فصل دوم

ترانسفورماتور های جریان و ولتاژ

❖ چرا از ترانس های ولتاژ و جریان استفاده می کنیم؟

در صنعت برق برای دو منظور اندازه گیری و حفاظت نیاز به میزان پارامترهای ولتاژ و جریان هستیم ولی از آنجا که این مقادیر اعداد بزرگی می باشند لذا دسترسی به آنها نه عملی بوده و نه از لحاظ اقتصادی مقرون به صرفه است پس ناگزیر به استفاده از ترانسهای جریان وولتاژ می باشیم تا این مقادیر را به مقادیر کوچکتری که کسری از مقادیر واقعی می باشند تبدیل نماییم. در واقع این تجهیزات نمونه کوچک شده ، با درصد خطایی بسیار کم از ولتاژ و جریان طرف اولیه هستند و چون تمامی دستگاه های اندازه گیری همچون آمپرمتر، ولتمتر، وارمتر و.....و نیز رله های حفاظتی بر اساس میزان جریان و ولتاژ ثانویه این تجهیزات ساخته می شوند لذا می توان به کمک این ترانسها به اهداف حفاظت و اندازه گیری دست یافت.

نمونه های از ترانسفورماتور جریان

❑ ترانسفورماتور جریان
(C.T) Current Transformer

❑ ترانسفورماتور جریان
(C.T) Current Transformer

❖ وظایف CT:

- ✓ کاهش جریان به میزان مناسب برای وسایل اندازه گیری و حفاظتی
- ✓ ایجاد ایزولاسیون بین مدارات فشارقوی و فشار ضعیف

❖ انواع CTها از نظر کاربرد:

- ✓ اندازه گیری (دقت بالا تا ۱۲۰ ٪ جریان نامی)
- ✓ حفاظتی (دقت مناسب در جریانهای خطا)

❖ انواع CTها از نظر ساختار فیزیکی:

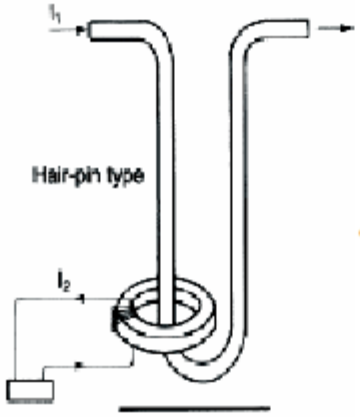
- ✓ هسته بالا(Top Core)
- ✓ هسته پایین(Bottom Core)

❑ ترانسفورماتور جریان
(C.T) Current Transformer

ترانس جریان هسته پایین

مزایای عمومی ترانسفورماتورهای جریان هسته پائین:

- ✓ مقاومت زیاد در برابر زلزله
- ✓ استفاده از هسته های سنگین بدون تحمیل فشار بر روی مقره
- ✓ پایین 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 پایین:

- ✓ محدودیت جریان اولیه بعلت طول زیاد اولیه که باعث تلفات حرارتی زیاد و محدویت در قدرت تحمل اتصال کوتاه می شود.
- ✓ محدودیت جریان دینامیک اولیه
- ✓ محاسبه میدانهای مغناطیسی هسته در طراحی

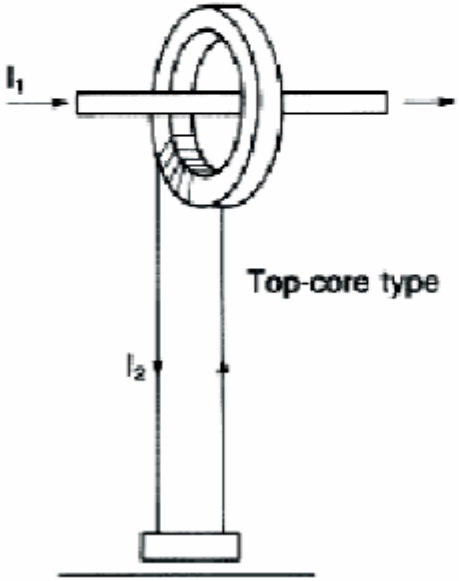
❑ ترانسفورماتور جریان
(C.T) Current Transformer

ترانسفورماتورهای جریان هسته بالا

مزایای عمومی ترانسهای جریان هسته بالا :

تلفات حرارتی کم بعلت کوتاه بودن هادی اولیه

- ✓ قدرت تحمل اتصال کوتاه بالا
- ✓ اقتصادی بودن در سطح ولتاژ های بالا تر از ۳۳۰ کیلو ولت



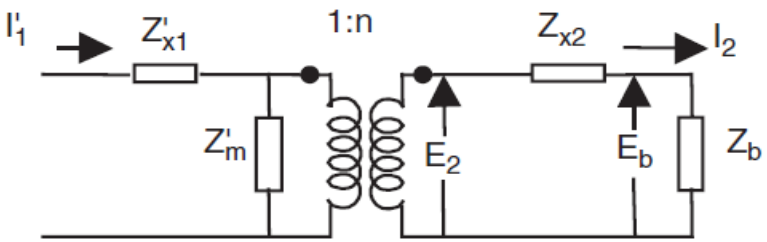
محدودیتها :

- ✓ مرکز ثقل بالا
- ✓ تحمیل فشار به مقره به خاطر بالا بودن هسته ها
- ✓ محدود شدن حجم هسته بعلت محدود بودن فضای هسته ها
- ✓ دشواری خنک کردن سیم پیچ ثانویه بدلیل محصور شدن در کاغذ عایقی
- ✓ پایداری نسبتا کم از نقطه نظر مکانیکی

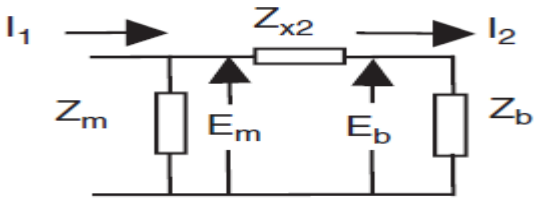
❑ ترانسفورماتور جریان
(C.T) Current Transformer

❖ مدار معادل ترانسفورماتور جریان در حالت مانا

ترانسفورماتور جریان به صورت سری در شبکه قرار می گیرد.(در واقع دو سر اولیه آن در مدار شبکه قرار می گیرد.)



CT equivalent circuit



The simplified equivalent circuit

$$I_1 = \frac{I_1'}{n}$$

$$Z_m = n^2 Z_m'$$

turns ratio $(l : n)$

Z_b امپدانس بردن(Burden)

I_1' جریان سیم پیچ اولیه

I_1 جریان سیم پیچ ثاویه

Z_{x1}' امپدانس نشتی سیم پیچ اولیه

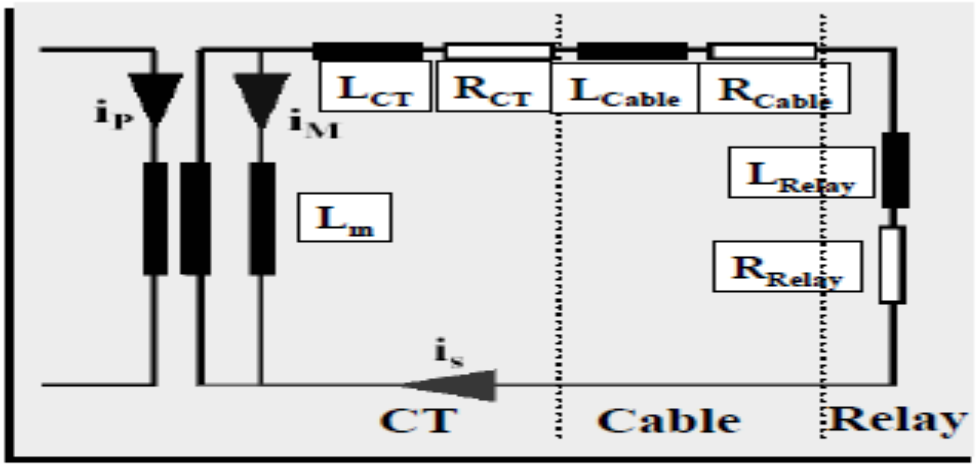
Z_m امپدانس نشتی امپدانس مغناطیس کنندگی

خروجی C.T ها معمولا به صورت استاندارد ۱یا۵آمپر است.

❑ ترانسفورماتور جریان
(C.T) Current Transformer

❖ امپدانس **Zb** شامل امپدانس کلیه تجهیزات حفاظتی،اندازه گیری و کنترلی است که به ثانویه **CT** اتصال دارند.این امپدانس،امپدانس کابلی که بین ثانویه **CT** در محوطه پست تا محل استقرار تجهیزات کشیده شده را هم شامل می شود. که با آن امپدانس بردن(**Burden**)می گویند.

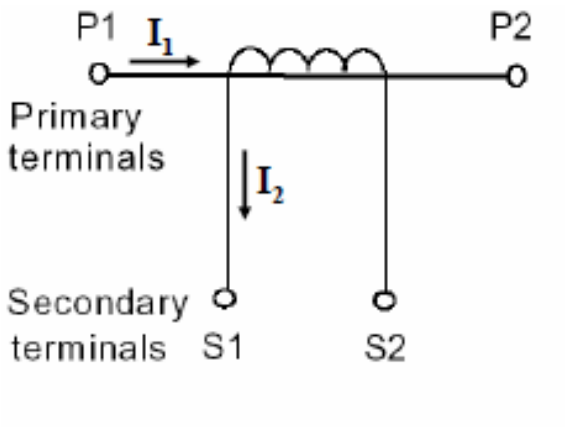
مدار معادل **CT** و ولتاژ ثانویه

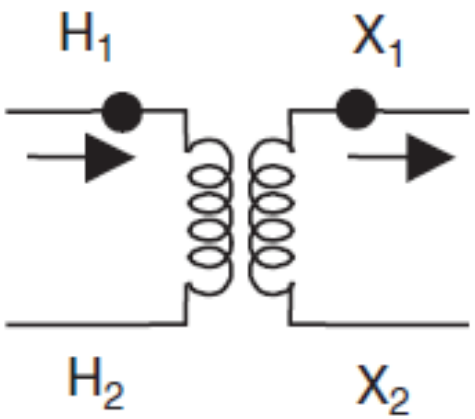


$$E_2 = I_2(Z_{CT} + \underbrace{Z_{Cable} + Z_{Relay}}_{Z_{Burden}})$$

❑ ترانسفورماتور جریان
(C.T) Current Transformer

نام گذاری ترمینال های CT

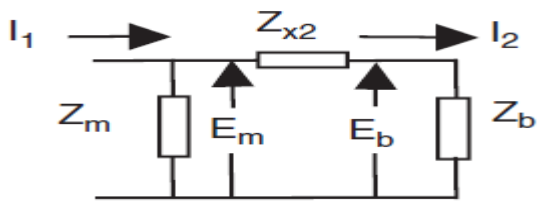




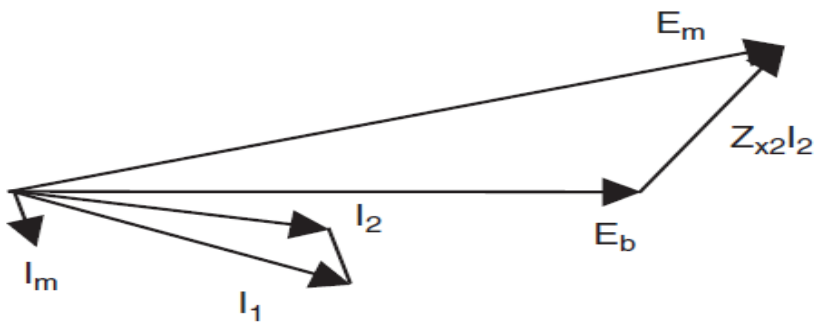
Polarity markings of a CT

❑ ترانسفورماتور جریان
(C.T) Current Transformer

❖ روابط حاکم در مدار معادل انتقالی ترانسفورماتور جریان در حالت مانا



The simplified equivalent circuit



CT phasor diagram

$$E_m = E_b + Z_{x2} I_2$$

$$I_m = \frac{E_m}{Z_m}$$ جریان شاخه مغناطیس کنندگی

$$I_1 = I_2 + I_m$$

خطای C.T $$\varepsilon = \frac{I_1 - I_2}{I_1} = \frac{I_m}{I_1}$$

فاکتور اصلاح نسبت تبدیل C.T $$R = \frac{1}{1-\varepsilon}$$

❑ ترانسفورماتور جریان
(C.T) Current Transformer

مثال

Consider a current transformer with a turns ratio of 500 : 5, a secondary leakage impedance of (0.01 + j0.1) Ω and a resistive burden of 2.0 Ω. If the magnetizing impedance is (4.0 + j15) Ω, then for a primary current (referred to the secondary) of I_l

$$E_m = \frac{I_1(0.01 + j0.1 + 2.0)(4.0 + j15.0)}{(0.01 + j0.1 + 2.0 + 4.0 + j15.0)} = I_1 \times 1.922\angle 9.62^\circ$$

$$I_m = \frac{I_1 \times 1.922\angle 9.62^\circ}{(4.0 + j15.0)} = I_1 \times 0.1238\angle -65.45^\circ \qquad \varepsilon = \frac{I_m}{I_1} = 0.1238\angle -65.45^\circ$$

❖ فاکتور اصلاح به ازای مقادیر مختلف امپدانس بردن

$$R = \frac{1}{(1.0 - 0.1238\angle -65.45^\circ)} = 1.0468\angle -6.79^\circ \quad \text{for } Z_b = 2 \text{ ohms}$$

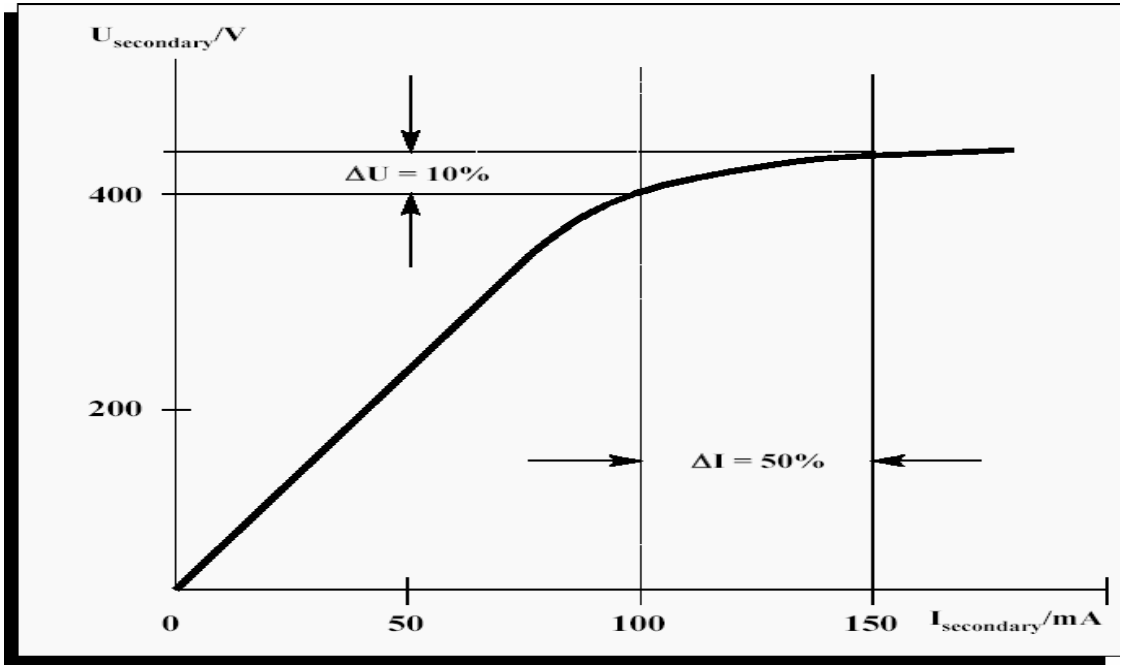
$$R = 1.025\angle -3.44^\circ \quad \text{for } Z_b = 1 \text{ ohm} \qquad R = 1.13\angle 1.73^\circ \quad \text{for } Z_b = j2 \text{ ohms}$$

❑ ترانسفورماتور جریان
(C.T) Current Transformer

اشباع ترانسفورماتور جریان

ترانسفورماتور جریان بدلیل وجود شاخه مغناطیس کنندگی و هسته در جریان های بالا به اشباع می رود.

Definition of the knee-point voltage, according to British Standard BS

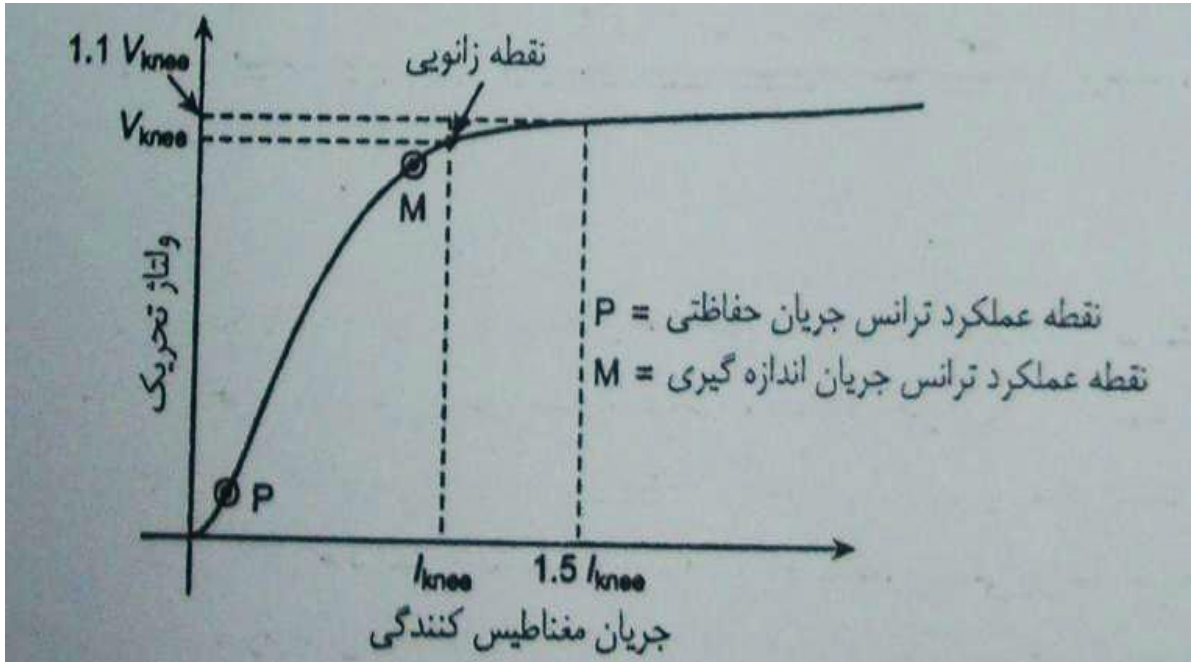


Knee-point voltage is the voltage in which a 10% increase of the voltage causes a 50% increase of the magnetizing current

❑ ترانسفورماتور جریان
(C.T) Current Transformer

اشباع ترانسفورماتور جریان

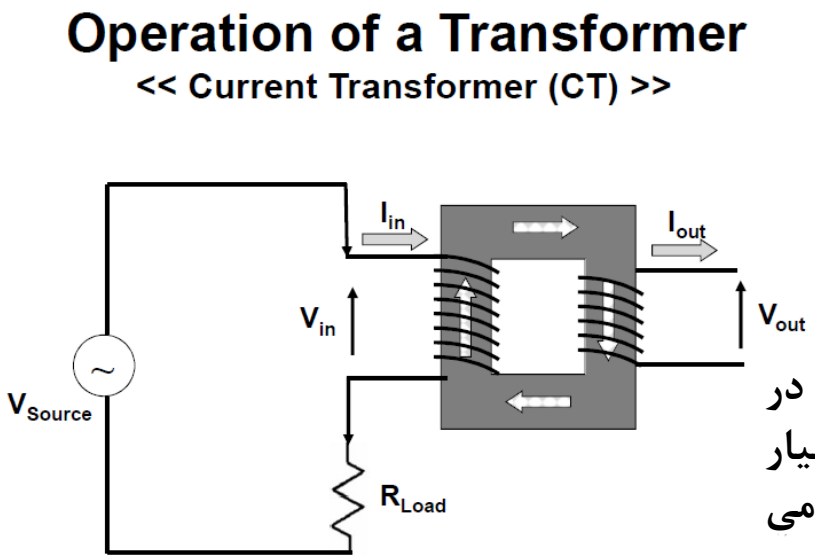
مقایسه نقطه عملکرد ترانس جریان حفاظتی و اندازه گیری



❑ ترانسفورماتور جریان
(C.T) Current Transformer

نکته

می توان CT را از سمت ثانویه آن بصورت یک منبع جریان مدلسازی نمود. لذا بایستی 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 خطای CT بخش بسیار کوچکی از آن از راکتانس مغناطیسی ، شاخه موازی عبور می کند.
- 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. (شکست عایقی electro-thermal)
- اضافه ولتاژ های سوزنی شکل در ثانویه CT بوجود می آید که برای تجهیزات سمت فشار ضعیف،پرسنلی که در حین کار بر روی آن ها هستند و خود CT خطرناک است.

❑ ترانسفورماتور جریان
(C.T) Current Transformer

کمیات مهم ترانسفورماتورهای جریان حفاظتی

✓ **Primary rated current** :

جریان نامی اولیه و بزرگترین تپ CT. استاندارد IEC185 اعداد زیر یا ضریب ۱۰ یا ۰.۱ آنها را پیشنهاد نموده است:

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

✓ **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.

✓ **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.

❑ ترانسفورماتور جریان
(C.T) Current Transformer

✓ **Current Error (Transformation Ratio Error or Mismatch Error)** :

خطای اندازه گیری ترانسفورماتور جریان (خطای دامنه جریان) از رابطه زیر محاسبه می شود:

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

K_n : نسبت تبدیل ترانس جریان

I_P : جریان واقعی عبوری از اولیه

I_S : جریان ثانویه اندازه گیری شده

✓ **Phase displacement** :

انحراف زاویه فاز جریان ثانویه اندازه گیری شده نسبت به جریان اولیه

❑ ترانسفورماتور جریان
(C.T) Current Transformer

کمیات مهم ترانسفورماتورهای جریان اندازه گیری

- **Rated Instrument Limit Primary Current (IPL)**

(حد نامی جریان اولیه تجهیزات) :

حداقل جریان اولیه که در آن خطای مرکب ترانس جریان در **burden** نامی بزرگتر یا مساوی ۱۰٪ باشد.

- **Instrument Security Factor (FS)**

(ضریب ایمنی تجهیزات):

نسبت حد نامی جریان اولیه به جریان نامی اولیه را ضریب ایمنی گویند. هر چه این ضریب کمتر باشد، جریان ثانویه در اثر عبور جریان اتصال کوتاه از اولیه بیشتر محدود شده و لذا تجهیزات متصل به ثانویه CT در شرایط اتصال کوتاه سیستم ایمنی بیشتری دارند. این ضریب معمولا ۵ یا ۱۰ انتخاب می شود.

کلاس دقت ترانسفورماتور جریان

TP current transformer classes (Transient Performance Requirements)

Class TPS:

Closed iron core with very low leakage reactance
Its transformation response is defined by the magnetising curve (knee- point voltage, magnetising current) and the secondary winding resistance.
This configuration corresponds to the Class X according to British Standard BS3938 (1973). It is provided for the differential protection.

❑ ترانسفورماتور جریان
(C.T) Current Transformer

کلاس دقت ترانسفورماتور جریان

Class TPX:

Closed iron core without limitation of the remanence The construction of these CTs is the same as the Class P CTs according to EEC 60044-1. TPX additionally specifies the transient response.

Class TPY:

CT with anti-remanence air-gap (Remonence <= 10%)

Apart from this, the response is as with TPX.

❑ ترانسفورماتور جریان
(C.T) Current Transformer

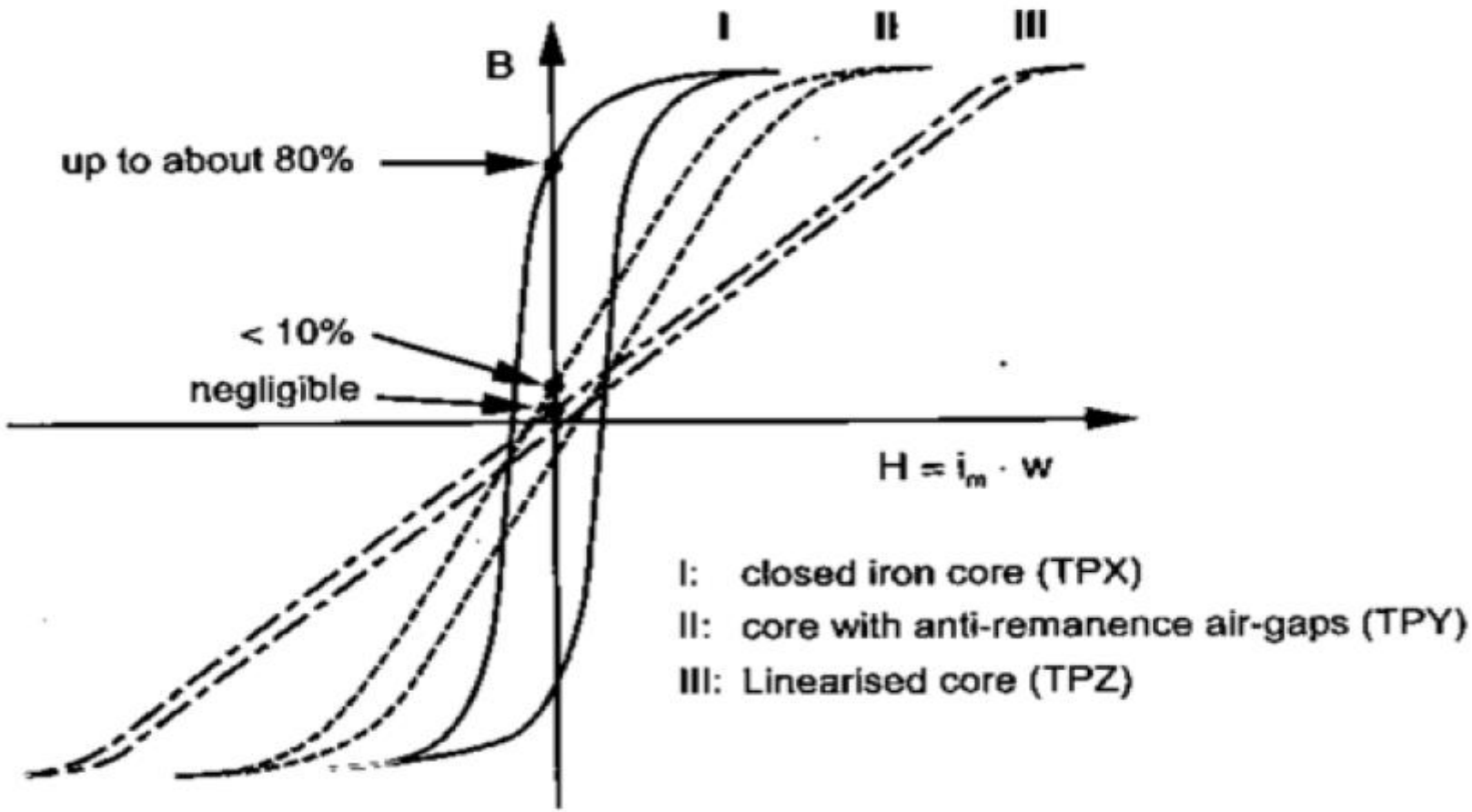
کلاس دقت ترانسفورماتور جریان

Class TPZ:

CT with linear core (Remanence negligible)
The indicated transformation accuracy only applies to the AC-current component.

❑ ترانسفورماتور جریان
(C.T) Current Transformer

مقایسه کلاس دقت ترانسفورماتور جریان



مشخصه های CTهای حفاظتی با کلاس P

- **جریان نامی حد دقت اولیه :**

حداکثر جریان اولیه ای که به ازاء آن CT نوع حفاظتی کلاس دقت خود را حفظ می کند که بجای آن معمولا از ALF استفاده می شود.

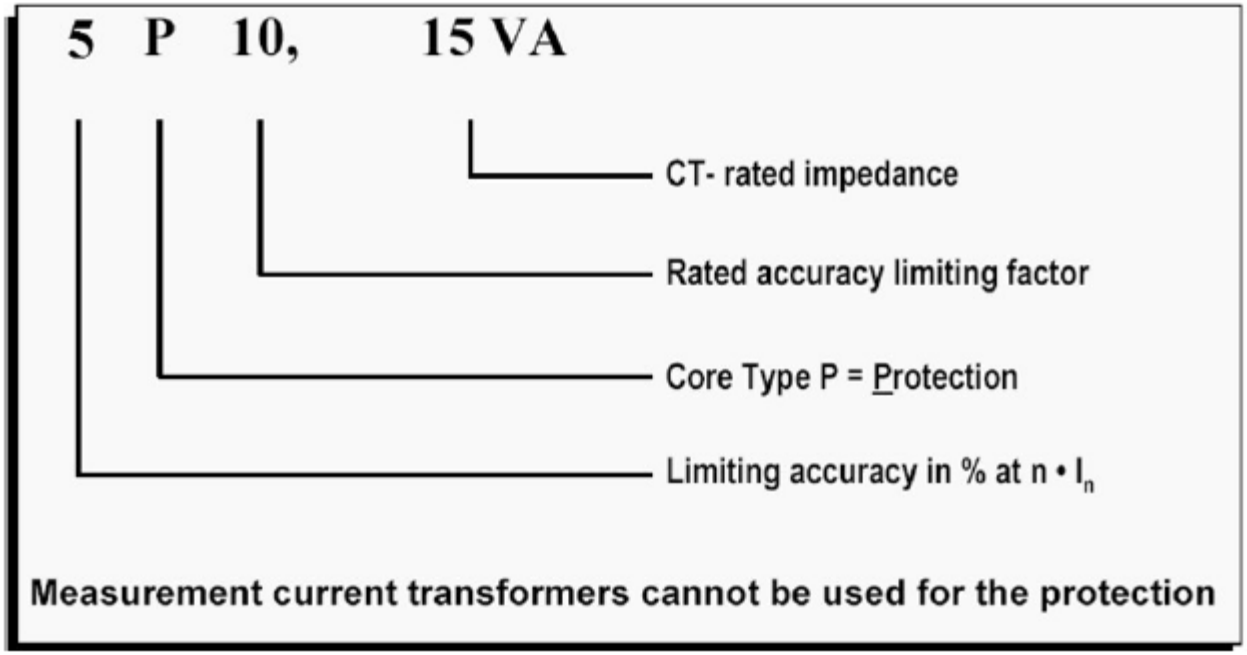
- **ضریب حد دقت (ALF: Accuracy Limit Factor)**

نسبت جریان نامی حد دقت اولیه به جریان نامی اولیه را ضریب حد دقت می نامند و طبق استاندارد می تواند ۵، ۱۰، ۱۵، ۲۰ و یا ۳۰ انتخاب شود.

- **کلاس دقت:**

کلاس دقت در CT های کلاس P مقادیر ۵ یا ۱۰ بوده و بصورت 5P یا 10P نشان داده می شود و معادل خطای مرکب CT در حالت عبور جریان نامی حد دقت اولیه می باشد.

مشخصات هسته حفاظتی کلاس P مطابق استاندارد IEC



در اثر عبور جریان ۱۰ برابر مقدار نامی از ترانس جریان با **burden** نامی (۱۵ ولت آمپر)، حداکثر خطای مرکب برابر ۵٪ می باشد.

در صورتیکه امپدانس متصل به ثانویه CT برابر Burden نامی نباشد، ضریب حد دقت مطابق رابطه زیر تغییر می کند:

$$ALF' = ALF \frac{R_{CT} + R_{b\,Rated}}{R_{CT} + R_{b\,Real}}$$

$$R_{b\,Rated} = \frac{VA_{Rated}}{I^2_{S\,Rated}}$$

بنابراین اگر burden متصل به ترانس جریان کمتر از مقدار نامی باشد، ضریب حد دقت بالا رفته و اشباع هسته در جریان بزرگتری اتفاق می افتد.

کلاسهای CT حفاظتی که در شبکه ایران بکار رفته اند

- کلاس P مطابق استاندارد IEC (با Burden، ALF و کلاس دقت معرفی می شود.)
  5P20, 30 VA

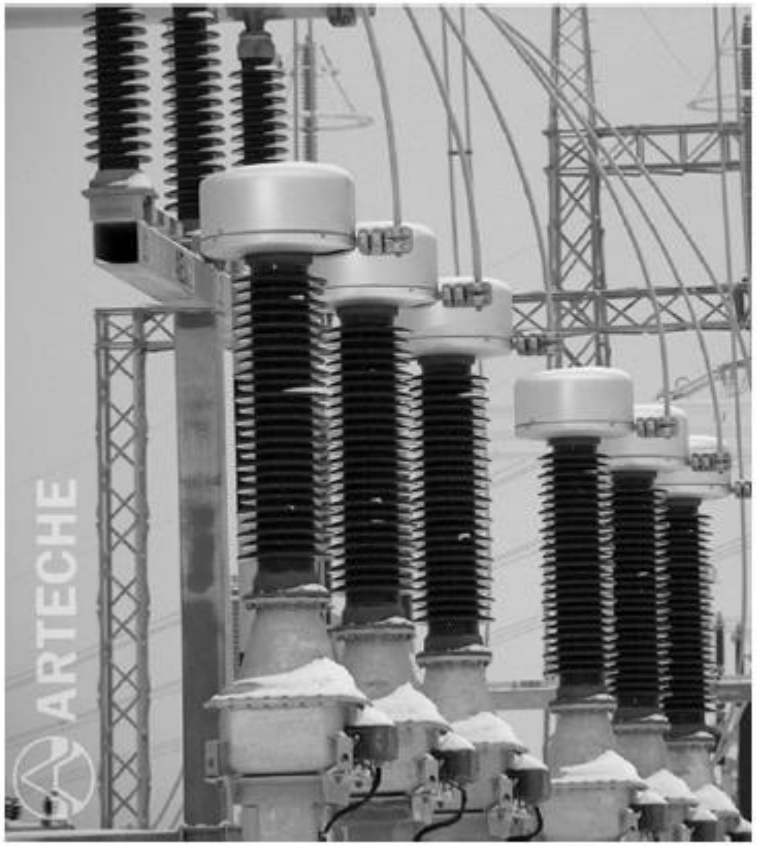
- کلاس X مطابق استاندارد BS (با جریان مغناطیسی و ولتاژ نقطه زانوی اشباع معرفی می شود. بهتر است که حداکثر R_{CT} نیز توسط مشتری داده شود.)
  U_{KP}=500 V, i_m=5 mA

- کلاس TPY مطابق استاندارد IEC (بر اساس شرایط واقعی از قبیل مولفه میرایی جریان خطا و حداکثر burden تعیین می شود.)
  $R_{CT}=2\Omega$, $R_b=3\Omega$, $K_{SSC}=8$, $T_S=0.3$ s, $T_p=100$ms, Duty cycle : C-90ms-O-700-C-15ms-O

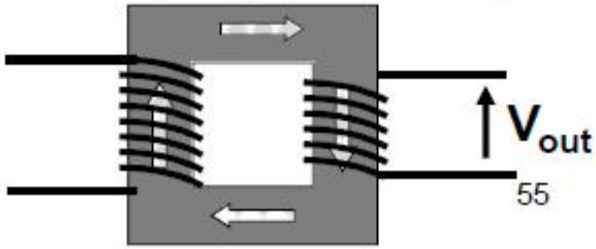
- کلاس B، C و T مطابق استاندارد ANSI

❑ ترانسفورماتور ولتاژ
(V.T) Voltage Transformer

ترانسفورماتور ولتاژ (VTیا PT)
Voltage Transformer



- ولتاژ سیستم به منظور مونیتورینگ وضعیت شبکه، کنترل و حفاظت آن باید اندازه گیری شود.
- اندازه گیری مستقیم ولتاژ بالا جهت به کارگیری 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
(V.T) Voltage Transformer

- ترانسفورماتور ولتاژ معمولا بین فاز و زمین وصل می شود. البته در سطح ولتاژ فشار متوسط استفاده از ترانسفورماتور ولتاژ بین دو فاز متداول تر است. با کمک دو PT بین دو فاز می توان ولتاژهای خطی بین سه فاز را اندازه گیری نمود. (ولتاژ خطی سوم با کم کردن دو ولتاژ خطی اندازه گیری شده، محاسبه می گردد).

- برای داشتن عایق کاری کمتر و نصب راحت تر، در سطح فشار قوی از CVT بین فاز و زمین استفاده می شود.

- در اتاق کنترل یک ولت متر وجود دارد که ولتاژ خروجی PT را اندازه گیری می کند و با توجه به نسبت تبدیل ترانس ولتاژ آن را بصورت ولتاژ شبکه نشان می دهد.

- ترانسفورماتور ولتاژ 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.

❑ ترانسفورماتور ولتاژ
(V.T) Voltage Transformer

- ✓ مدار معادل ترانس ولتاژ مشابه ترانس قدرت است که بصورت موازی در مدار قدرت قرار می گیرد.
- ✓ ساخت این نوع ترانس ها در ولتاژ بالا بسیار گران است.
- ✓ در ولتاژ های بالا از ترانس های ولتاژ خازنی استفاده می شود.

❑ ترانسفورماتور ولتاژ
(V.T) Voltage Transformer

- ولتاژ نامی ثانویه بین دو فاز ۱۰۰، ۱۱۰، ۱۱۵ یا 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 $\sqrt{3}$ است.

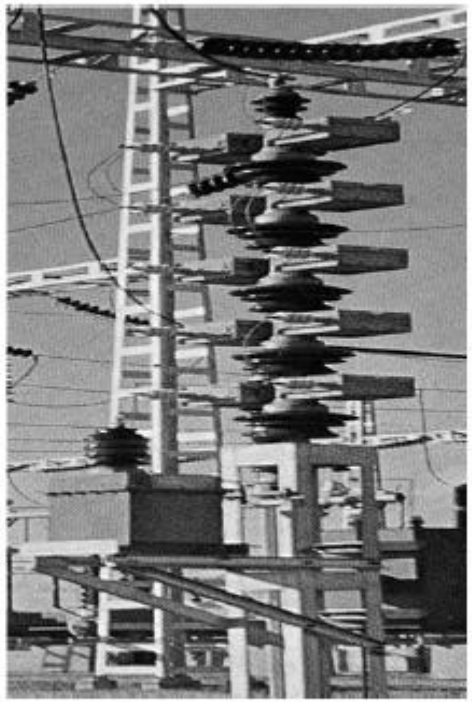
- سرهای ثانویه هر سیم پیچ را با 1a و 1n و همچنین 2a و 2n نمایش می دهند. گاهی از ترمینالهای da و dn نیز استفاده می شود که ولتاژ آن برابر مقادیر فوق تقسیم بر ۳ بوده و جهت ایجاد اتصال مثلث باز و اندازه گیری ولتاژ مولفه صفر(ولتاژ باقیمانده) استفاده می شود.

- 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 ۲۰کیلو ولت تبدیل می کنند و سپس از یک ترانسفورماتور با عایق کاری کم استفاده می شود. به این نوع، ترانسفورماتور ولتاژ خازنی Capacitive Voltage Transformer (CVT) گفته می شود. البته گاهی در ولتاژ ۶۳ کیلوولت نیز از PT بجای CVT استفاده شده است.

❑ ترانسفورماتور ولتاژ
(V.T) Voltage Transformer

ترانسفورماتور ولتاژ خازنی

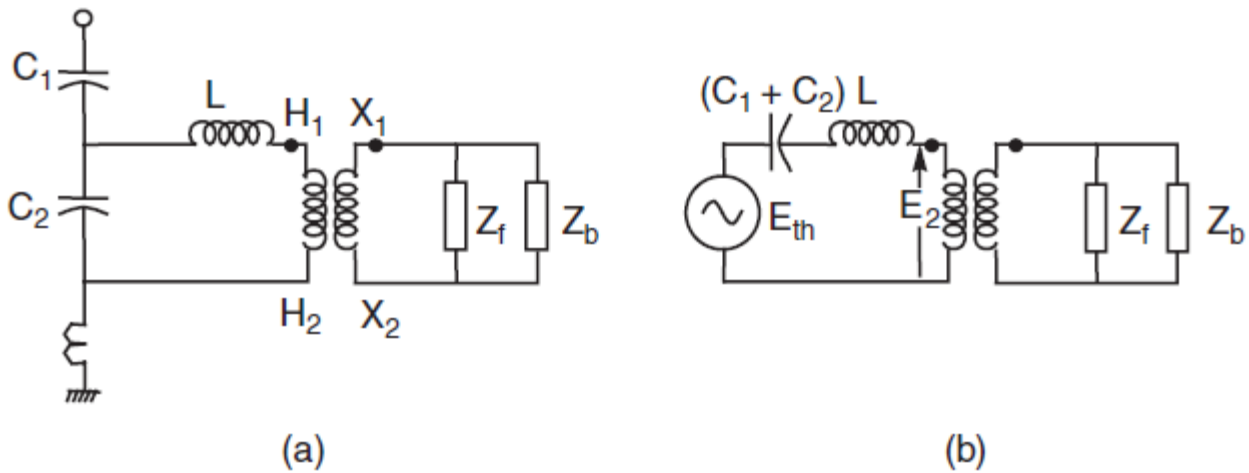
CVT یکپارچه
در پستهای جدید



CVT در پستهای قدیمی

❑ ترانسفورماتور ولتاژ
(V.T) Voltage Transformer

Coupling capacitor voltage transformers



CCVT connections and equivalent circuit

$$Z_{th} = C_1 + C_2$$

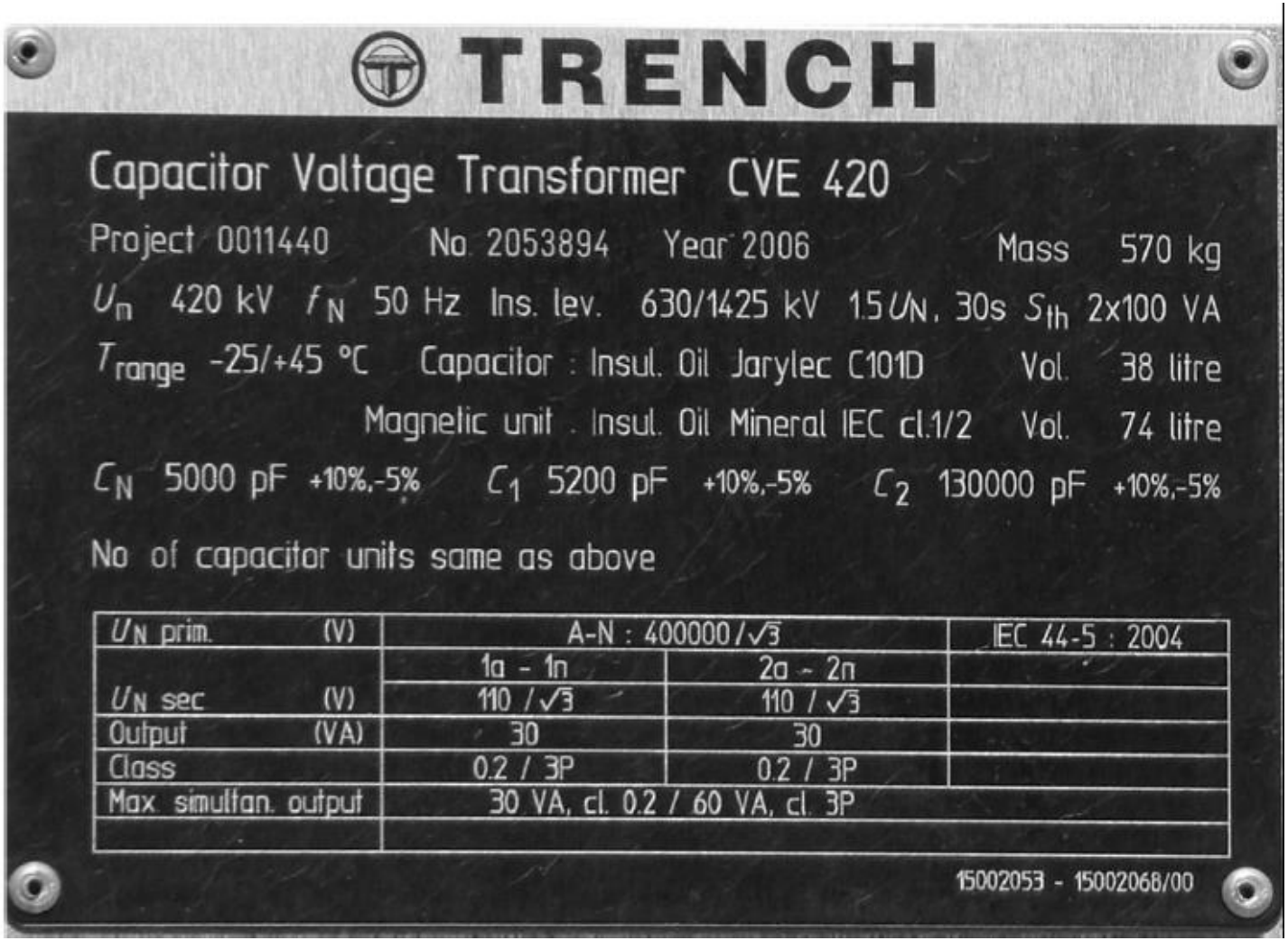
$$E_2 = E_{th} - I_1\left[j\omega L + \frac{1}{j\omega(C_1 + C_2)}\right]$$

$$E_{th} = E_{pri}C_1/(C_1 + C_2)$$

$$L = \frac{1}{\omega^2}\frac{1}{(C_1 + C_2)}$$

❑ ترانسفورماتور ولتاژ
(V.T) Voltage Transformer

اطلاعات پلاک یک ترانسفورماتور ولتاژ



TRENCH

Capacitor Voltage Transformer CVE 420

Project 0011440 No. 2053894 Year 2006 Mass 570 kg

U_n 420 kV f_N 50 Hz Ins. lev. 630/1425 kV 1.5 U_N, 30s S_{th} 2x100 VA

T_{range} -25/+45 °C Capacitor : Insul. Oil Jarylec C101D Vol. 38 litre

Magnetic unit . Insul. Oil Mineral IEC cl.1/2 Vol. 74 litre

C_N 5000 pF +10%,-5% C_1 5200 pF +10%,-5% C_2 130000 pF +10%,-5%

No of capacitor units same as above

U_N prim. (V)	A-N : 400000/√3		IEC 44-5 : 2004
	1a - 1n	2a - 2n	
U_N sec (V)	110 / √3	110 / √3	
Output (VA)	30	30	
Class	0.2 / 3P	0.2 / 3P	
Max. simultan. output	30 VA, cl. 0.2 / 60 VA, cl. 3P		

15002053 - 15002068/00