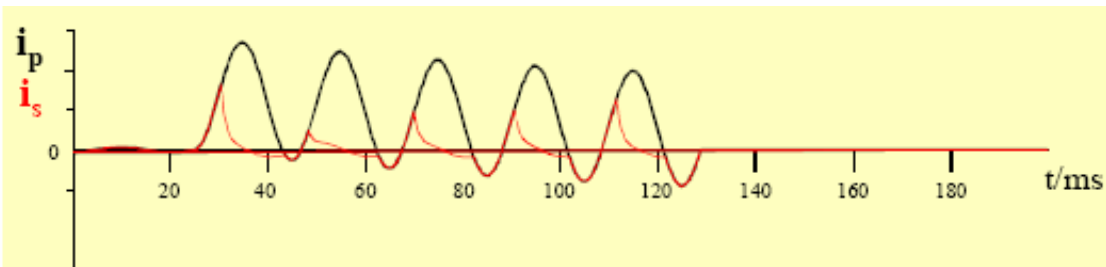
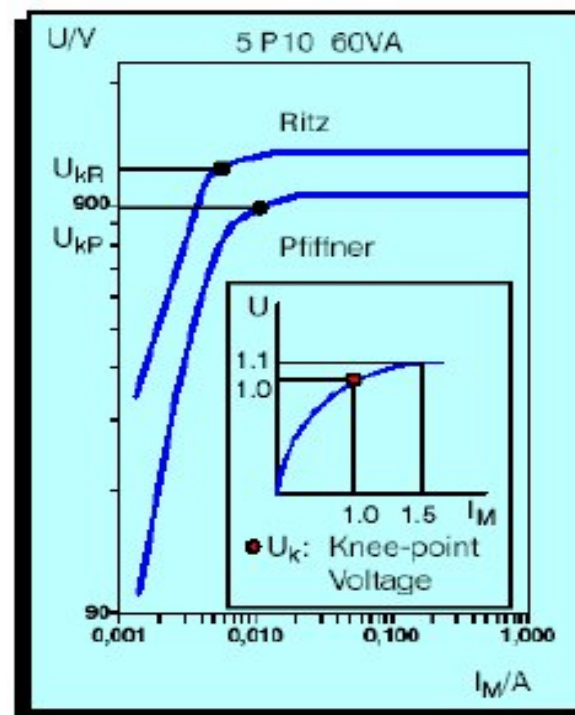
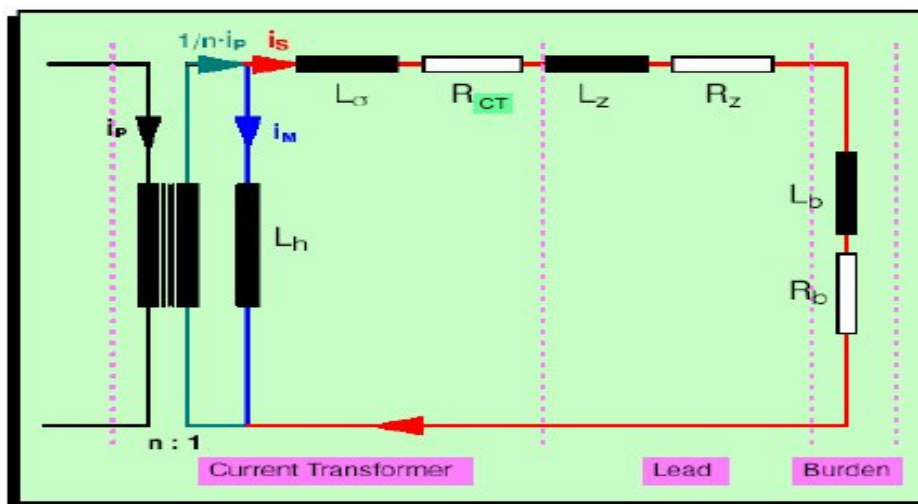
- Instantaneous error current

- Peak instantaneous error

CT Saturation Concepts

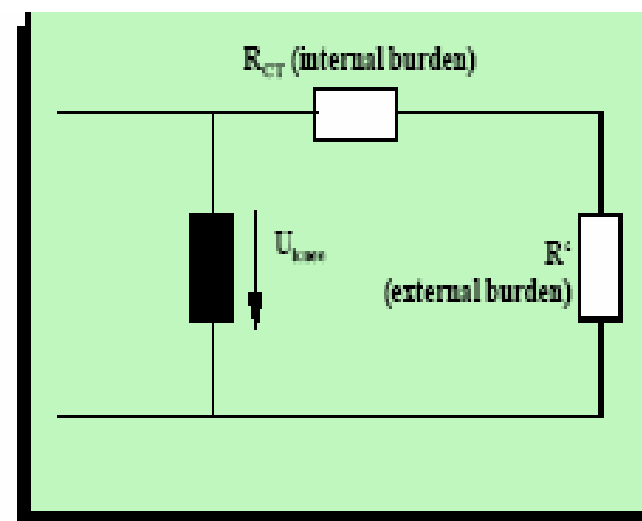
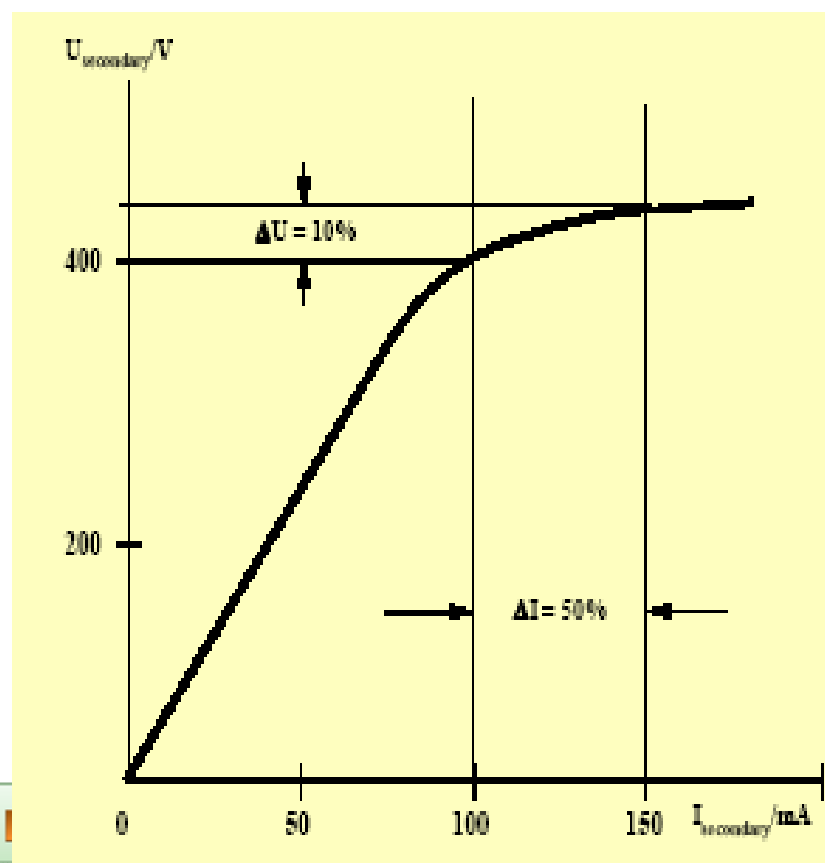
- CT saturation depends on a number of factors
 - Physical CT characteristics (size, rating, winding resistance, saturation voltage)
 - Connected CT secondary burden (wires + relays)
 - Primary current magnitude, DC offset (system X/R)
 - Residual flux in CT core
- Actual CT secondary currents may not behave in the same manner as the ratio (scaled primary) current during faults
- End result is spurious differential current appearing in the summation of the secondary currents which may cause differential elements to operate if additional security is not applied

مدار معادل ترانسهای جریان و اثر اشباع



تعریف نقطه زانویی در منحنی اشباع ترانس جریان

تعریف نقطه زانویی در دو کلاس فوق اینست که در این نقطه ۱۰ درصد افزایش در مقدار مؤثر ولتاژ ثانویه باعث افزایش ۵۰ درصدی مقدار مؤثر جریان مغناطیس کنندگی می شود. در کلاس PX و X همه جریانها بصورت RMS محاسبه می شوند و لذا همه هارمونیک ها دیده خواهند شد.



Knee-point voltage is the voltage at which a 10% increase in rms voltage results in a 50% increase in rms magnetizing current

خطای ترانسهای جریان

خطای دامنه جریان:

$$F_i = 100 \cdot \frac{I_{Sec} \cdot n_n - I_{Prim}}{I_{Prim}}$$

خطای زاویه جریان:

$$\Delta\varphi_i = \text{angle}(I_{Sec}) - \text{angle}(I_{Prim})$$

خطای مرکب:

$$F_i = 100 \frac{\sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T (n_n \cdot i_{Sec}(t) - i_{Prim}(t))^2 dt}}{I_{Prim.rms}}$$

در روابط فوق منظور از N_n نسبت تبدیل CT می باشد

چگونگی سفارش یک ترانس جریان و پارامترهای مهم

سطح عایقی



انتخاب سطح ولتاژ



ارتفاع از سطح دریا



سطح آلودگی (فاصله خزشی)



جریان نامی اولیه



ضریب افزایش جریان (جریان دائم حرارتی)



جریان نامی ثانویه



جریان اتصال کوتاه



جریان دینامیکی



سطح عایقی نامی (BIL) بر اساس استاندارد IEC

ترانسفورماتور جریان میبایستی بتواند ولتاژ عملکرد و اضافه ولتاژ شبکه را تحمل کند. ولتاژ تست بر اساس ولتاژ نامی در استاندارد مشخص شده است.

System voltage kV	Power frequency withstand voltage		Lightning impulse withstand voltage kV	Switching impulse withstand voltage kV	RIV test voltage kV	Max. RIV level μ V	PD test voltage kV	Max. PD level pC
	Dry kV	Wet kV						
36	70	70	170	--	--	--	43	10
72,5	140	140	325	--	--	--	86	10
123	230	230	550	--	78	2500	148	10
145	275	275	650	--	92	2500	174	10
170	325	325	750	--	108	2500	204	10
245	460	460	1050	--	156	2500	276	10
300	460	--	1050	850	191	2500	360	10
362	510	--	1175	950	230	2500	434	10
420	630	--	1425	1050	267	2500	504	10
525	680	--	1550	1175	334	2500	630	10

Test voltages above apply at < 1000 m above sea level.

انتخاب ولتاژ نامی ترانس

- ولتاژ نامی و ماکزیمم ولتاژ بر اساس سطح ولتاژ نامی و ماکزیمم سیستم مطابق با استاندارد IEC انتخاب می شود. در برخی کاربردها نظیر ترانس نوترال و ترانسهای نوع پنجره ای و ترانس جریان بوشینگ ولتاژ ترانس با ولتاژ سیستم برابر نیستند.
- سطح ولتاژ ترانس جریان نوترال ترانسفورماتورهای قدرت بسته به نوع سیستم زمین و مقاومت سیستم زمین و حداکثر جریان اتصال کوتاه سیستم انتخاب می گردند. مطابق استاندارد VDE 0111 حداکثر مقدار این ولتاژ برای سیستمهایی که به صورت مؤثر زمین شده اند برابر $0.4 U_m$ در نظر گرفته می شود. مطابق همین استاندارد حداکثر مقدار این ولتاژ برای سیستمهایی که به صورت مؤثر زمین نشده اند برابر ولتاژ فاز سیستم انتخاب می شود. این مقدار تقریباً یک سطح ولتاژ پایین تر از ولتاژ سیستم است.
- سطح ولتاژ ترانس جریان بوشینگ و ترانسهای جریان پنجره ای که اولیه آنها بطور مستقل عایق پیچی شده اند 0.72 kV در نظر گرفته می شوند.

تأثیر ارتفاع نصب ترانس اندازه گیری بر روی طراحی ترانس

- ❖ با افزایش ارتفاع قدرت تحمل عایقی هوا کاهش میابد. در نتیجه میبایستی عایق خارجی ترانسفورماتور با ارتفاع واقعی سایت تطبیق داده شود.
- ❖ با افزایش ارتفاع قدرت عایق داخلی تغییر نمی یابد و BIL نیز تغییر نمیکند.
- ❖ با افزایش ارتفاع فاصله جرقه با نسبت K به ارتفاع ۱۰۰۰ متر افزایش می یابد.
- ❖ با توجه به اینکه در این حالت عایق داخلی تحت تنش قرار گرفته و پیر میشود. توصیه میشود که برای این منظور به تایپ تستها بسنده شود.

$$K = e^{\frac{m(H-1000)}{8150}}$$

H = altitude above sea level in meters

m = 1 for power frequency and lightning impulse voltage

m = 0,75 for switching impulse voltage

تأثیر ارتفاع نصب ترانس اندازه گیری بر روی محدودیت تلفات داخلی آن

**با افزایش ارتفاع محل نصب ، بعلت رقیق شدن هوا ، قابلیت دفع
حرارت بوسیله هوا کاهش یافته ترانس گرم و عایق آن پیر می شود . از
این رو مقدار مجاز افزایش درجه حرارت داخلی ترانس کاهش
می یابد.**



سطح آلودگی و فاصله خزشی

برای ترانسفورماتورهای جریانی که در فضای باز مورد استفاده قرار میگیرد بر اساس سطح آلودگی فاصله خزشی تعریف میشود.

محدویت فواصل خزشی به فاصله جرقه در استاندارد
مشخص شده است. IEC 60044-1

Pollution Level	Minimum Creepage distance mm/kV	Creepage Distance/ Flashover Distance
1 Light	16	≤ 3.5
2 Medium	20	
3 Heavy	25	≤ 4.0
4 Very heavy	31	

انتخاب جریان نامی اولیه ترانس جریان با نسبت تبدیلهای متفاوت

جریان نامی ترانس بر اساس جریان نامی یا حداکثر جریان مؤثری که از ترانس عبور می کند و با ملاحظات رشد جریان سیستم در مدت عمر ترانس انتخاب می شود. (عموماً ۱۰ تا ۴۰ درصد بالاتر از جریان کار تخمینی انتخاب میشود .)

جریان نامی اولیه معمولاً با بزرگترین نسبت تبدیل هسته اندازه گیری برابر می باشد.

ضریب افزایش جریان (جریان دائم حرارتی)

❖ جریان نامی حرارتی، جریانی است که از ترانس بصورت دائم عبور میکند بدون آنکه افزایش درجه حرارت از حد استاندارد بیشتر شود.

❖ یک ترانس جریان بایستی بتواند یک جریان دائم با در نظر گرفتن ضریب افزایش جریان نامی تحمل نماید.

❖ در IEC 60044-1 ضرایب افزایش ۱۲۰٪ و ۱۵۰٪ و ۲۰۰٪ تعریف شده اند.

انتخاب جریان نامی ثانویه ترانس

➤ مطابق استاندارد IEC جریان نامی ثانویه می تواند یکی از مقادیر ۱، ۲ و یا ۵ آمپر انتخاب شود. با انتخاب جریان بالاتر (۵ آمپر) افت توان بر روی سیم های رابط ترانس و دستگاه اندازه گیری و یا حفاظتی زیادتر می شود (در شرایطی که سیم های رابط یکسان باشد ۲۵ برابر جریان ۱ آمپر) بنابراین بردن هسته افزایش می یابد. بنابراین باید سطح مقطع سیم رابط را افزایش داد و یا ولت آمپر ترانس را.

$$E = 4.44 f N B A$$

➤ افزایش ولت آمپر ترانس در برخی موارد باعث گران تر شدن آن و برخی موارد نیز طراحی ترانس را دشوار می سازد.

➤ در برخی شرایط در جریانهای بالاتر استفاده از ثانویه ۵ آمپر علیرغم افزایش بردن بدلیل کاهش تعداد دور، طراحی را ساده تر می کند، بر عکس در جریانهای پایین تر استفاده از ثانویه ۱ آمپر مناسب تر است.

جریان اتصال کوتاه (I_{th})

حداکثر جریان تحمل اتصال کوتاه یک ثانیه ترانس بدون آنکه دمای آن به مقداری برسد که باعث خرابی عایق شود. برای مثال 250°C برای ترانس غوطه ور در روغن.

$$I_{th} = \frac{S_k}{U_n \times \sqrt{3}} \quad [\text{KA}]$$

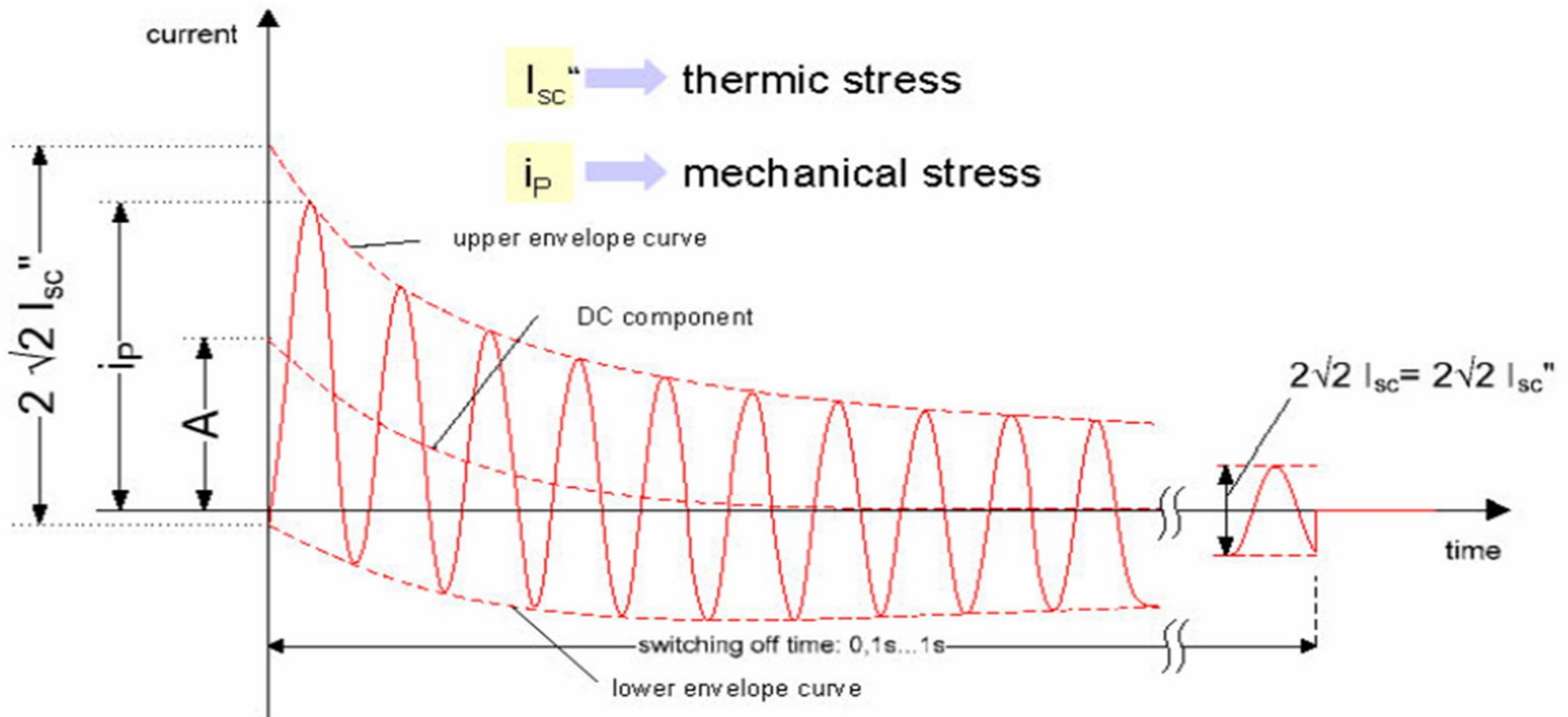
S_k = the fault level in MVA at the point where the current transformer is to be installed.

If S_k is not known, the breaking capacity of the associated breaker can be used.

U_n = rated service voltage (line-to-line) in kV

جریان دینامیکی (I_{dyn})

در شرایط اتصال کوتاه پیک اول جریان تقریباً تا $2/5$ برابر جریان I_{th} افزایش می یابد. این پیک جریان نیروی الکترو مکانیکی زیادی بر هادیهای اولیه وارد میکند که ترانس بایستی بتواند تحمل کند.



❖ نکات مهم در بهره برداری از ترانسهای جریان

❖ انجام صحیح پلاریته اتصالات

❖ وضعیت اتصال تپ های ثانویه ترانس و اتصالات آنها

❖ جلوگیری از مدار باز شدن ترانس جریان در حال بهره برداری

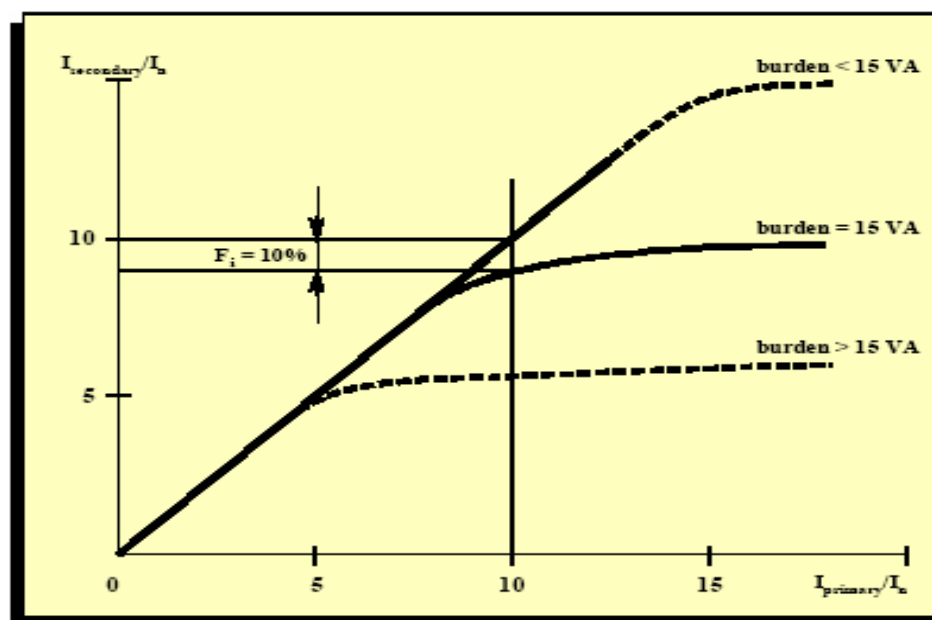
❖ اشکال شل بودن اتصال اولیه

❖ ضرورت زمین شدن سیم پیچ ثانویه ترانسهای جریان و محل زمین شدن

❖ ضرورت رعایت فاصله عایقی بین بدنه ترانس جریان با قسمتهای دیگر

❖ اشکال شل بودن اتصالات ثانویه

کلاس حفاظتی P در بردنهای متفاوت



اطلاعات یک ترانس جریانی حفاظتی بر اساس استاندارد IEC به صورت زیر داده می شود.
 $400/1 ; 5 P 10 ; 30 VA ; R_{CT} = 6.2 \Omega$

مقدار ALF در شرایطی که Burden نامی به ترانس جریان متصل شده باشد داده می شود. اگر Burden متصل شده از مقدار نامی کمتر باشد مقدار افزایش یافته این ضریب از فرمول زیر محاسبه می شود.

$$ALF' = ALF \cdot \frac{P_i + P_{Bn}}{P_i + P_B} = ALF \cdot \frac{R_{CT} + R_{Bn}}{R_{CT} + R_B}$$

کلاس حفاظتی X

برای کلاس X اغلب روی صفحه مشخصات CT موارد زیر مشخص است.

- ☐ Rated primary current
- ☐ Turns ratio (the error shall not exceed $\pm 0.25\%$)
- ☐ Rated knee-point voltage
- ☐ Magnetizing current at rated knee-point voltage
- ☐ Resistance of secondary winding corrected to 75°C

تبدیل کلاس P به کلاس X

$$U = ALF_n (R_n + R_{CT}) I_{Sec.n}$$

$$U_{Knee} (Class PX) = \frac{U_{Knee} (Class P)}{1.3}$$

$$U_{knee} = \frac{(R_n + R_{CT}) I_{2n} \cdot ALF_n}{1.3}$$

$$= \frac{(P_n + P_{CT}) \cdot ALF_n}{1.3 \cdot I_{2n}}$$

IEC Class 5P: 600/1A, 5P10, 15 VA, $R_{CT} = 4\Omega$

to

IEC Class PX: 600/1A:

$$U_{knee} = \frac{(15VA + 4VA) \cdot 10}{1.3 \cdot 1A} = 146V$$

$$U_{Knee} (Class P) = 1.3 U_{Knee} (Class PX) = 600V$$

$$I_{2N} = 1A$$

Rated secondary current

$$U_{knee} = 600V$$

Knee-Point Voltage

$$R_{CT} = 5\Omega$$

Internal burden

$$R_i = 1\Omega$$

Wire and relay burden

Maximum transmittable AC current
without DC components (secondary):

$$I_{max} = \frac{U_{knee}}{R_{CT} + R} = \frac{600V}{5\Omega + 1\Omega} = 100A$$

CT with 20VA:

$$ALF_n = ALF' \frac{P' + P_{CT}}{P_n + P_{CT}} = 100 \frac{1VA + 5VA}{20VA + 5VA} = 24$$

$$ALF' = \frac{I_{max}}{I_n} = \frac{100A}{1A} = 100$$

CT with 10VA:

$$ALF_n = ALF' \frac{P' + P_{CT}}{P_n + P_{CT}} = 100 \frac{1VA + 5VA}{10VA + 5VA} = 40$$

کلاس دقت بر اساس استاندارد ANSI آمریکا

C100 ⇔ 10P20, 5 VA
 C200 ⇔ 10P20, 10 VA
 C400 ⇔ 10P20, 20 VA
 C800 ⇔ 10P20, 40 VA

C100 ⇔ 10P20, 25 VA
 C200 ⇔ 10P20, 50 VA
 C400 ⇔ 10P20, 100 VA
 C800 ⇔ 10P20, 200 VA

Example C200, 1A

Nominal ANSI-Standard burden

$$R' = \frac{U_{\text{term}}}{20 \cdot I_n} = \frac{200V}{20 \cdot 1A} = 10\Omega$$

Class P Nominal Burden

$$P_n = I_n^2 \cdot R' = (1A)^2 \cdot 10\Omega = 10VA$$



پس ترانس جریانی تبدیل شده به
 صورت زیر می باشد.

C200 ⇔ 10P20, 10 VA

کلاس دقت بر اساس استاندارد ANSI آمریکا

Example C200
typical 5A

برای CT با ثانویه ۵ آمپر داریم.

Nominal ANSI-Standard burden

$$R' = \frac{U_{\text{term}}}{20 \cdot I_n} = \frac{200V}{20 \cdot 5A} = 2\Omega$$

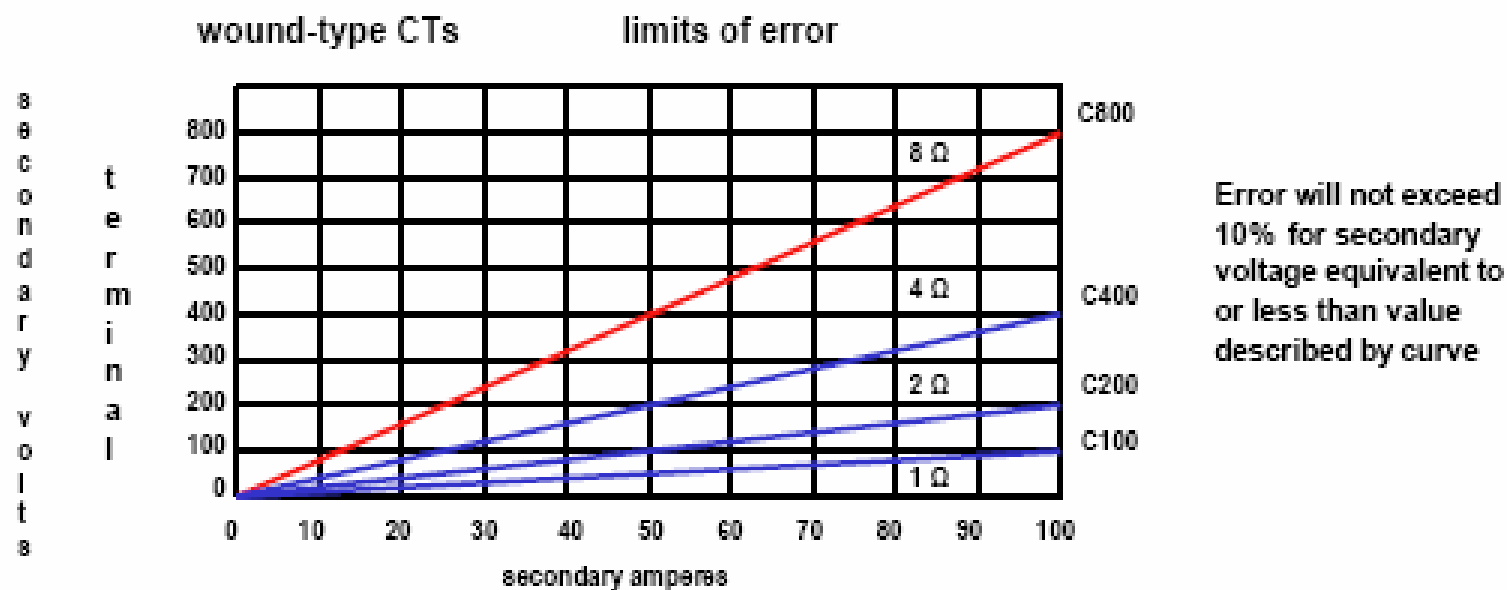
Class P Nominal Burden

$$P_n = I_n^2 \cdot R' = (5A)^2 \cdot 2\Omega = 50VA$$

پس ترانس جریانی تبدیل شده به صورت زیر می باشد.

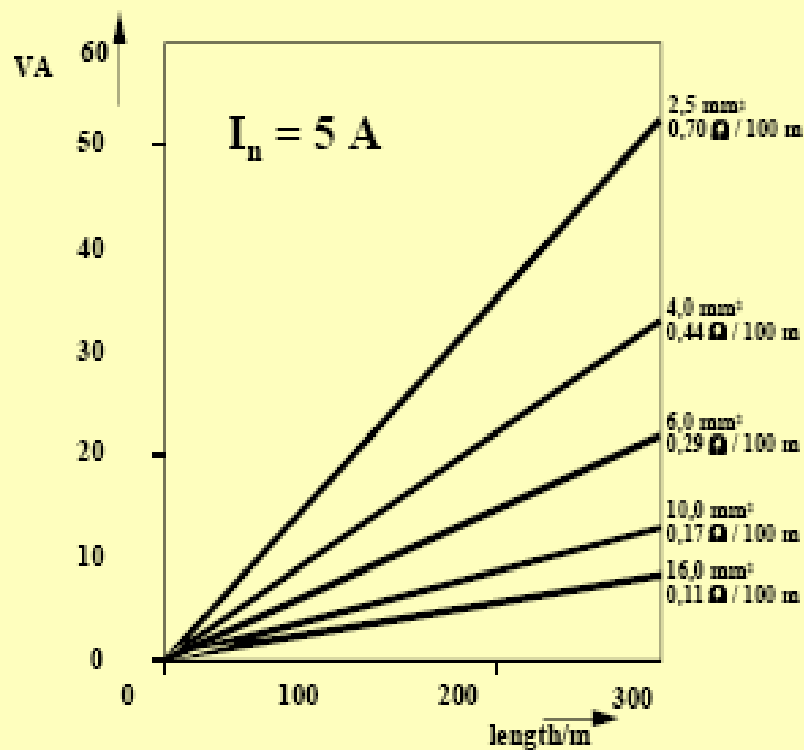
C200 ⇔ 10P20, 50 VA

کلاس دقت بر اساس استاندارد ANSI آمریکا

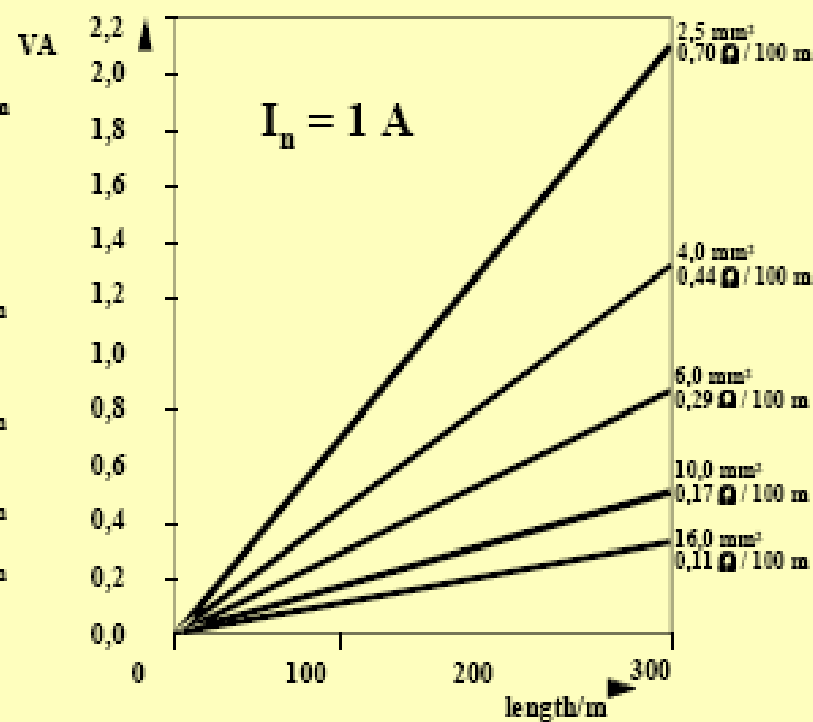


Class C: Ratio error will not exceed 10% between 1 to 20 times nominal secondary current.

مقایسه ترانسهای جریانی یک و پنج آمپر



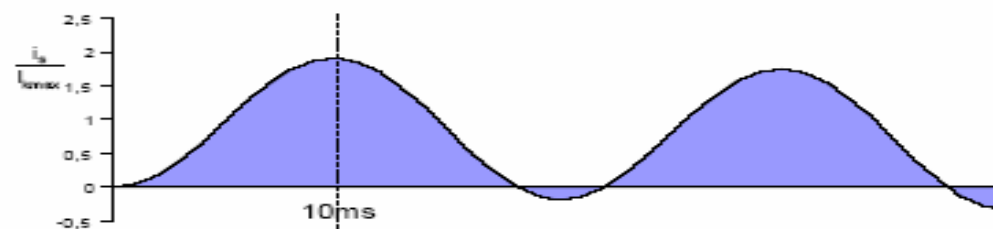
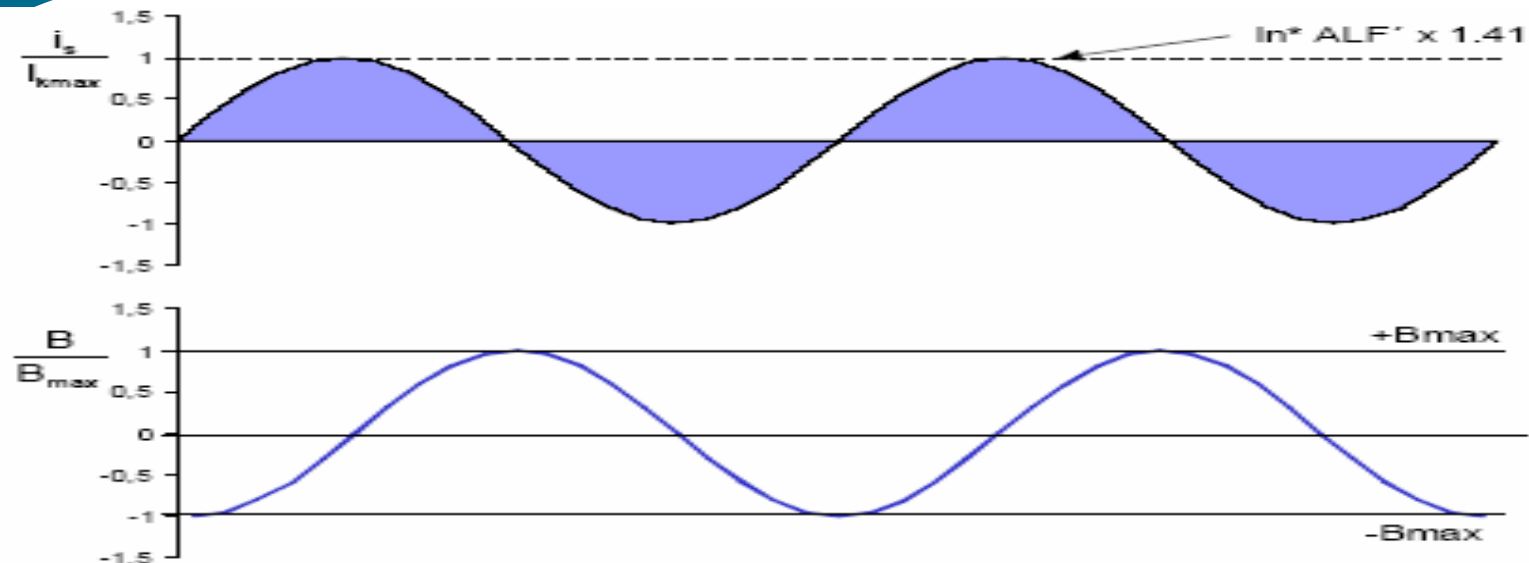
$(I_n)^2 = 25 \text{ A}^2 \Rightarrow \text{high burden}$



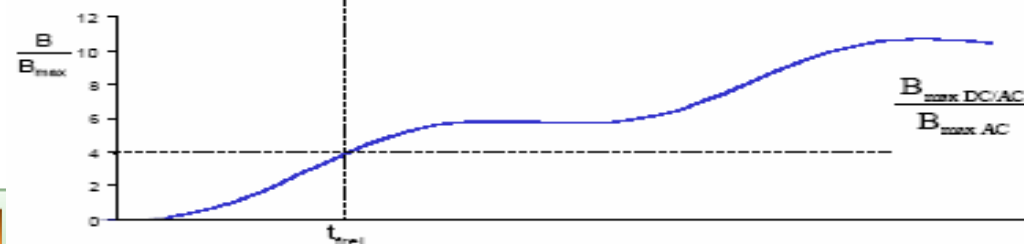
$(I_n)^2 = 1,0 \text{ A}^2 \Rightarrow \text{low burden}$

better

نسبت شار هسته در حالت اتصال کوتاه متقارن و نامتقارن

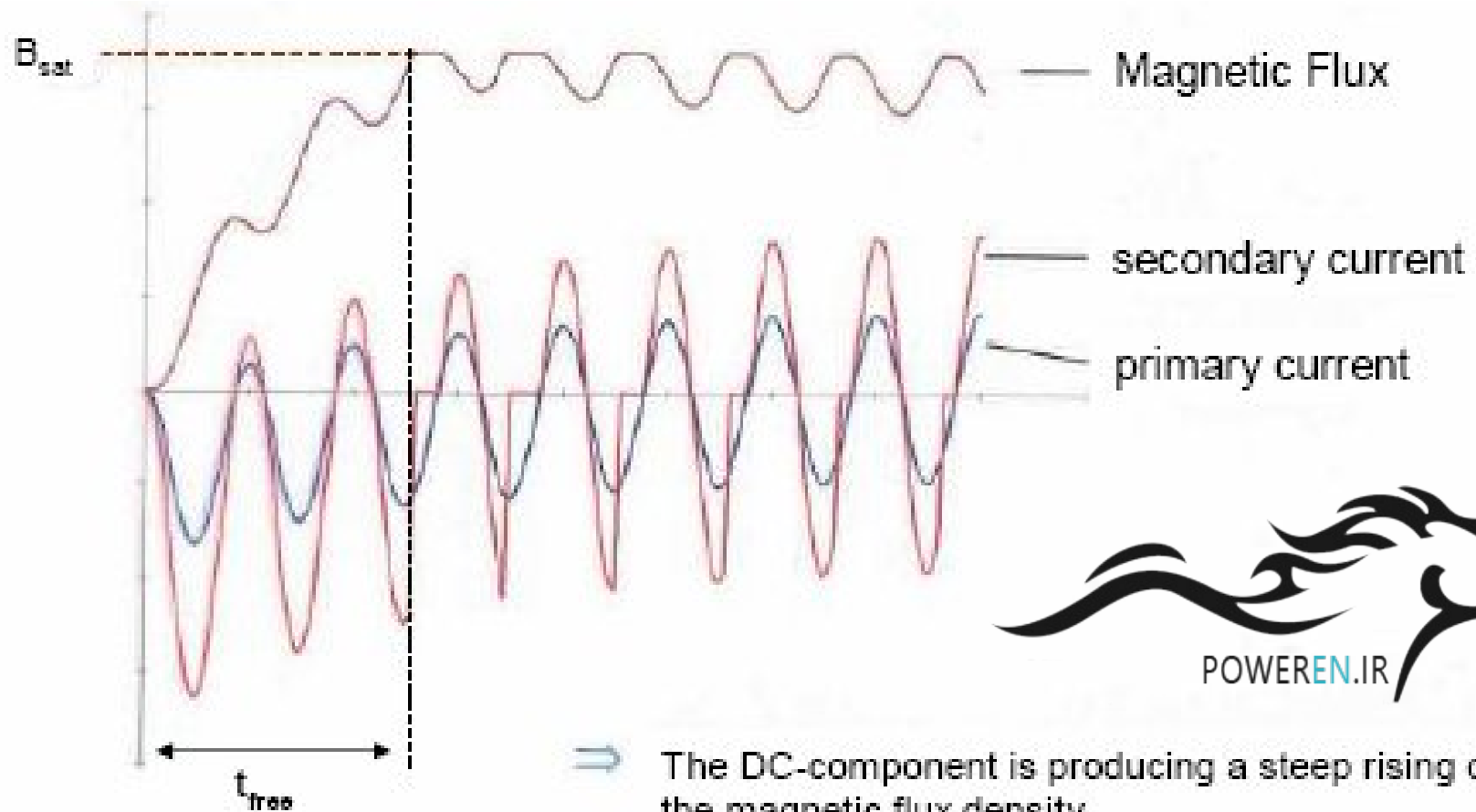


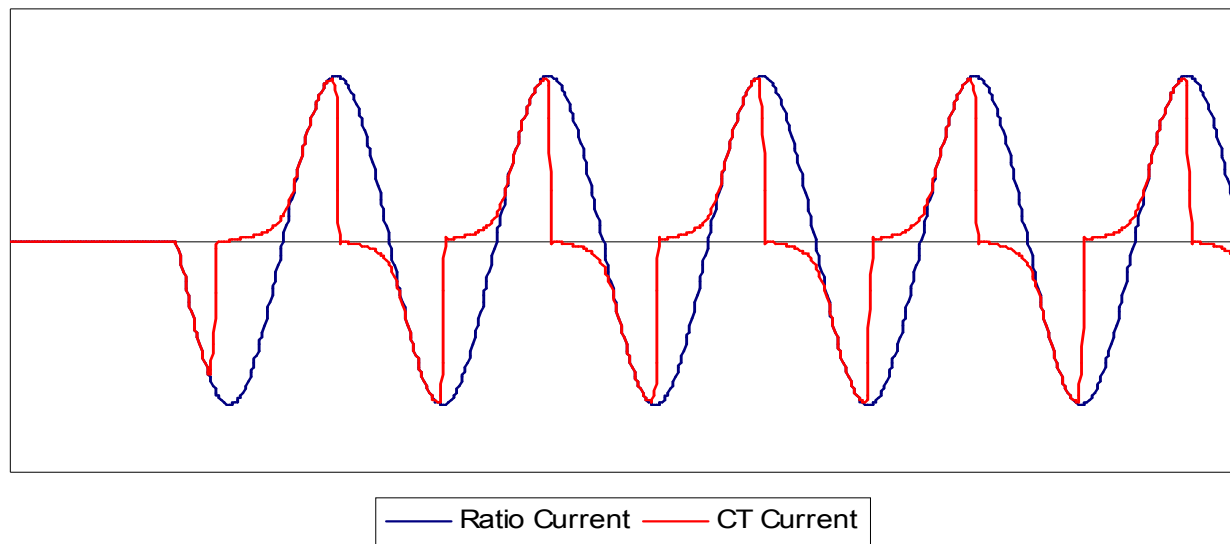
The DC-component of an asymmetrical short circuit is causing an additional magnetic flux.



$$\frac{B_{max DC/AC}}{B_{max AC}} = \text{Transient dimensioning factor} \\ = K_{td} \approx 1 + \omega T_N \text{ for } t_{free} = \infty \\ T_N: \text{System time constant}$$

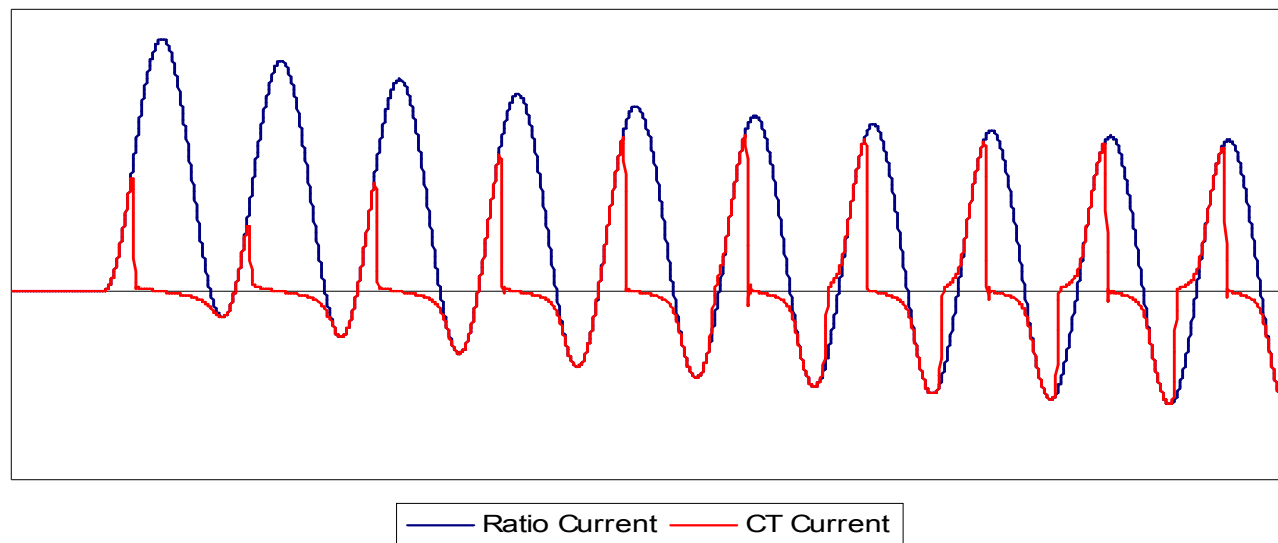
نسبت شار هسته در حالت اتصال کوتاه متقارن و نامتقارن





No DC Offset

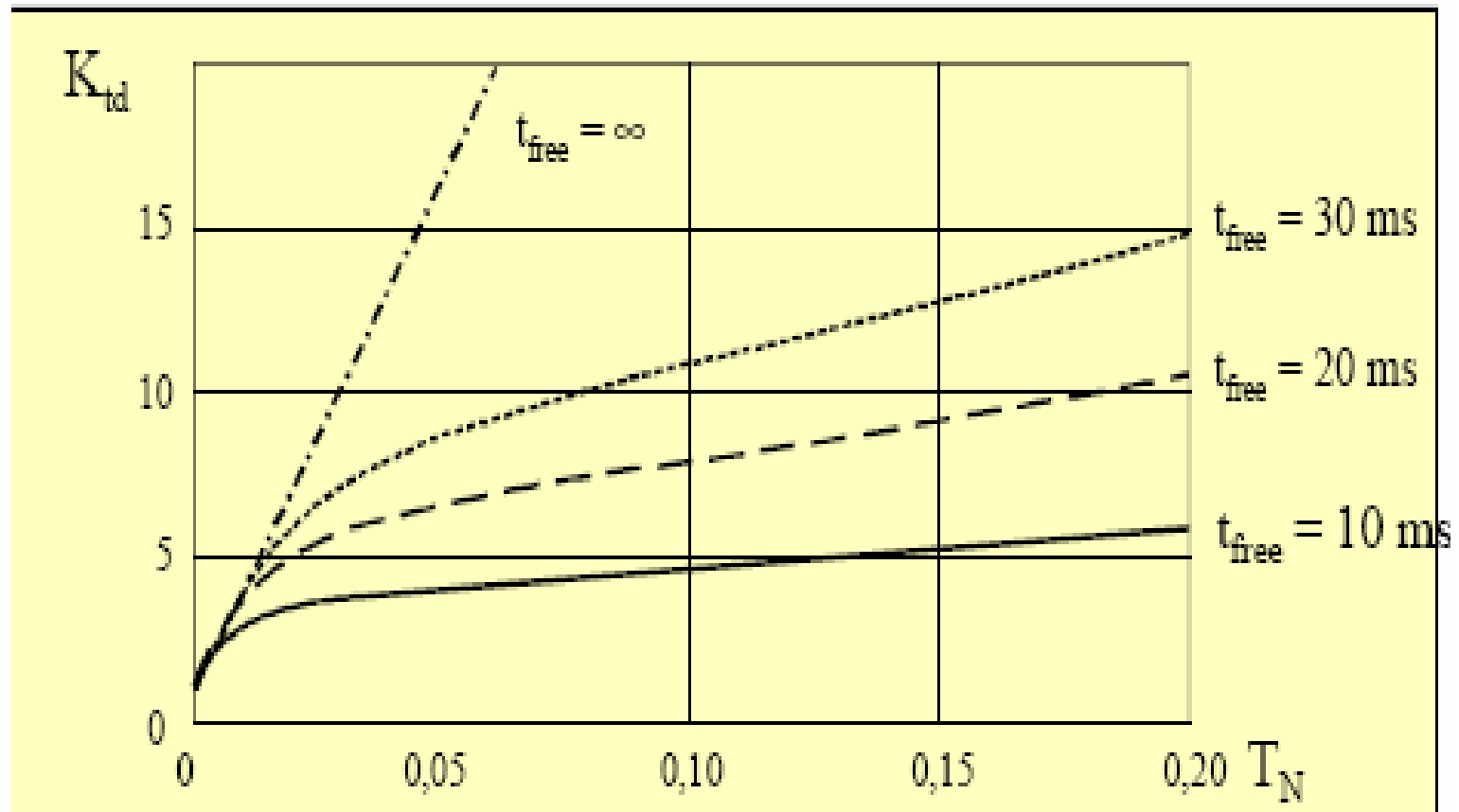
- Waveform remains fairly symmetrical



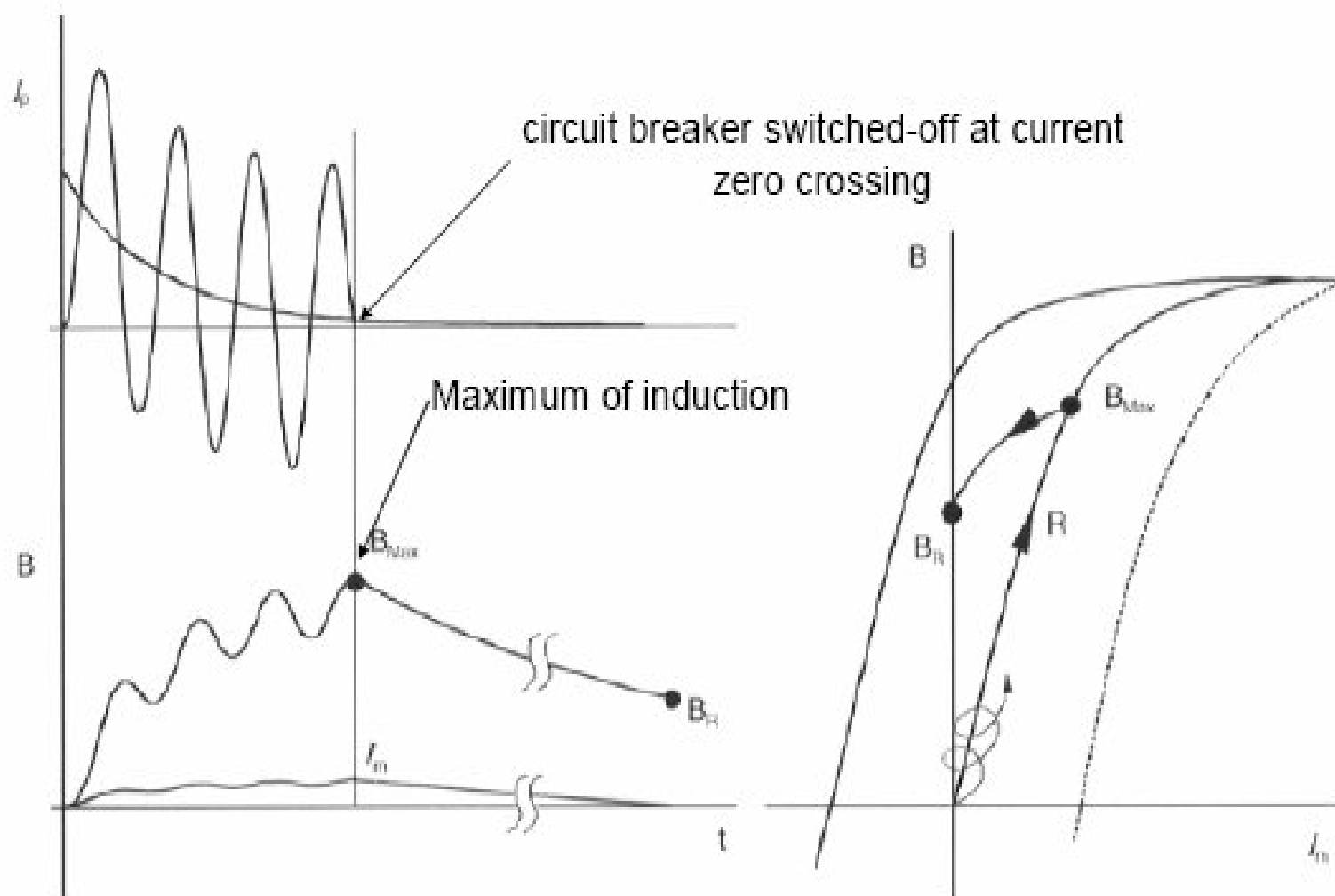
With DC Offset

- Waveform starts off being asymmetrical, then symmetrical in steady state

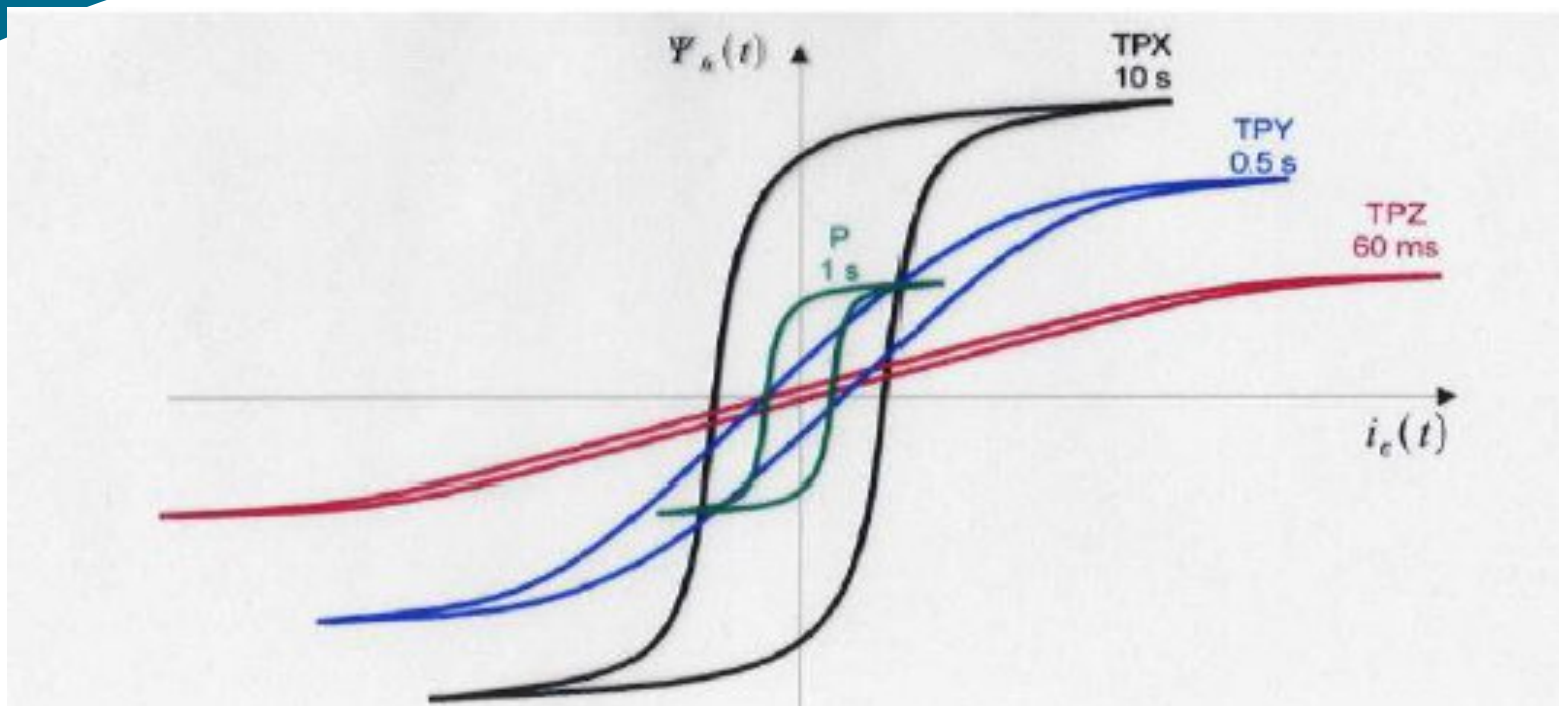
نمایش مقدار ضریب حالت گذرا نسبت به تغییرات زمان t_{free}



پدیده دشارژ CT

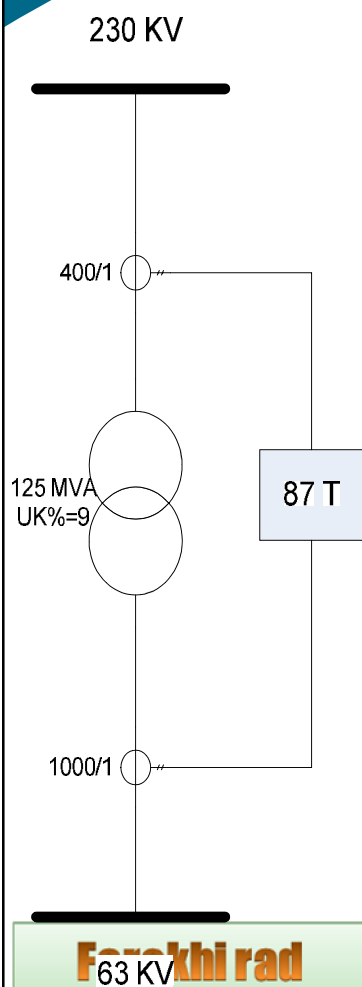


نمودار اشباع کلاسهای متفاوت



class	Error at rated current angle		Peak error at rated overcurrent
TPX	$\pm 0,5\%$	$\pm 30 \text{ min}$	$\epsilon \leq 10\%$
TPY	$\pm 1,0\%$	$\pm 60 \text{ min}$	$\epsilon \leq 10\%$
TPZ	$\pm 1,0\%$	$\pm 180 \pm 18 \text{ min}$	$\epsilon \leq 10\% \text{ (only I}_L)$

انتخاب ترانس جریان برای حفاظت دیفرانسیل ترانس



Sn	125.00	MVA	→	Ip	313.78	A	KA $I_{SCCmax} = \frac{1}{U_K \%} \cdot I_a$
Uprimary	230.00	KV		Is	1145.54	A	
Usecondary	63.00	KV		Iscmax-p	3.49		
Uk%	9.00			Iscmax-s	12.73		

Ip-ct- primary	400	A	→	Iscmax-p/Ip	8.72		Ktd $K_{td} = 1 + \omega \cdot T_N \cdot (1 - e^{-\frac{I_{p-ct}}{T_N}})$
Is-ct- primary	1	A		Iscmax-s/Is	12.73		
Ip-ct-secondary	1000	A					
Is-ct- secondary	1	A					
Tn	50	ms	→				
Tfree	10	ms					
F	50	HZ					

$CT \text{ Requirement} = \frac{I_{SCCmax}}{I_{p-CT}} \cdot K_{td}$				↓		
				Primary Requirement	33.53	ALF'-min for relay
				Secondary Requirement	48.97	

انتخاب ترانس جریانی برای حفاظت دیفرانسیل ترانس

Primary calculations

r for CU	0.03	(Ohm * mm ²)/m	→	R _{wire} =	0.93	ohm
L	100.00	m				
A	6.00	mm ²				
R _{relay} =	0.05	ohm	→	P _{wire}	0.93	VA
R _{ct} =	5.00	ohm		P _{relay}	0.05	VA
I _s	1	A		P _{connected}	0.98	VA
				P _{ct}	5.00	VA

Class X converted to Class P

U _{knee}	500	V	➔	ALF' _(actual)	108.77	No Problem
				If P _n =	30	VA
$ALF' = \frac{1.3 \cdot U_{knee}}{(P_{Connected} + P_{CT})}$ $ALF_n \geq \frac{(P_{Connected} + P_{CT})}{(P_n + P_{CT})} \cdot ALF'$				➡		
				ALF _n >=	18.57	

انتخاب ترانس جریانی برای حفاظت دیفرانسیل ترانس

Secondary calculations

ρ for CU	0.03	(Ohm * mm2)/m		Rwire =	0.93	ohm
L	100.00	m				
A	6.00	mm2				

Rrelay =	0.05	ohm		Pwire	0.93	VA
Rct =	10.00	ohm		Prelay	0.05	VA
Is	1	A		Pconnected	0.98	VA
				Pct	10.00	VA

Class X converted to Class P

Uknee	500	v		ALF'(actual)	59.22	No Problem
				If Pn =	30	VA
$ALF' = \frac{1.3 \cdot U_{knee}}{(P_{Connected} + P_{CT})}$ $ALF_n \geq \frac{(P_{Connected} + P_{CT})}{(P_n + P_{CT})} \cdot ALF'$						
				ALFn >=	16.25	

استانداردهای ترانسهای جریان

Important Standards

IEC	60044-1	1996/12	Current Transformers
IEC	60044-1	2000/07	Current Transformers (amendment 1)
IEC	60044-6	1992/03	Current Transformers (transient performance TP)
IEC	60044-2	1997/02	Voltage Transformers
BS EN	60044-1		Current Transformers

ANSI	C57.13/1993	Current Transformers
AS	1675-1986	Current Transformers

IEC	185/1978	obsolete !
BS	7626/1993	obsolete !
BS	3938/1973	obsolete !



VDE	0414	Specifications for Instrument Transformers
-----	------	--

Additional

CEI	(Italy)	SEN	(Sweden)
CSA	(Canada)	SEU	(Suisse)
NF	(France)	ABNT	(Brasil)



Questions?

Farokhi ra