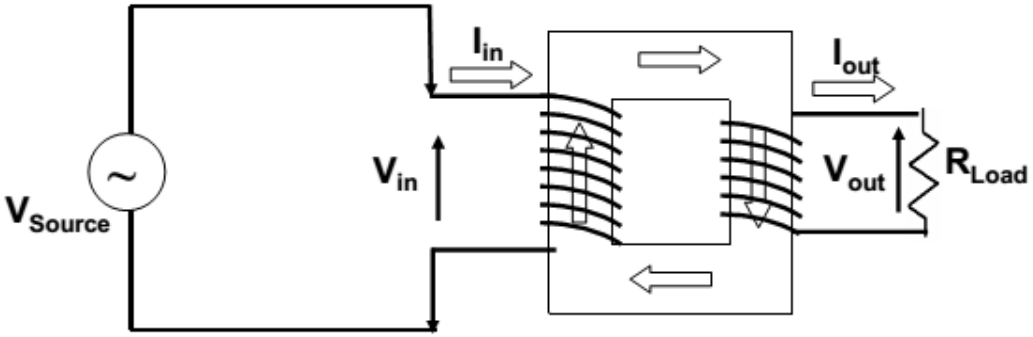
بخش پنجم: ترانسفورماتورهای اندازه گیری و کاربرد آنها در حفاظت و میترینگ

مدرس: دکتر علی کریمی

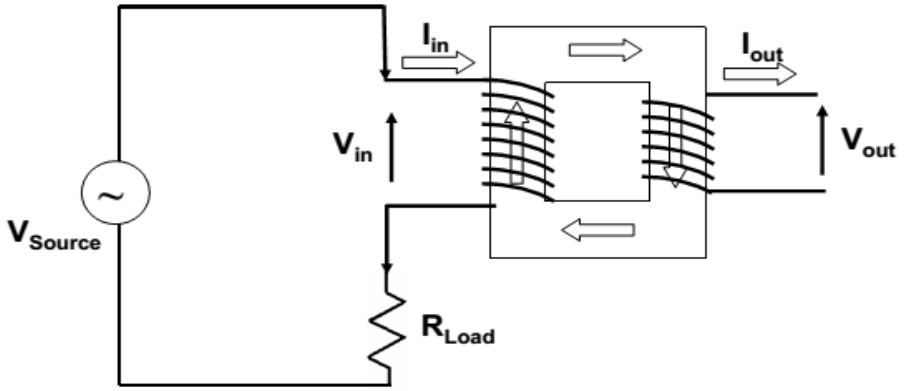
❖ انواع ترانسفورماتورها در شبکه برق:

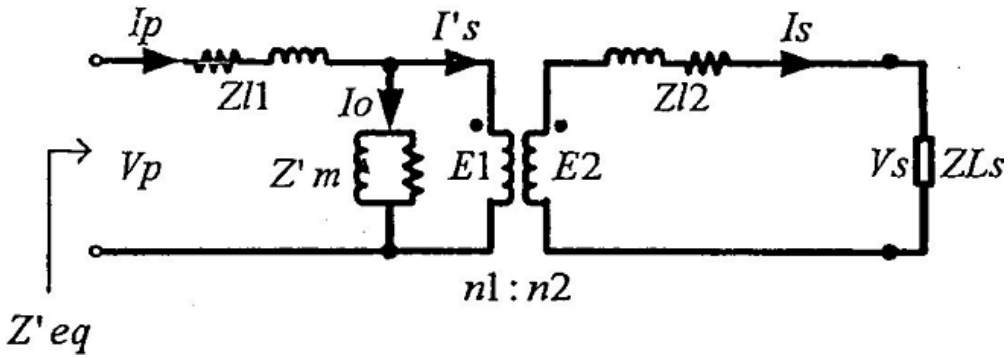
- ✓ ترانسفورماتور قدرت (Power Transformer)؛
- ✓ ترانسفورماتورهای اندازه گیری (Voltage Transformer & Current Transformer)؛

Operation of a Transformer (Power Transformer & VT):



Operation of a Transformer (CT):

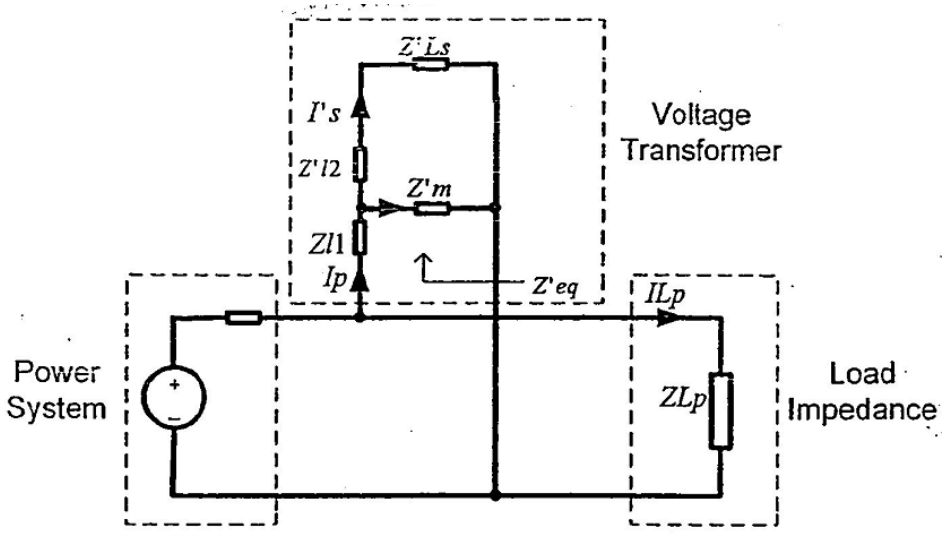




❖ مدار معادل ترانس تک فاز:

❖ امپدانس دیده شده VT از سمت اولیه (شبکه) باید خیلی بزرگتر از امپدانس های موجود در شبکه قدرت باشد. در واقع، امپدانس بی باری که تقریبا همان Z'm است، باید خیلی بزرگ باشد.

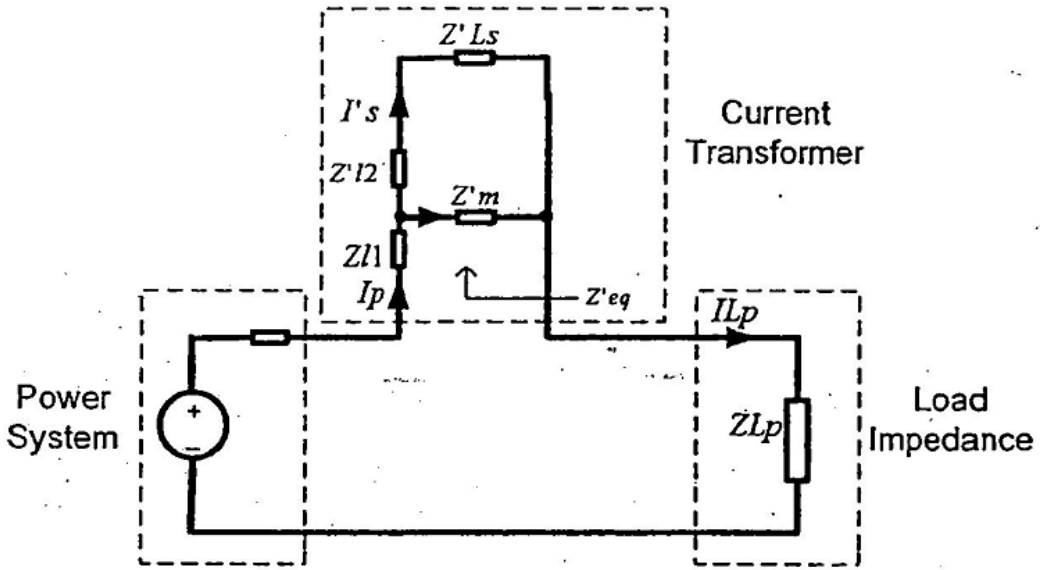
❖ جریان در ثانویهٔ VT (I's) نباید از حد معینی بزرگتر شود. بدترین حالت مربوط به اتصال کوتاه ثانویه است که هیچ گاه نباید رخ دهد (در ثانویه فیوز قرار می دهیم).



به طور کلی، بار ثانویه VT باید خیلی بزرگ باشد تا خطای اندازه گیری زیاد نشود:

$$ZL_p \ll Z'_m \ll Z'L_s$$

- CTها در نقطه مقابل VTها قرار دارند. با توجه به اینکه CT سری با شبکه بسته می شود، پس امپدانس آن از دید شبکه (اولیه) باید خیلی کوچک باشد تا تغییری در شبکه ایجاد نکند.
- بدترین حالت مربوط به باز بودن ثانویه است که باعث می شود امپدانس دیده شده از شبکه همان Z'm باشد (نباید بگذاریم ثانویه مدارباز شود). در طراحی نیز Z'm نسبتاً کوچک لحاظ می گردد.
- پس CT بایددر شرایط نزدیک به اتصال کوتاه ثانویه کار کند و همچنین، جریان مغناطیس کنندگی نسبت به جریان شبکه کوچک باشد تا خطا کم باشد.

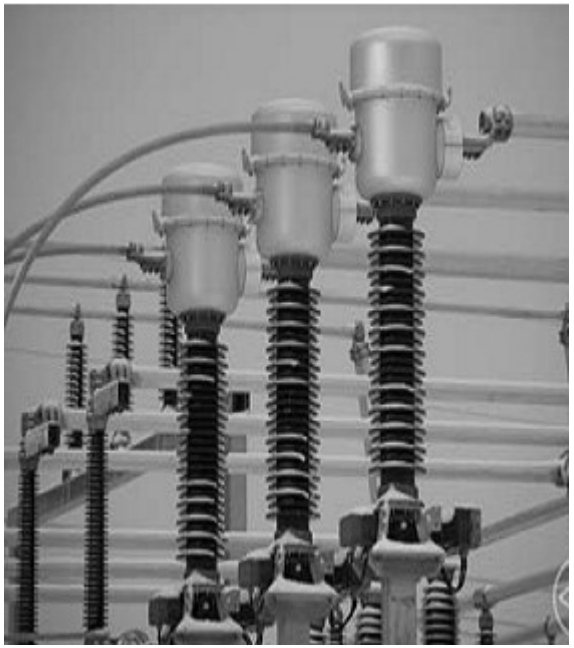


به طور کلی، برای CT باید شرایط زیر برقرار باشد:

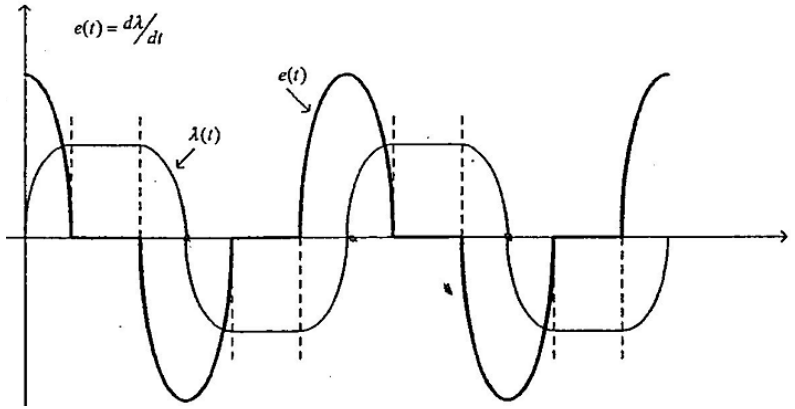
$$Z'L_s \ll Z'_m \ll ZL_p$$

ترانسفورماتورهای جریان (CT)

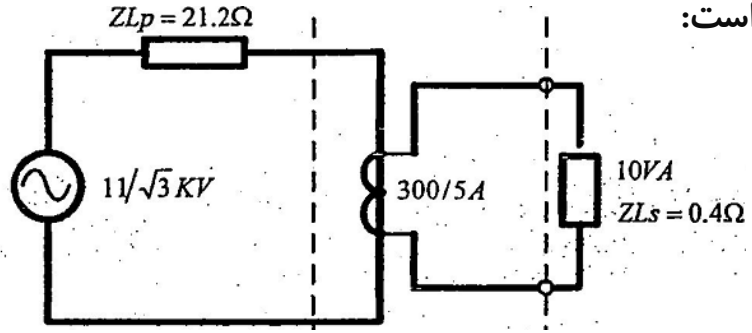
- جریان عبوری از خطوط، ترانسفورماتور و ... باید به منظور کاربردهای حفاظتی و کنترلی اندازه گیری شود. جریان حدود هزار آمپر در ولتاژ بالا بصورت مستقیم قابل اندازه گیری نبوده و لذا از CT استفاده می گردد.
- به طور کلی می توان CT را از سمت ثانویه آن بصورت یک منبع جریان مدلسازی نمود. بنابراین، باید از باز بودن مدار ثانویه آن اجتناب گردد. در صورت وقوع این حالت:



- ✓ کل جریان اولیه صرف مغناطیس کردن هسته می شود، در حالیکه در حالت نرمال جهت کاهش خطا بخش بسیار کوچکی از آن از راکتانس مغناطیسی شاخه موازی عبور می کرد.
- ✓ اضافه ولتاژهای سوزنی شکل با دامنه بسیار بالا در ثانویه بوجود می آید که برای تجهیزات سمت فشار ضعیف، پرسنلی که در حین کار بر روی آنها هستند و خود CT خطرناک است.
- ✓ افزایش شدید شار باعث بزرگ شدن تلفات آهنی و گرم شدن هسته و گاهی از بین رفتن عایق بین سیم پیچ و هسته می گردد. لذا، در مدار ثانویه CT نباید از فیوز و یا سایر وسایل حفاظتی استفاده گردد. ضمناً، در صورت نیاز به جدا کردن رله یا سایر تجهیزات از CT، ابتدا باید دو سر ثانویه آن اتصال کوتاه گردد.

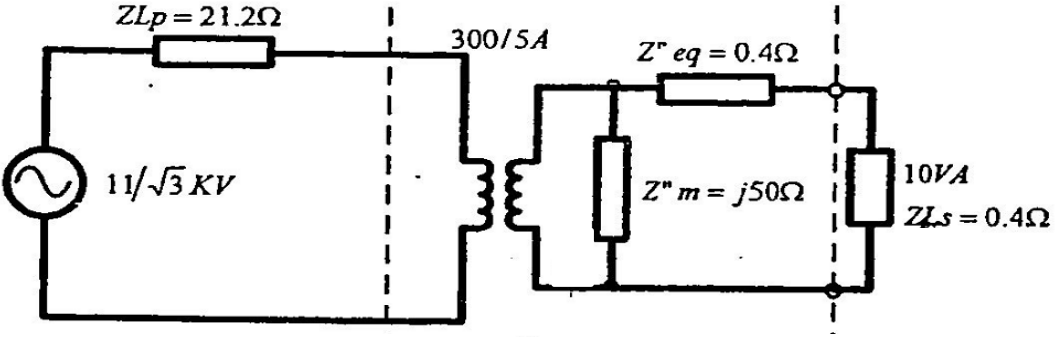


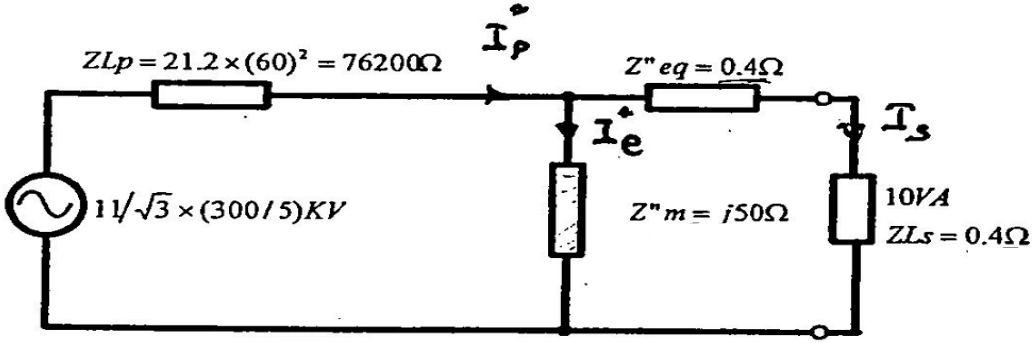
❖ مثال: در یکی سیستم 11kV، جریان بار 300A فرض می شود. برای اندازه گیری از یک CT با نسبت 300/5 استفاده میشود. سیم بندی جریانی تجهیزات ثانویه CT مجموعا باری معادل 10VA (Burden) را تشکیل می دهد. امپدانس معادل بار شبکه برق معادل 21.2 اهم است. مدار معادل قدرت به صورت زیر است:



$$ZL_s \times I_s^2 = Burden \Rightarrow ZL_s = \frac{10}{5^2} = 0.4$$

مدار معادل یک فاز شبکه در شرایط عادی (عدم اشباع):

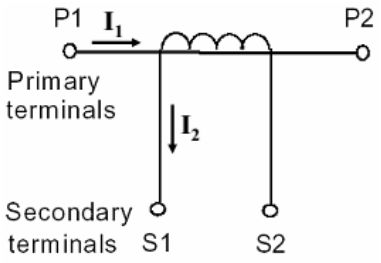




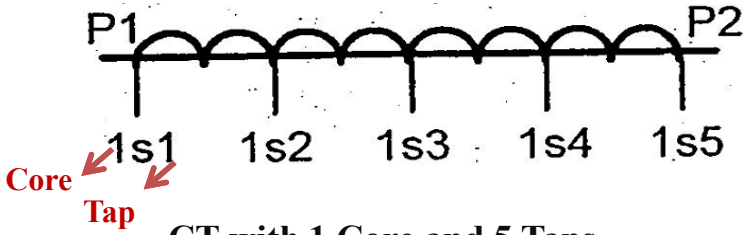
نکات:

- ✓ جریان مغناطیس کنندگی در برابر Is خیلی کم است.
- ✓ جریان اولیه توسط بار قدرت تعیین می شود. حتی در شرایطی که ثانویه باز باشد، امپدانس ترانس در برابر امپدانس شبکه کم است.
- ✓ جریان ثانویه CT با تغییر Burden، تغییر چندانی نمی کند.

- Burden ترانس جریان مربوط به کلیه تجهیزاتی است که به جریان CT نیاز دارند و به صورت سری در ثانویه متصل میشوند.
- در عمل هر CT شامل چند سیم پیچ ثانویه یا Core می باشد که معمولا با هم متفاوتند (مثلا کـر ۱ مربـوط بـه انـدازه گیـری و کـر ۲ مربـوط بـه حفاظت). تعداد کرها ممکن است به ۶ هم برسد. هر کر نیز ممکن است چند سر خروجی با تپ داشته باشد (برای تغییر نسبت تبدیل).
- تغییر نسبت تبدیل ترانس جریان:
  - ✓ با تغییر تپ از ثانویه، کلاس دقت ممکن است تغییر کند. ضمنا ولتاژ نقطه زانوی اشباع به نسبت کاهش تعداد دور از مقـدار نـامی، کوچـک مـی شـود و مقاومت سیم پیچ ثانویه نیز تقریبا به همین نسبت کوچک خواهد شد. ولی با تغییر تپ از اولیه، مشخصات مذکور تغییری نمی کنند.
  - ✓ تغییر نسبت تبدیل در اولیه معمولا به نسبت ۲:۱ و گاهی ۴:۲:۱ انجام می شود ولی در ثانویه معمولا تنوع بیشتری دارد.
  - ✓ تغییر نسبت تبدیل از سمت ثانویه در پست برقدار امکان پذیر است.
- نامگذاری ترمینال های اولیه و ثانویه (سرهای اولیه با H1-H2 یا K-L و یا P1-P2 و ثانویه با S گاهی هم با k-l):

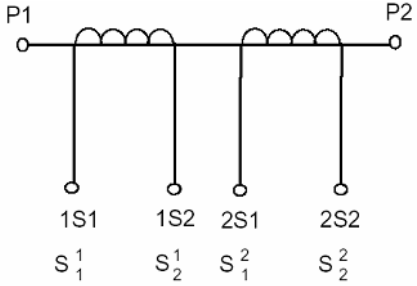


Single ratio CT



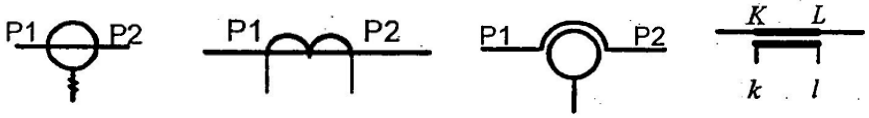
CT with 1 Core and 5 Taps

مثلا بین تپ های ۱و ۲، نسبت ۵۰۰/۱ و بین ۱و ۵ نسبت ۲۰۰۰/۱



CT with 2 Cores

نمایش تک خطی CT در نقشه های الکتریکی:



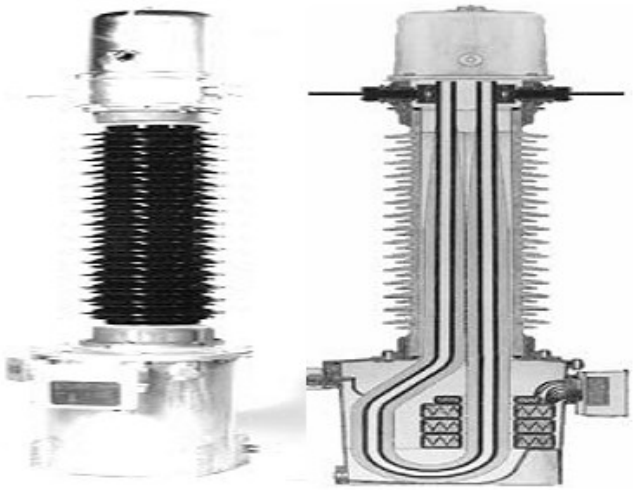
ترانسفورماتورهای جریان (CT)

❖ انواع CT به لحاظ مکان هسته:

✓ هسته بالا (Top Core) یا Inverted Type: معمولا، اولیه به صورت یک هادی توپر در بالا وارد می شود و ثانویه نیز در بالا قرار دارد.

✓ هسته پایین (Bottom Core) یا Tank Type: اولیه به شکل U از بالا تا پایین ادامه دارد و سیم پیچ ثانویه در پایین به دور آن واقع است.

هسته بالا



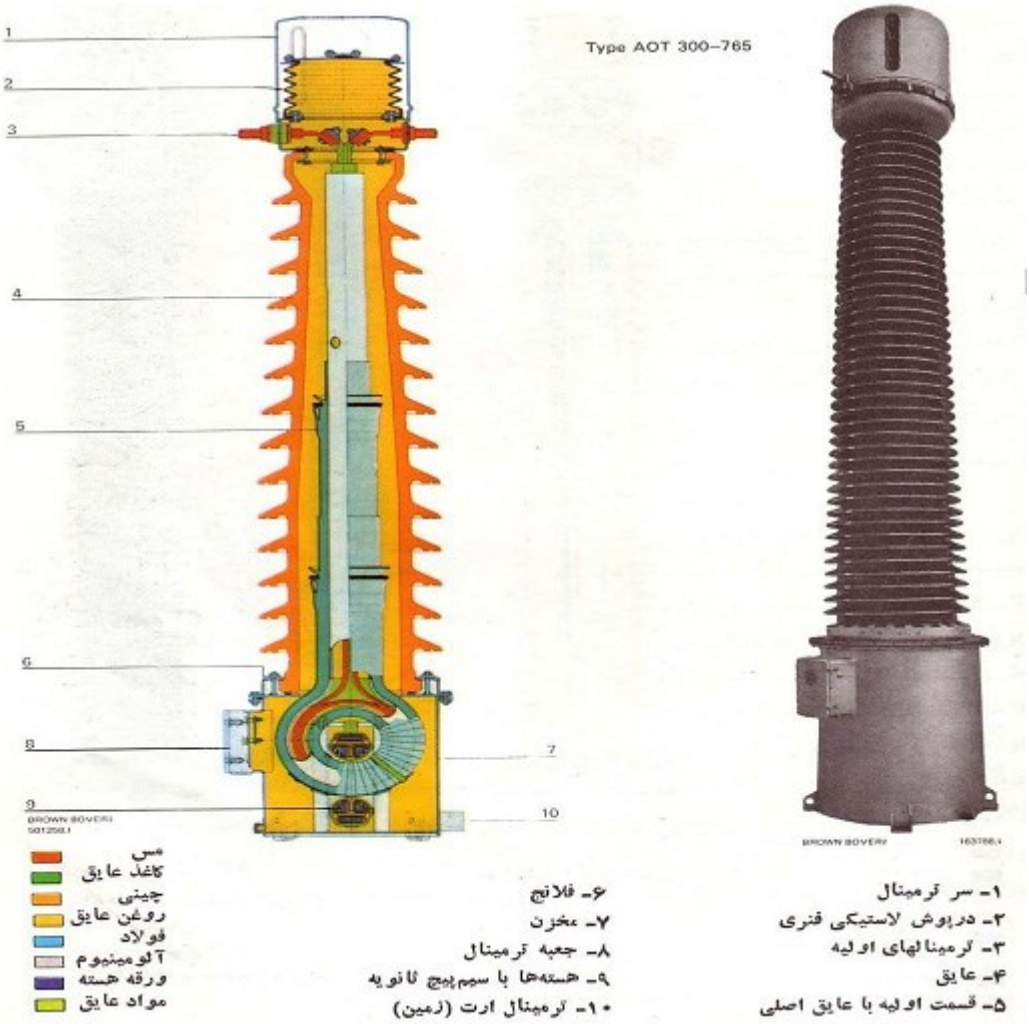
هسته پایین

- هسته بالا از نظر الکتریکی بهتر است:
  - عایق کاری کمتر
  - نیروی اتصال کوتاه کم
  - کمتر بودن مشکل خنک کنندگی سیم پیچ اولیه

- هسته بالا به دلیل بالا بودن هسته ها از نظر مکانیکی بدتر است:
  - حمل آن مشکل تر بوده
  - به هنگام وقوع زلزله و نیروهای مکانیکی، گشتاور زیادی به استراکچر و قسمت تحتانی آن وارد می شود.

- به همین دلیل در سطوح ولتاژ پایین که وزن CT کم است، می توان از نوع هسته بالا استفاده کرد ولی در ولتاژهای بالاتر به دلیل مشکلات مکانیکی از نوع هسته پایین استفاده می شود.

ترانسفورماتورهای جریان (CT)



انواع CT براساس عایق بندی

❖ نوع خشک با عایق رزین:

- ✓ برای ولتاژهای پایین (تا ۶۳kV) استفاده می شود؛
- ✓ در محل های سرپوشیده (بسته) بیشتر استفاده می شود چون احتمال انفجار در آنها تقریبا صفر است.

❖ نوع روغنی با کاغذ آغشته به روغن:

- ✓ از ولتاژهای پایین تا بالاترین ولتاژهای پست می تواند استفاده شود (بخش عمده ای از CT های پست ها).

❖ نوع SF6:

- ✓ در حال حاضر تعداد معدودی سازنده در این بخش وجود دارد و در پستها کمتر استفاده می شود.

نمونه های نصب شده CT در پست ها

63 kV CT:

230 kV CT:

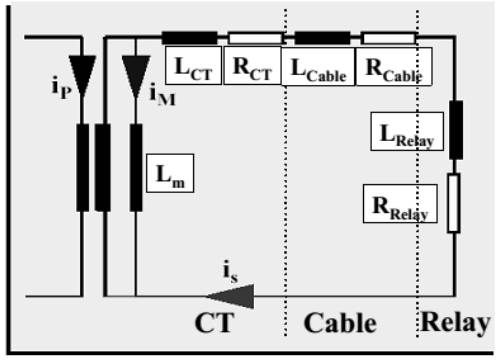
1. **جریان نامی اولیه (Primary rated current):** جریان نامی اولیه و بزرگترین تپ CT است. استاندارد IEC185 اعداد زیر یا ضرایب 10 و 0.1 آنها را پیشنهاد داده است:

10-12.5-15-20-25-30-40-50-60-75

2. **جریان نامی ثانویه (Secondary rated current):** جریان نامی ثانویه که ۱ یا ۵ آمپر انتخاب می شود و در برخی کاربردهای خاص از مقدار ۲ آمپر نیز استفاده می شود.

3. **نسبت تبدیل CT:** نسبت جریان اولیه به ثانویه CT.

4. **Burden:** امپدانس متصل به ثانویه CT که بر حسب اهم بیان می شود. معمولا این مقدار را در مجذور جریان نامی ثانویه ضرب کرده و بر حسب VA بیان می کنند. به طور کلی، Burden توسط یک امپدانس و cosß یا VA و cosß می تواند بیان شود.



مدار معادل CT و ولتاژ ثانویه:

$$E_2 = I_S(Z_{CT} + \underbrace{Z_{Cable} + Z_{Relay}}_{Z_{Burden}})$$

5. **خطای اندازه گیری CT (خطای اندازهٔ جریا ن) یا Transformation Ratio Error یا Mismatch Error:**

$$Current\ Error = Fi\% = \frac{K_n \times I_s - I_p}{I_p} \times 100$$

K_n: نسبت تبدیل نامی

I_p: جریان واقعی اولیه (rms)

I_s: جریان اندازه گیری شده ثانویه (rms)

6. **انحراف فاز یا جابجایی در فاز (Phase displacement):** انحراف زاویه فاز جریان ثانویه اندازه گیری شده نسبت بـه جریان اولیه (در حالت ایده آل باید صفر باشد): برحسب رادیان یا دقیقه

7. **خطای مرکب (Composite Error):**

i_p: مقدار جریان لحظه ای اولیه

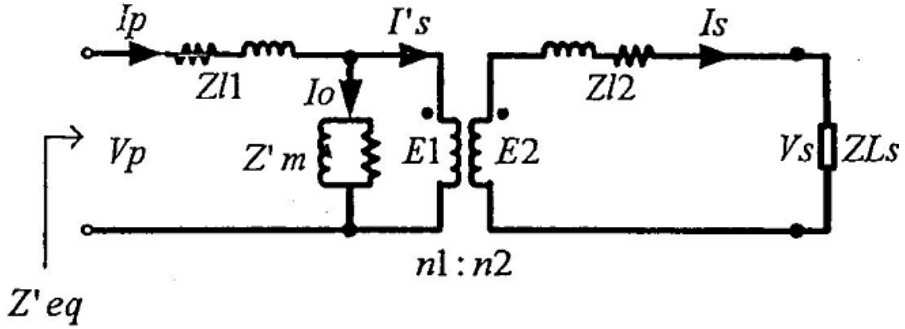
i_s: مقدار جریان لحظه ای ثانویه

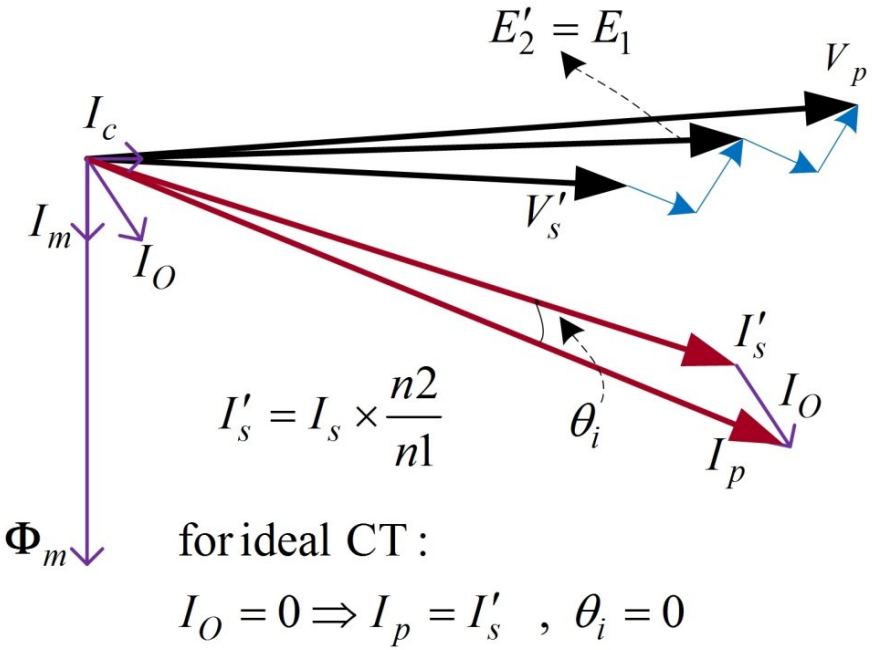
T: دورهٔ تناوبی

$$Composite.Error = Fc\% = \frac{\sqrt{\frac{1}{T}\cdot\int_0^T (K_n \times i_s - i_p)^2\, dt}}{I_p} \times 100$$

دیاگرام فیزوری CT از دید اولیه (شرایط غیراشباع):

جریان اولیه و ثانویه CT از نظر اندازه و فاز به علت جریان مغناطیس کنندگی و تلفات هسته با هم متفاوتند.





✓ **برای کم کردن خطای CT باید تا حد ممکن جریان I_O را کم کرد. این کار از طریق کم کردن رلوکتانس هسته انجام میشود (هسته های با ضریب نفوذ مغناطیسی بسیار بالا، طول مسیر شار کوتاه و سطح مقطع هسته بالا).**

مشخصات CTها

8. **جریان محدود نامی (I_{pL}):** حداقل جریان اولیه ای که به ازای آن، خطای مرکب کر اندازه گیری CT در burden نامی ثانویه، برابر با مقدار نامی و یا ۱۰ درصد بیشتر از آن باشد.

9. **حد دقت نامی جریان اولیه:** حداکثر جریان مجاز اولیه که در آن با وجود burden نامی در ثانویه، خطای مرکب کر حفاظتی از مقدار نامی بالاتر نرود و برای کرهای اندازه گیری از ۱۵ درصد مقدار نامی بیشتر نشود.

10. **کلاس دقت:** تعیین کنندهٔ میزان خطای جریان ($Fi\%$ و $Fc\%$) CT است. در استاندارد IEC به صورت زیر تعیین می شود:

- برای کرهای اندازه گیری: به صورت cMn است که c برابر با کلاس دقت (با توجه به $Fi\%$ در ۲۵ تا ۱۰۰ درصد جریان نامی) است و مقادیر آن 0.1، 0.2، 0.5 و 1 می تواند باشد. حرف M تعیین کنندهٔ کر اندازه گیری و n ضریب اضافه جریان (حد دقت نامی جریان اولیه تقسیم بر جریان نامی اولیه) است. به همراه کلاس دقت، معمولا burden و نسبت تبدیل نیز بیان می شود (burdenها برای کرهای اندازه گیری در $\cos\beta=0.8$ عبارتند از: 30، 15، 10، 5.0 و 2.5 ولت آمپر). به طور مثال:

10VA, 0.5M5, 1000/1A

- برای کرهای حفاظتی: به صورت cPn است که c برابر با کلاس دقت (با توجه به Fc%) است و مقادیر آن 5 یا 10 است. پس این عدد خطای مرکب است وقتی جریان برابر حد دقت است. حرف P تعیین کنندهٔ کر حفاظتی و n نیز ضریب اضافه جریان یا ضریب حد دقت که برابر با حد دقت نامی جریان اولیه تقسیم بر جریان نامی اولیه می باشد، است (ALF: Accuracy Limit Factor). برای کرهای حفاظتی، n یا ALF برابر 5، 10، 15، 20 و یا 30 است. به طور مثال:

30VA, 5P10, 1000/1A

نکته: برای کرهای 5Pn مقدار خطای جریان ($Fi\%$) برابر ۱ درصد و برای کرهای 10Pn، این خطا برابر با ۳ درصد است.

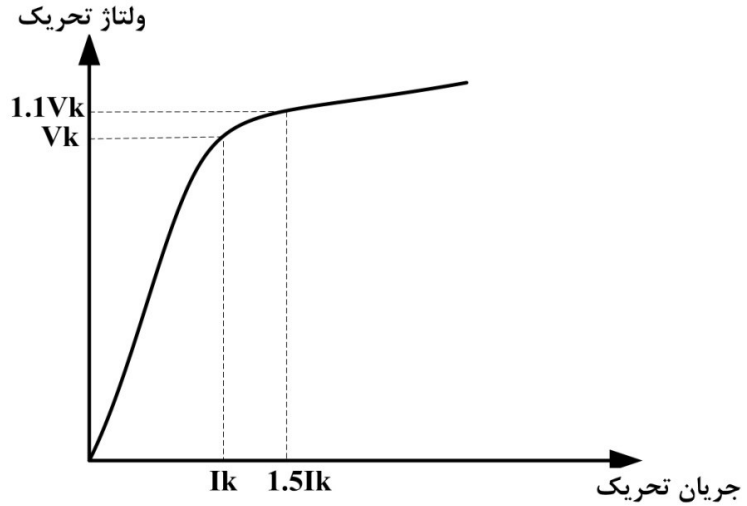
11. **حد حرارتی جریان کوتاه مدت (I_{thn}):** مقدار rms جریان در اولیه که برای مدت یک ثانیه توسط CT قابل تحمل است وقتی ثانویه اتصال کوتاه باشد. جریان حد حرارتی برای مدت t ثانیه از رابطهٔ زیر بدست می آید:

$$I_{th} = I_{thN} \times \frac{1}{\sqrt{t}} \quad , t \geq 1$$

12. **جریان دینامیکی (I_{dyn}):** مقدار بیشینه برای اولین پیک جریان در اولیه است که CT می تواند نیروهای الکترودینامیکی حاصل را بدون صدمه دیدن تحمل کند (ثانویه اتصال کوتاه).

$$I_{dyn} = 2.5 \times I_{th}$$

13. **ولتاژ شروع اشباع (Knee point Voltage):** ولتاژ نقطه ای از منحنی بی باری (منحنی مغناطیس شوندگی) که افزایش ۱۰ درصد در ولتاژ بی باری سبب افزایش ۵۰ درصد جریان بی باری گردد. این ولتاژ در واقع، مشخص کنندهٔ شروع اشباع هسته است. این ولتاژ برای آزمایش بی باری از طرف ثانویه ترانس جریان بیان می گردد.



14. **مشخصات دیگر:** مانند جریان پیوسته نامی حرارتی، ولتاژ نامی، فرکانس نامی، سطح عایقی BIL که در فصل اول درس توضیح داده شد.

خطای دامنه و فاز برای کلاس‌های استاندارد CTهای اندازه گیری براساس استاندارد IEC

کلاس دقت	درصد خطای دامنه در مقادیری از جریان نامی به درصد (+ یا -)				درصد خطای فاز در مقادیری از جریان نامی به درصد (+ یا -)							
					دقیقه				سانتی‌رادیان			
	۵	۲۰	۱۰۰	۱۲۰	۵	۲۰	۱۰۰	۱۲۰	۵	۲۰	۱۰۰	۱۲۰
۰/۱	۰/۴	۰/۲	۰/۱	۰/۱	۱۵	۸	۵	۵	۰/۴۵	۰/۲۴	۰/۱۵	۰/۱۵
۰/۲	۰/۷۵	۰/۳۵	۰/۲	۰/۲	۳۰	۱۵	۱۰	۱۰	۰/۹	۰/۴۵	۰/۳	۰/۳
۰/۵	۱/۵	۰/۷۵	۰/۵	۰/۵	۹۰	۴۵	۳۰	۳۰	۲/۷	۱/۳۵	۰/۹	۰/۹
۱/۰	۳/۰	۱/۵	۱/۰	۱/۰	۱۸۰	۹۰	۶۰	۶۰	۵/۴	۲/۷	۱/۸	۱/۸

- CTها باید در محدودهٔ ۱۰ تا ۱۲۰ درصد جریان نامی و محدودهٔ بار (burden) ۲۵ تا ۱۰۰ درصد بار نامی مطابق با استاندارد IEC کلاس دقت مطلوب را داشته باشند.

- ✓ در ایران، دقت CT ها براساس ملاحظات وزارت نیرو، برای سطوح ۲۳۰ و ۴۰۰ کیلوولت 0.5 است و برای سطوح ۱۳۲ و ۶۳ بعضاً، ۱ هم می باشد.
- ✓ اگرچه این دقت برای اندازه گیری جریان نسبتا قابل قبول است (کاربردهای غیر از انرژی)؛ اما برای اندازه گیری انرژی اکتیو در سطوح بالا مناسب نیست و در بسیاری از کشورهای پیشرفته، دقت 0.2 برای کنتورهای سنجش انرژی الزامی است.

کلاس دقت برای CTهای حفاظتی براساس استاندارد IEC

Accuracy class	at nominal current			at primary rated overcurrent
	absolute error	phase error	phase error	composite error
	%	minutes	centirad	%
5P	±1	±60	±1.8	5
10P	±3	—	—	10

- هسته های حفاظتی نیاز به دقت بالا در جریان نامی ندارند ولی در عوض باید در اثر عبور جریان خطا به اشباع نرفته و دقت مناسبی داشته باشند. برای جلوگیری از اشباع سریع هسته باید سطح مقطع هسته را بزرگ نموده و یا از هسته های با فاصله هوایی استفاده نمود.

نکات دیگر در مورد CTها

- انتخاب تجهیزاتی نظیر کلید، باس بار، ترانسفورماتور، لاین تراپ و ...، بیشتر از ظرفیت نامی اشکالی ندارد ولی در CT، باید جریان و Burden نامی، متناسب با نیاز واقعی پست تعیین گردد. به ویژه برای هسته اندازه گیری، تعداد مناسب تپ نیز با توجه به جریان فعلی و توسعه آینده در نظر گرفته شود.
- اتصال بیش از یک تجهیز به سیم پیچ ثانویه CT باید با اتصال سری انجام شود. اتصال تجهیزات حفاظتی و اندازه گیری به دلیل تفاوت نیازمندی آنها امکان پذیر نبوده و باید برای هر یک، از CT با مشخصات مناسب استفاده گردد.
- برای جلوگیری از عبور جریان بالای ثانویه هنگام اتصال کوتاه در شبکه از تجهیزات اندازه گیری، باید آنها را حفاظت نمود. بجای استفاده از فیوز یا رله در مدار ثانویه CT لازم است هسته به اشباع برود و لذا هسته های اندازه گیری معمولا سطح مقطع کمی دارند.

افزایش خطای CT در اثر اشباع هسته

$$\Uparrow R_m = \frac{\ell}{\mu_0 . \mu_r \downarrow . A_{Fe}}$$

$$\Downarrow L_m = \frac{N^2}{R_m \uparrow}$$

$$\Uparrow i_M = \frac{V_{Sec}}{jL_m \downarrow . \omega}$$

با توجه به اینکه μ_r شیب منحنی B-H است، در اثر اشباع هسته CT، μ_r کم شده، R_m زیاد، L_m کم و لذا جریان مغناطیس کنندگی i_M زیاد می شود.
یعنی در اثر اشباع CT خطای اندازه گیری زیاد می شود.

نکات دیگر در مورد CTها

- در انتخاب CT برای یک پست، جریان نامی اولیه ۲۰ تا ۳۰ درصد بیشتر از ماکزیمم جریان بار در اولیه انتخاب می گردد و سپس به مقادیر استاندارد مراجعه می شود و اولین مقدار استاندارد بالاتر از جریان موردنظر انتخاب می شود:

10-12.5-15-20-25-30-40-50-60-75

100-125-150-200-250-300-400-500-600-750

1000-1250-1500-2000-2500-3000-4000-5000-6000-7500

- ضریب اضافه جریان برای کرهای اندازه گیری حتی الامکان باید کوچک انتخاب شود. برای مثال ۵ یا ۱۰ تا وسائل اندازه گیری برای جریان های زیادتر از جریان نامی (تا چند برابر) مورد حفاظت واقع شوند (چرا؟). در واقع، هرچه ضریب اضافه جریان کوچکتر باشد، مفهوم آن است که CT زودتر به اشباع می رود. در این شرایط، CT دیگر نسبت تبدیل خود را نخواهد داشت و جریان ثانویه از آن پس تغییر چندانی نخواهد داشت.

نکته: ضریب اضافه جریان نامی فقط در burden نامی صادق است. اگر بارگذاری کمتر از مقدار نامی باشد، ضریب اضافه جریان واقعی به همان نسبت افزایش می یابد به طوریکه حاصلضرب آنها تقریباً ثابت است (بنابراین، باید مطمئن بود که بار کر اندازه گیری به هنگام کارکرد نزدیک به مقدار نامی باشد).

مثال: CT، 100/5, 0.5M5, 30VA مفروض است. بار ثانویه شامل یک آمپرمتر، یک واتمتر و حدود 25متر کابل اتصالات 2.5 است. مجموع بار ثانویه 10VA است. با توجه به نکته فوق، ضریب اضافه جریان در بار 10VA چقدر است؟

پاسخ:

$$\frac{30\times 5}{10}=15$$

در واقع، CT تا 15 برابر جریان نامی به اشباع نمی رود که برای دستگاه های اندازه گیری خطرناک است.

انتخاب Burden نامیِ کمتر مثلا 15VA، ضریب اضافه جریانی معادل 7.5 بدست میدهد که مناسبتر است.

برخلاف کرهای اندازه گیری، کرهای حفاظتی باید دقت نسبت تبدیل خود را تا حد بالایی از اضافه جریان حفظ کنند (چرا؟). بنابراین، ضریب اضافه جریان برای کرهای حفاظتی باید بزرگ باشد.

مثال: CT، 15VA, 5P10, 400/5 مفروض است. جمع ولت آمپر دستگاه های متصل به CTبا احتساب کابل های ارتباطی، 12VA برآورد می شود. با توجه به نکات قبلی، ضریب اضافه جریان در بار 12VA برابر است با:

$$\frac{15\times 10}{12}=12.5$$

به این ترتیب، این CT تا 12.5 برابر جریان نامی خود با خطای کمتر از حد مجاز، نسبت تبدیل خود را حفظ می کند و به اشباع نمی رود. حال اگر، یک رلهٔ حفاظتی مانند رلهٔ اضافه جریان برای 8 برابر جریان نامی تنظیم شده باشد، می تواند تا جریان های 12.5 برابر جریان نامی به درستی عمل کند.

نتیجه اینکه برای سیستم حفاظتی، کر انتخابی می تواند دارای نسبت تبدیل و ضریب اضافه جریان (ALF) بزرگ و خروجی نامی بالا نسبت به خروجی نقطه کار باشد.

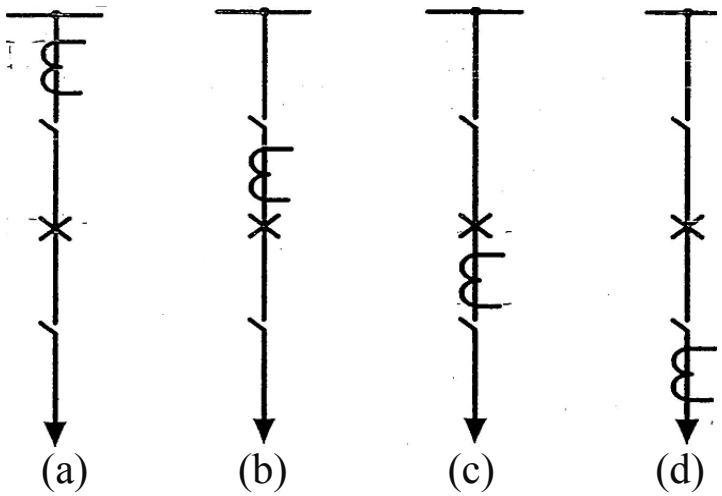
نکات دیگر در مورد CTها

- آزمون های CT: علاوه بر آزمون های شرکت سازنده، CT پس از نصب در پست (قبل از بهره برداری و گاهی پس از بهره برداری) نیز باید آزمون هایی روی آن انجام شود:

  - ✓ آزمون تعیین مقاومت عایقی توسط مگر (مقاومت عایق بین اولیه و زمین یا بدنه، مقاومت بین اولیه و ثانویه ها، ثانویه ها با یکدیگر، ثانویه و زمین)؛
  - ✓ آزمون نسبت تبدیل توسط دستگاه تزریق جریان (تزریق جریان زیاد در ولتاژ کم): منبع جریان به اولیه CTو یک آمپرمتر در ثانویه قرار می گیرد؛
  - ✓ آزمون پلاریته توسط یک منبع ولتاژ DC (باتری): منبع با یک کلید به اولیه وصل می شود و در ثانویه یک گالوانومتر DC قرار می گیرد تا پلاریته ها تعیین گردند.
  - ✓ آزمون مقاومت مدار باز: توسط یک پل اندازه گیری؛
  - ✓ آزمون مدار باز برای تعیین منحنی مغناطیس شوندگی که توسط یک منبع ولتاژ متغیر که به ثانویه متصل می گردد (در حالیکه اولیه باز است) و جریان آن اندازه گیری می شود، انجام می گیرد؛

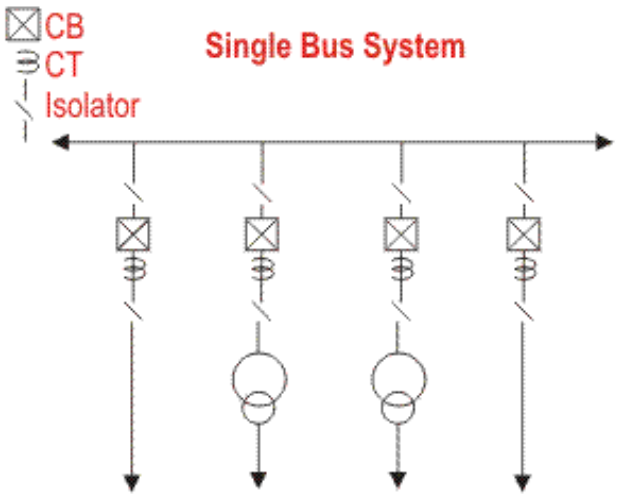
محل نصب CTها در پست

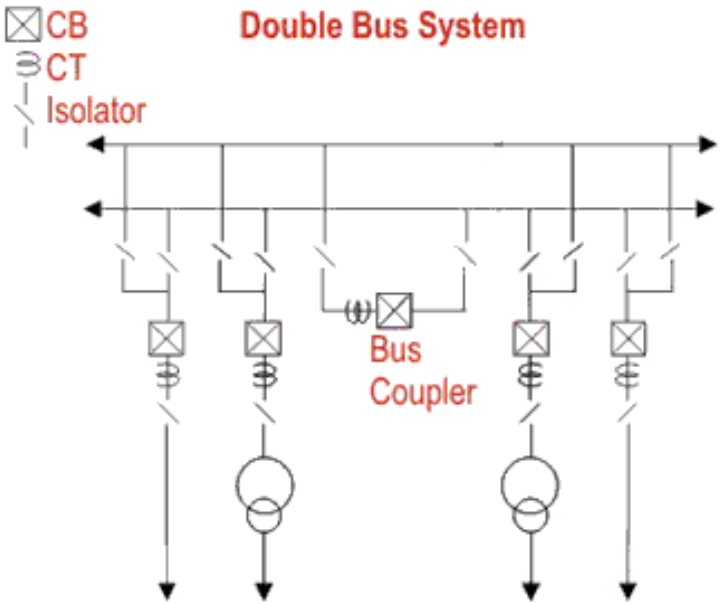
- CT به منظور اهداف اندازه گیری و حفاظت استفاده می شود: حداقل ۴ کر (یک کر برای اندازه گیری، دو کر برای حفاظت اصلی و پشتیبان فیدر، در صورت لزوم یک کر برای حفاظت شین)
- معمولاً در کنار هر مدارشکن یک CT لازم است.
- به طور مثال برای یک انشعاب خط از شین ساده ۴ امکان برای محل نصب وجود دارد:



- ✓ (a) مناسب نیست، زیرا برای تعمیر CT، باید شین را بی برق کرد؛
- ✓ (b) مناسب نیست، زیرا مکان CT تا مدارشکن وارد زون حفاظتی خط شده که نباید اینگونه باشد (این منطقه توسط حفاظت شین محافظت می گردد و حفاظت خط باید به گونه ای باشد که منطقه پس از مدارشکن و به سمت خط را محافظت کند)
- ✓ (d) مناسب نیست، زیرا برای انجام هر عملیات بر روی CT، باید فیدر را از سمت پست مقابل نیز بی برق کرد. همچنین، منطقهٔ بین مدارشکن و CT که باید جز زون خط باشد، جز زون حفاظت شین قرار می گیرد که مناسب نیست.
- ✓ بهترین مکان برای نصب، موقعیت (c) است.

محل نصب CTها در پست

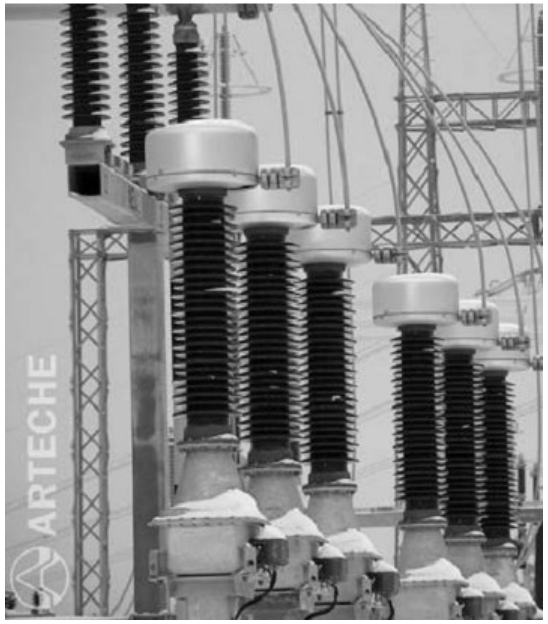




- CT در شینه بندی یک و نیم بریکری:

ترانسفورماتورهای ولتاژ (VT)

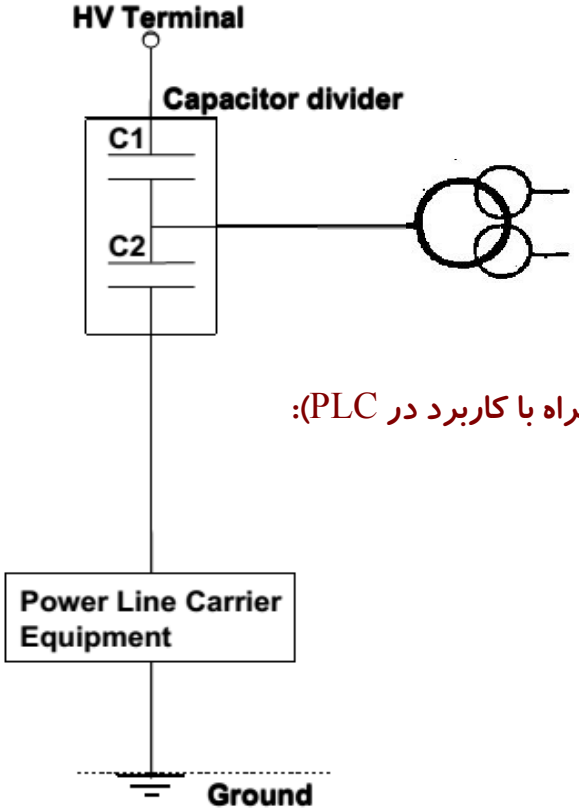
- ولتاژ سیستم به منظور مانیتورینگ وضعیت شبکه، کنترل و حفاظت آن باید اندازه گیری شود.
- اندازه گیری مستقیم ولتاژ بالا جهت بکارگیری آن در مصارف فوق غیر اقتصادی و گاهی غیر ممکن است. لذا، از یک ترانسفورماتور تک فاز جهت کاهش دامنه ولتاژ به مقدار ۱۰۰ یا ۱۱۰ولت استفاده می شود
- ترانسفورماتور ولتاژ معمولا بین فاز و زمین وصل می شود و در سطوح ولتاژ فوق توزیع می توان بین دو فاز وصل نمود. با کمک دو PT بین دو فاز، می توان ولتاژ سه فاز را اندازه گیری نمود (ولتاژ فاز سوم با کم کردن ولتاژ خطی بین دو فاز محاسبه می شود). البته، جهت سنجش ولتاژ با یک مرجع ثابت و مشخص، عایق کاری کمتر و نصب راحتتر در ولتاژهای بالا و یکنواخت شدن آرایش تجهیزات پست، در ولتاژهای بالاتر از فشار متوسط بین فاز و زمین وصل می شود.
- در اتاق کنترل یک ولت متر وجود دارد که ولتاژ خروجی PTرا اندازه گیری می کند و با توجه به نسبت تبدیل ترانس ولتاژ آن را بصورت ولتاژ شبکه نشان می دهد.
- معمولا دارای یک هسته و دو سیم پیچ مجزا است که یکی به منظور اندازه گیری ولتاژ و دیگری جهت کاربردهای حفاظتی مورد استفاده قرار می گیرد.



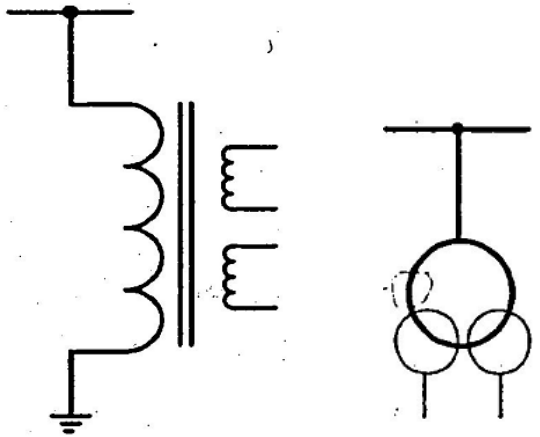
ترانسفورماتورهای ولتاژ (VT)

- ولتاژ نامی ثانویه بین دو فاز ۱۰۰، ۱۱۰، ۱۱۵یا ۱۲۰ ولت است که در ایران معمولا از ۱۰۰ یا ۱۱۰ ولت استفاده شده است. ولتاژ ثانویه بین فاز و زمین برابر مقادیر فوق تقسیم بر $\sqrt{3}$ ست.
- در ولتاژهای بالاتر از ۶۳ کیلوولت به دلیل نیاز به عایق کاری زیاد، با استفاده از مقسم خازنی ولتاژ فشار قوی را به ولتاژ حدود ۲۰ کیلوولت تبدیل می کنند و سپس از یک ترانسفورماتور با عایق کاری کم استفاده می شود. به این نوع VT، ترانسفورماتور ولتاژ خازنی یا CVT گفته می شود. البته گاهی در ولتاژ ۶۳کیلوولت نیز از CVT استفاده می شود.
- از بخش خازن استفادهٔ دیگری هم ممکن است بشود. در واقع، خازن های CVT برای سیستم PLC نیز می توانند کاربردی باشند. این خازن ها به همراه تله موج (Line Trap) فیلتر مناسب جهت جداسازی فرکانس های مخابراتی از فرکانس قدرت را تشکیل می دهند.

دیاگرام مفهومی CVT (همراه با کاربرد در PLC):

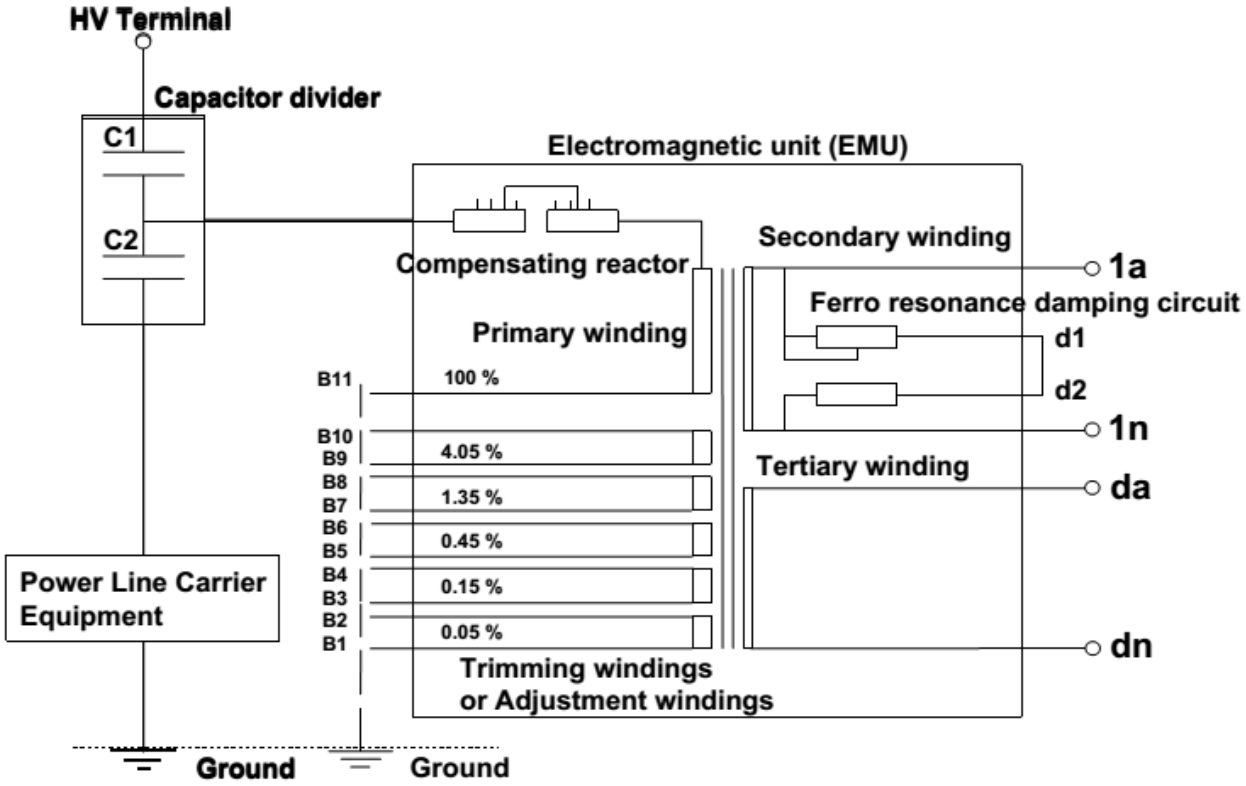


دیاگرام های تک خطی PT:



ترانسفورماتورهای ولتاژ (VT)

- واحد EMU یکی از اجزاء CVT است که بین ترمینال فشار متوسط و ترمینال زمین مقسم خازنی متصل است و مدار ثانویه را تغذیه میکند. یک EMU اساساً شامل یک ترانسفورماتور برای کاهش ولتاژ فشار متوسط به مقدار لازم جهت ولتاژ ثانویه و یک راکتور جبران کننده است.
- راکتانس رآکتور جبران کننده در فرکانس نامی تقریباً برابر راکتانس خازنی ناشی از دو قسمت مقسم خازنی است که بصورت موازی به یکدیگر متصل شده اند کلیه تجهیزات واحد EMU از قبیل ترانسفورماتور ولتاژ فشار متوسط، سیم پیچ جبران کننده و امپدانس میرا کننده در یک محفظه فلزی (تانک) قرار گرفته و در روغن شناور می باشند.



- VT ها از نظر عایق بندی:
  - ✓ نوع خشک با عایق رزینی
  - ✓ نوع روغنی با کاغذ آغشته به روغن
  - ✓ نوع SF6

نمونه هایی از CVT در پست

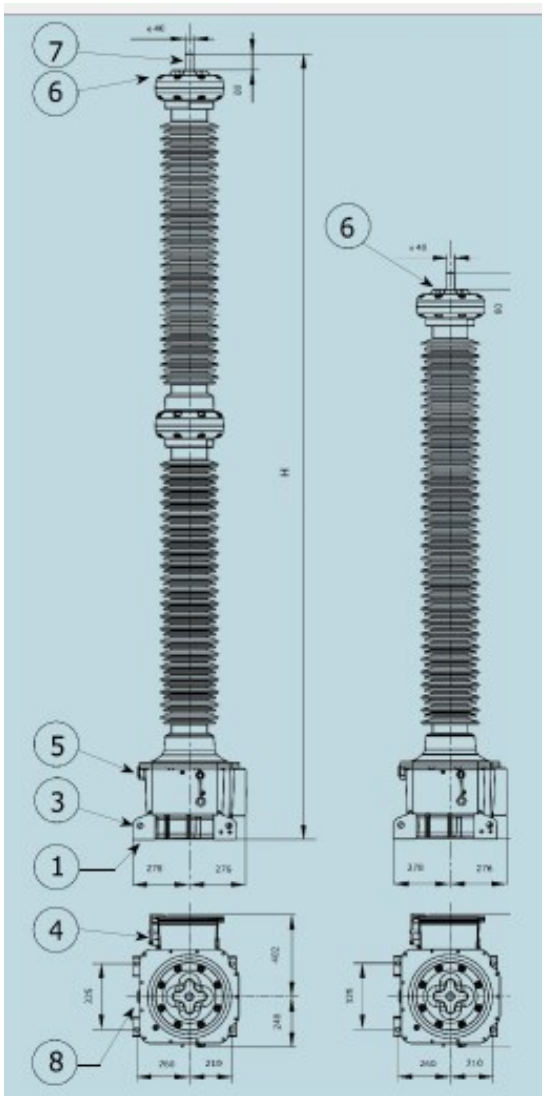
230 kV Bus CVT:

230 kV Line CVT:

63kV CVT:

❖ بخش های ظاهری CVT:

1 - Fixing holes (28 DIA)
2 - Earth terminal for 10 to 15 mm dia cable
3 - Lifting holes
4 - Secondary terminal box
5 - Oil level gauge of electromagnetic unit
6 - Threaded holes for line trap fixing
7 - High-voltage terminal
8 - Oil draining plug of electromagnetic unit



پارامترهای مهم در VT

❖ **ولتاژ نامی اولیه (Primary rated voltage): ولتاژ بیشینهٔ اولیه:**

3.6, 7.2, 24, 36, 72.5, 123, 145, 245, 420, 525, 765, … (kV)

❖ **ولتاژ نامی ثانویه (Secondary rated voltage):**

$$230-220-115-110-100$$
$$230/\sqrt{3}-220/\sqrt{3}-115/\sqrt{3}-110/\sqrt{3}-100/\sqrt{3}$$

❖ **نسبت تبدیل ولتاژ: ولتاژ اولیه به ثانویه (Kn)**

❖ **بار در ثانویه یا burden: مجموع ادمیتانس متصل به ثانویه است که برحسب اندازه و زاویه بیان می گردد (یا بر حسب مهو و ضریب توان). مقدار نامی burden آن است که از مشخصات مربوط به حدود خطای ترانس بدست می آید. همچنین، این کمیت را می توان برحسب توان ظاهری (VA) و ضریب قدرت نیز بیان کرد:**

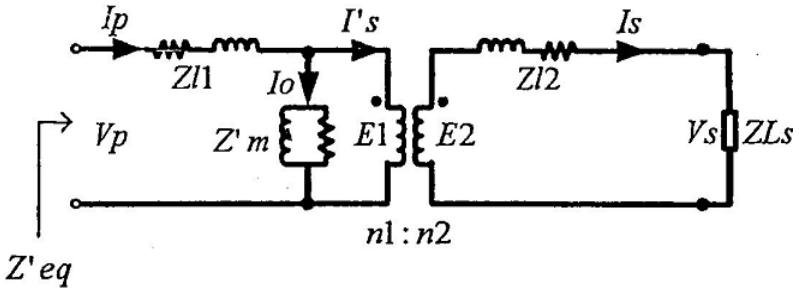
$$S_n = VA_n = Y_n \times V_{sn}{}^2$$

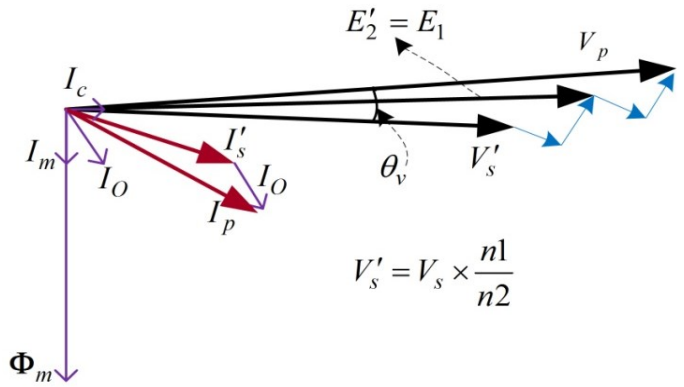
مقادیر استاندارد burden نامی VT(برای یک فاز)، برای ضریب قدرت 0.8 به صورت زیر است:

500-400-300-200-150-100-75-50-30-25-15-10 VA

❖ **خطای ولتاژ یا خطای نسبت تبدیل:**

$$\%Fv = \frac{Vp - Vs \times Kn}{Vp} \times \%100$$





پارامترهای مهم در VT

❖ **خطای جابجایی فاز:** اختلاف فاز بین ولتاژ ثانویه و ولتاژ اولیه یا [redacted] (در حالت ایده آل باید صفر باشد)

✓ خطای نسبت تبدیل ناشی از جریان بی باری و همچنین ناشی از مقاومت و راکتانس نشتی ثانویه است (پس با کاهش جریان های بی باری و ثانویه کاهش می یابد). بنابراین، VTها برای جریان ثانویه کم طراحی می شوند. در عمل، طول هسته کوتاه، سطح مقطع هادی ها بزرگ و تا حد ممکن سیم پیچ های اولیه و ثانویه به هم نزدیکند.

❖ **ضریب ولتاژ نامی:** نسبت ماکزیمم ولتاژ قابل تحمل به ولتاژ نامی اولیه که VT تحت آن دقت خود را می تواند حفظ کند. در واقع، تعیین کنندهٔ میزان اضافه ولتاژی است که VT تحت آن درست عمل می کند. این ضریب به مدت زمان اضافه ولتاژ نیز بستگی دارد که مقادیر نمونه آن عبارتند از:

✓ 1.1 برای اضافه ولتاژ دائمی؛
✓ 1.5 برای اضافه ولتاژ به مدت 60 ثانیه؛
✓ 1.9 برای اضافه ولتاژ به مدت 30 ثانیه؛

❖ **کلاس دقت:** VTها نیز همانند CTها برحسب محدودهٔ خطای ترانس و میزان دقت آن در گروه های مختلف دسته بندی می شوند:

✓ کلاس دقت اندازه گیری
✓ کلاس دقت حفاظتی

کلاس دقت VT

کلاس دقت های VT برای مقاصد اندازه گیری (طبق استاندارد IEC 60044-2):

خطای فاز مثبت یا منفی		درصد خطای نسبت تبدیل (±)	کلاس
دقیقه	سانتی رادیان		
۵	۰/۱۵	۰/۱	۰/۱
۱۰	۰/۳	۰/۲	۰/۲
۲۰	۰/۶	۰/۵	۰/۵
۴۰	۱/۲	۱	۱
تعیین نشده	تعیین نشده	۳	۳

- عموماً در پست‌های فشار قوی ایران از کلاس دقت 0.5 برای اهداف اندازه‌گیری استفاده می شود. سیم‌پیچی که برای مقاصد اندازه‌گیری استفاده می‌شود باید در بازهٔ ولتاژی ۸۰ تا ۱۲۰ درصد ولتاژ نامی دقت خود را حفظ کند.

کلاس دقت های VT برای مقاصد حفاظتی (طبق استاندارد IEC 60044-2):

خطای فاز مثبت یا منفی		درصد خطای نسبت تبدیل (±)	کلاس
دقیقه	سانتی رادیان		
۱۲۰	۳/۵	۳	۳P
۲۴۰	۷	۶	۶P

- عموماً در پست‌های فشار قوی ایران از کلاس دقت 3P برای اهداف حفاظت استفاده می شود.
- سیم پیچ حفاظتی باید در بازهٔ 5% ولتاژ نامی تا ماکزیمم ولتاژ قابل تحمل VT، دقت نامی خود را حفظ کند. در 2% ولتاژ نامی، خطای VT نباید از دو برابر خطاهای جدول فوق بیشتر شود.

کلاس دقت VT

❖ نمونه ای از مشخصات VT:

230KV CVTS

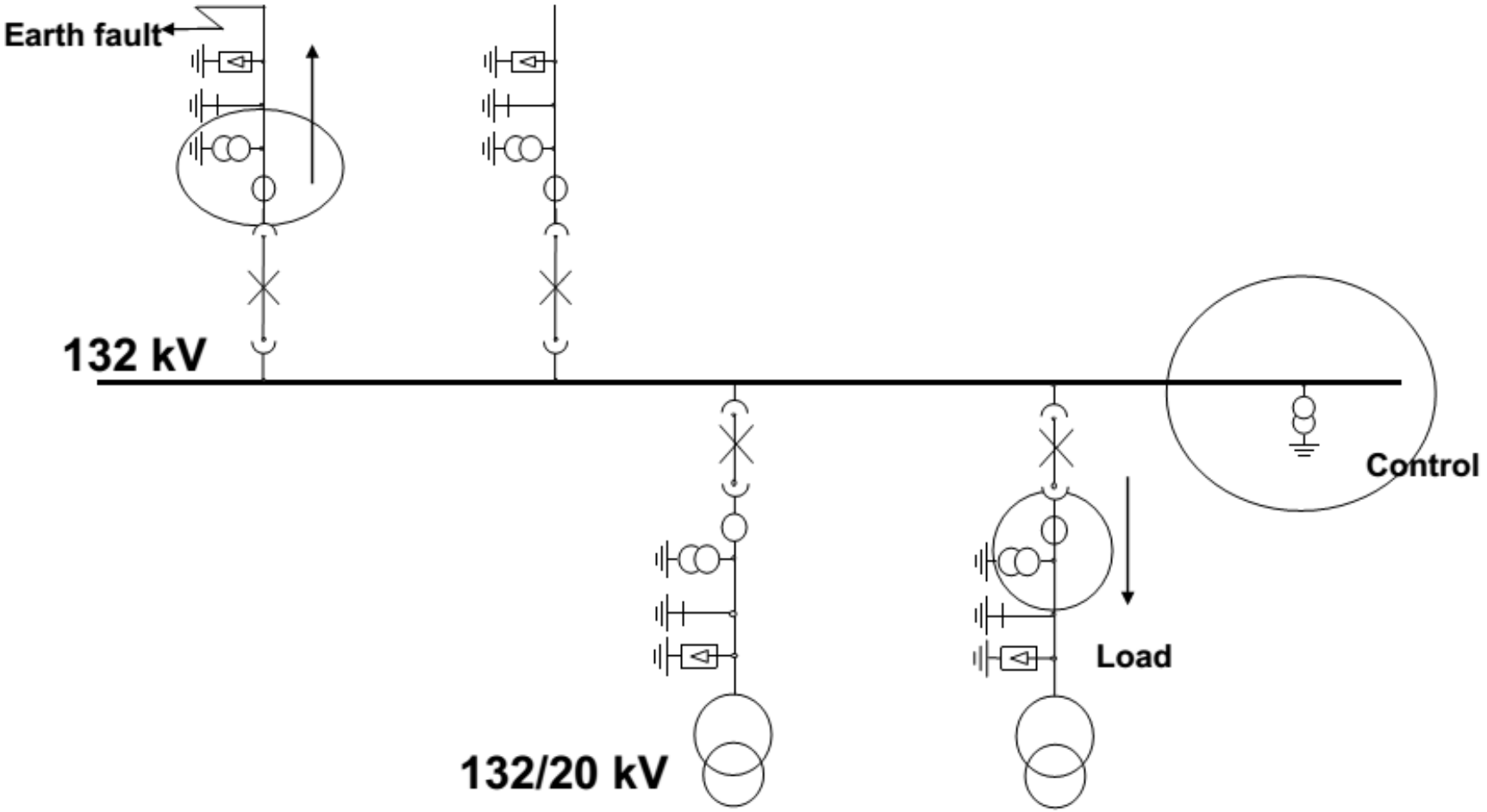
DELLE ALSTHOM	HAEFELY
$230000/\sqrt{3}$ V.	$245KV/\sqrt{3}$ (MAX)
$100/\sqrt{3}$ V.	$100/\sqrt{3}$ V
CL:0.5	CL:3P
MAX.VA 750	TOTAL BURDEN 300VA

❖ کاربرد VTها با توجه به کلاس دقت:

کاربرد	کلاس دقت
تست در آزمایشگاه های استاندارد	0.1 و کمتر
سطوح فشار قوی (اندازه گیری ولتاژ و انرژی)	0.2-0.5
اندازه گیری های صنعتی	0.2-1
ولتمترها	1

نکات دیگر در VTها

- با توجه به اینکه حداکثر جریان عبوری از CT ممکن است در آینده و با توسعه شبکه افزایش یابد، لذا از چندین تپ استفاده می شود؛ ولی در ترانس ولتاژ لزومی به استفاده از تپ نمی باشد.
- برخلاف ترانسهای جریان، باز شدن مدار ثانویه بلامانع است و لذا از فیوز یا MCB بعد از سیم پیچ ثانویه به منظور حفاظت اتصال کوتاه در مدارثانویه استفاده می شود. گاهی برای این منظور و نیز حفاظت در برابر خطای داخل ترانس ولتاژ فشار متوسط از فیوز در سمت اولیه نیز استفاده می شود.
- ترمینال های ثانویه در VT با حروف کوچک a,b,c,n و ترمینالهای قدرت با حروف بزرگ A,B,C,N مشخص می شوند. اگر ثانویه دارای چند تپ باشد، با یک رقم در سمت راست حروف و چنانچه ترانس دارای چند ثانویه (کر) باشد، با یک عدد سمت چپ حروف نمایش داده می شود.
- فرورزنانس در ترانسهای ولتاژ به دلیل وجود سلف ترانس (به ویژه سلف مغناطیسی هسته آهنی) و خازنهای موازی خط انتقال و به ویژه خازن های ترانس ولتاژ خازنی محتمل است که معمولا فرکانس نوسانات کمتر از مقدار نامی داشته و باعث ایجاد اضافه ولتاژ در مدار ثانویه VT، اشباع هسته آهنی VT و اختلال در عملکرد لوازم حفاظتی می شود. بنابراین، معمولا از FSC (Ferroresonance Suppression Circuit) در ثانویه ترانس ولتاژاستفاده می شود.
- احتمال رخداد فرورزنانس در ترانس های ولتاژ مغناطیسی (PT) در شبکه های با نوترال ایزوله یا زمین شده بطور غیر موثر (نظیر نیروگاهها) زیاد بوده و باید یک مقاومت میرا کننده با اندازه و توان مناسب به مدار مثلث باز سیم پیچ ثانویه ترانس ولتاژ متصل نمود.


Earth fault
132 kV
Control
Load
132/20 kV

آزمون های VTها

- علاوه بر آزمون های شرکت سازنده، پس از نصب VTدر پست (قبل از بهره برداری و گاهی پس از بهره برداری) نیز باید آزمون هایی روی آن انجام شود:

✓ آزمون عایقی توسط مگر (مقاومت عایق بین اولیه و زمین یا بدنه، مقاومت بین اولیه و ثانویه ها، ثانویه ها با یکدیگر، ثانویه و زمین)؛

✓ آزمون نسبت تبدیل توسط منبع ولتاژ متغیر در اولیه و اندازه گیری ولتاژ در ثانویه ترانس؛

✓ آزمون پلاریته توسط یک منبع ولتاژ DC (باتری): منبع با یک کلید به اولیه وصل می شود و در ثانویه یک گالوانومتر DC قرار می گیرد تا پلاریته ها تعیین گردند.