

کاربردها: 

### Circuit Breakers

تنظیم رله ها (تشخیص اتصال کوتاه)

انتخاب مدار شکن

انتخاب سطح مقطع هادیها و کابلها

طراحی شبکه زمین پستها

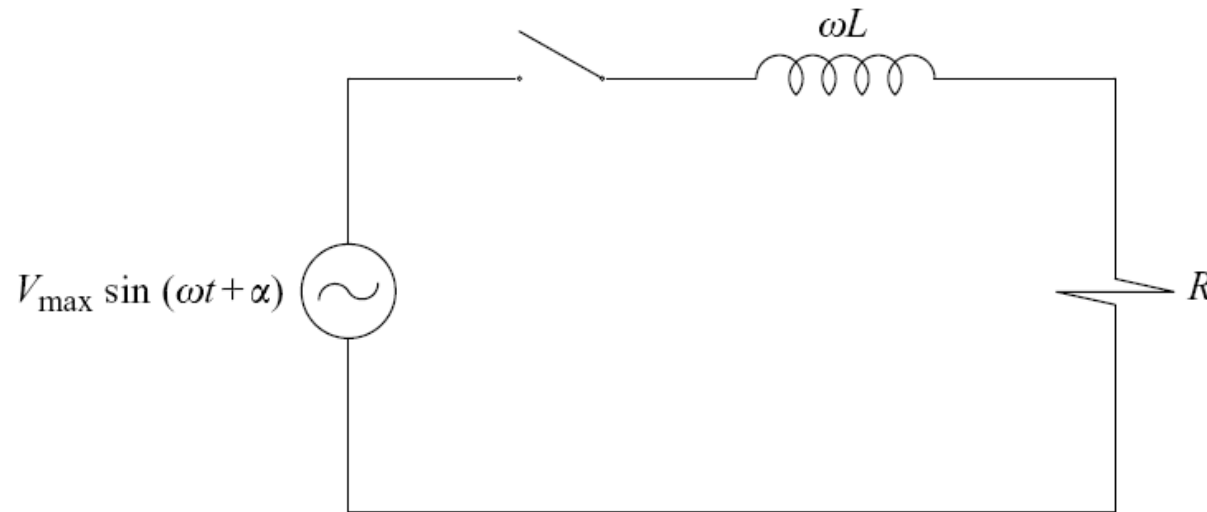




## Typical Short-Circuit Type Distribution

Single-Phase-Ground:	70–80%
Phase-Phase-Ground:	17–10%
Phase-Phase:	10–8%
Three-Phase:	3–2%

## محاسبات اتصال کوتاه



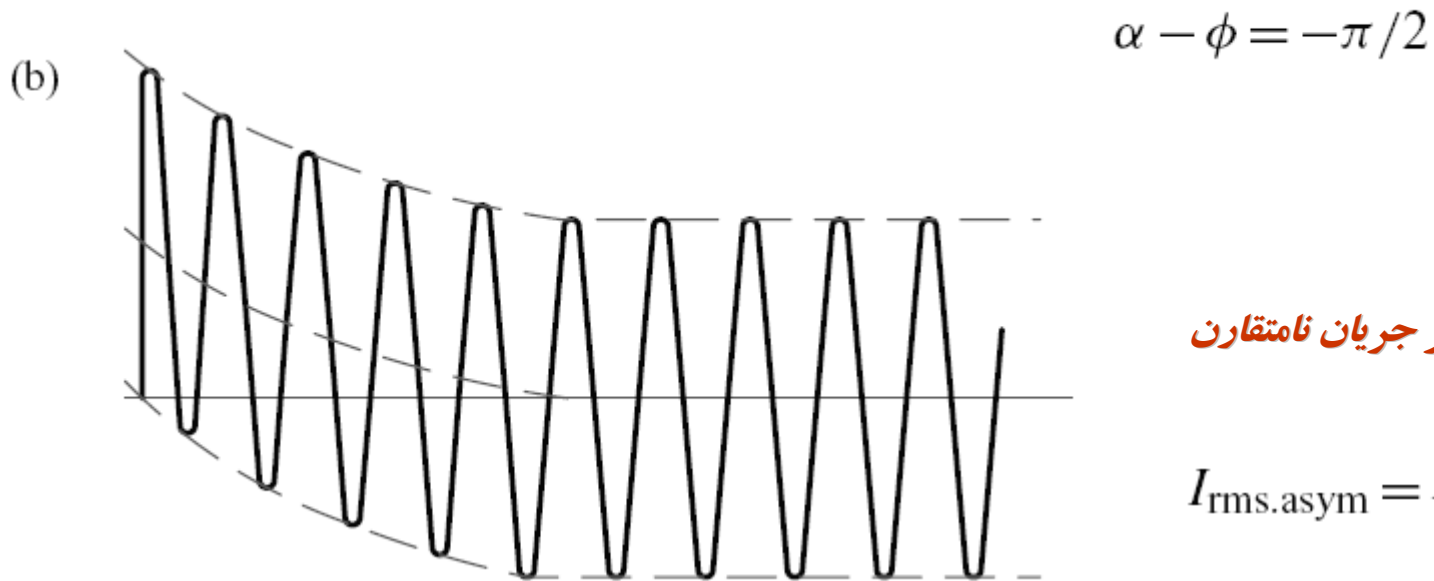
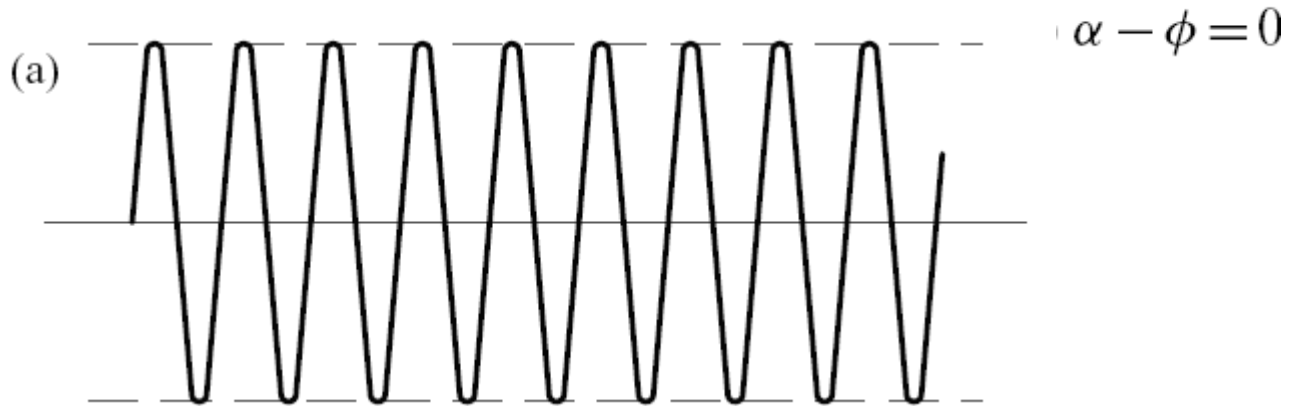
$$e(t) = L \frac{di}{dt} + Ri(t)$$

$$i(t) = \frac{V_{\max}}{Z} \left[ \sin(\omega t + \alpha - \phi) - \sin(\alpha - \phi) e^{-(R/L)t} \right]$$

$$Z = \sqrt{(R^2 + \omega^2 L^2)} \quad \phi = \tan^{-1}(\omega L / R)$$

$\alpha$  = the closing angle

## محاسبات اتصال کوتاه

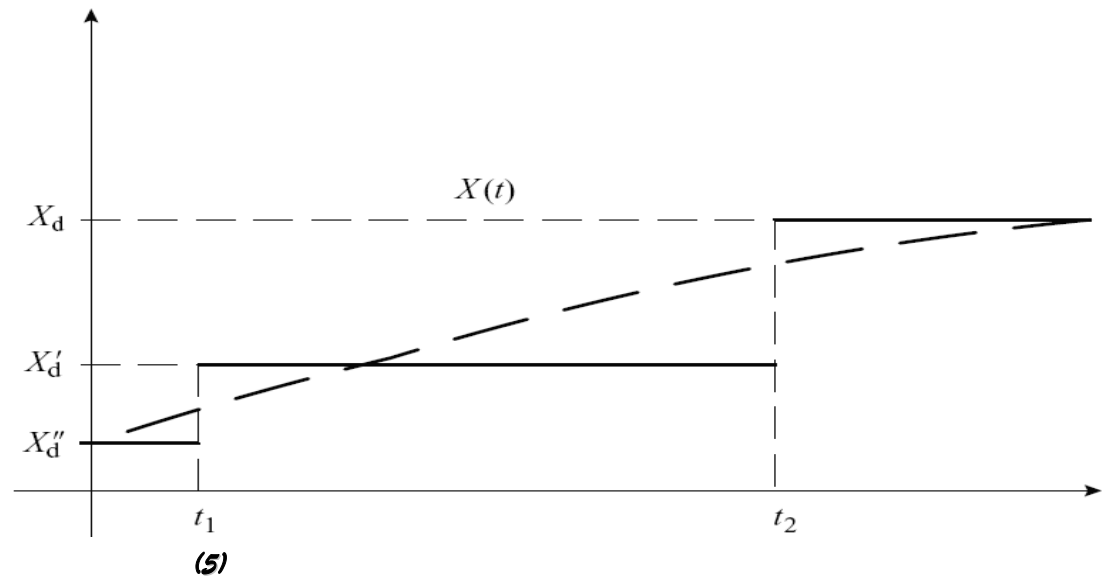
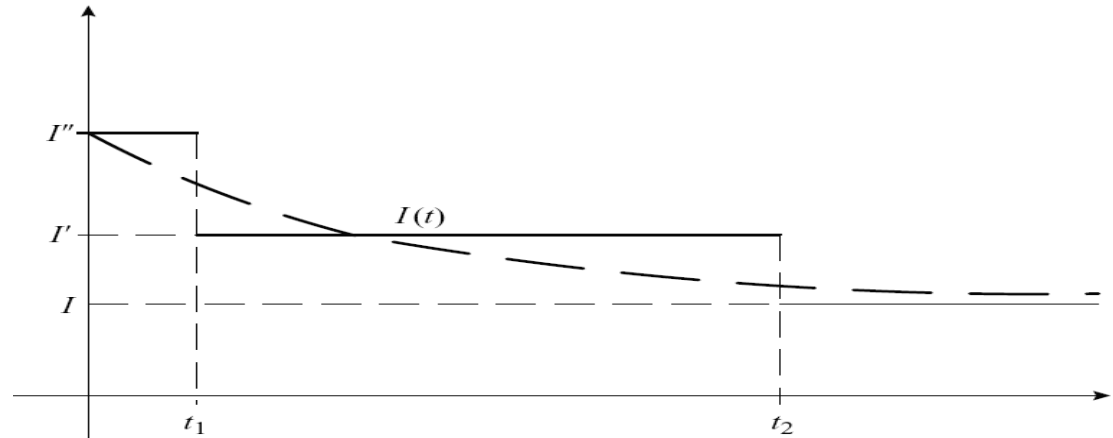
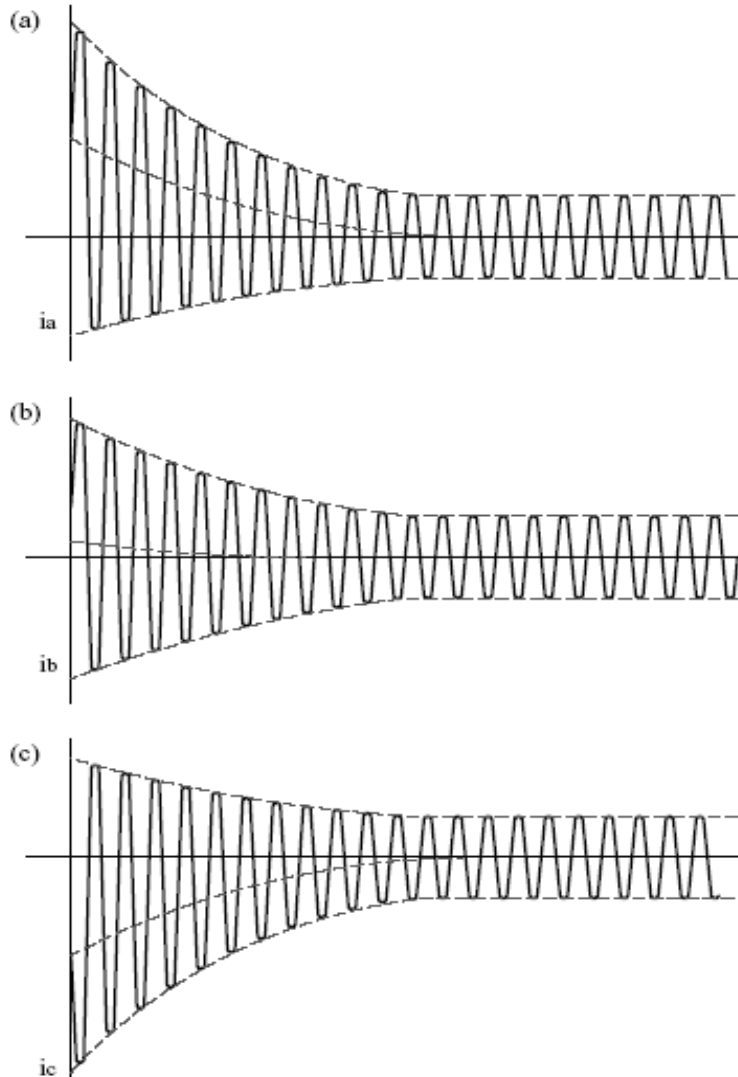


مقدار تقریبی موثر جریان نامتقارن

$$I_{\text{rms.asym}} = \sqrt{I_{\text{rms}}^2 + I_{\text{DC}}^2}$$

## محاسبات اتصال کوتاه

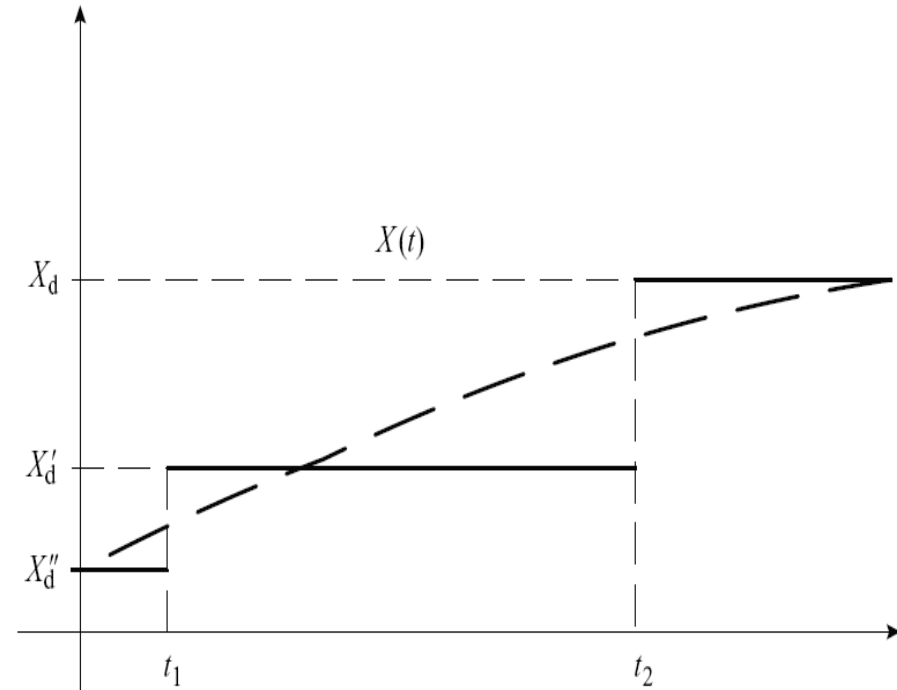
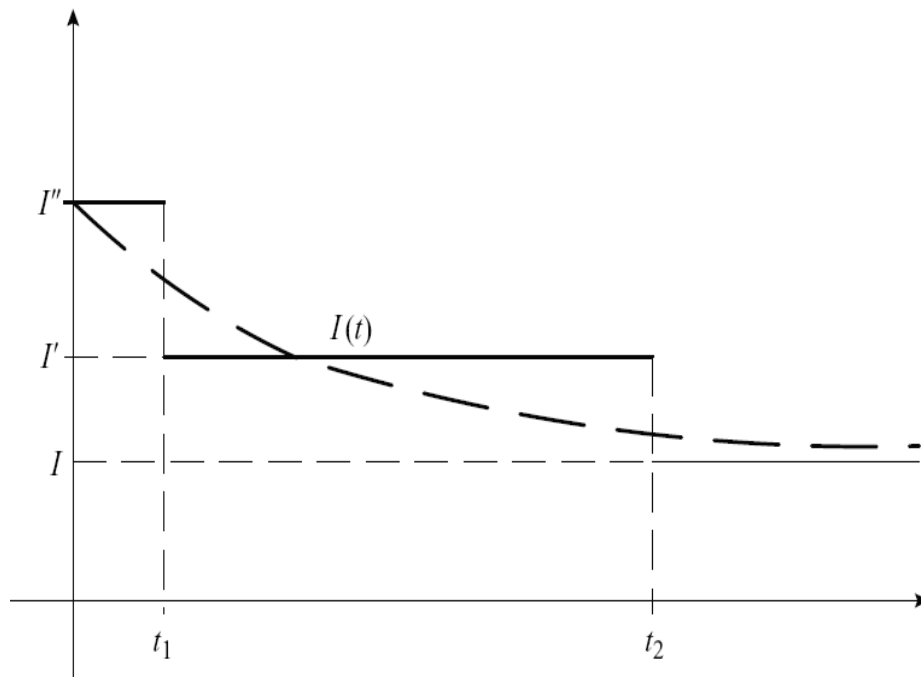
### اثر ژنراتورهای سنکرون بر جریان اتصال کوتاه





## محاسبات اتصال کوتاه

### اثر ژنراتورهای سنکرون بر جریان اتصال کوتاه



جریان زیر گذرا:  $I''$

جریان گذرا:  $I'$

جریان ماندگار:  $I$



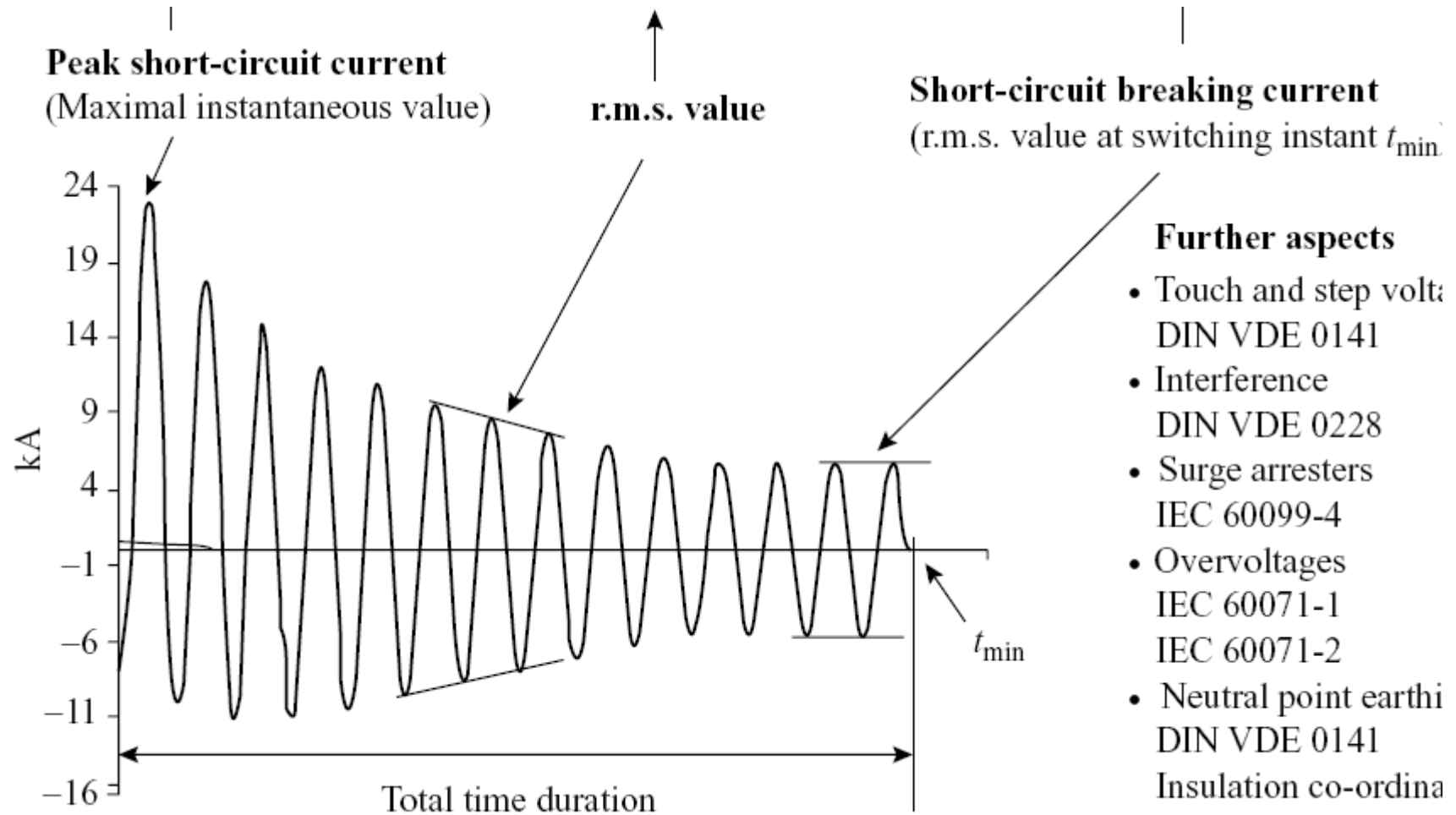
## محاسبات اتصال کوتاه

*ANSI/ IEEE Standards C37 and IEC 6090*

تعریف انواع جریان اتصال کوتاه 

- جریان سیکل اول یا آنی (وسایل اندازه گیری) (نامتقارن و شامل ترم ثابت DC-راکتانس زیر گذرا)
- جریان پیک (ماکزیمم جریان خطا در سیکل اول (متقارن))
- جریان قطع (رله ها و مدارشکن ها) (۳ تا ۵ سیکل بعد از وقوع خطا- شامل ترم DC-ترم ac کاهش یافته)
- جریان با تاخیر یا ماندگار (بین ۶ تا ۳۰ سیکل- ترم نمایی میرا شده- راکتانس گذرا)

در محاسبات مربوط به هماهنگی رله ها از جریان موثر متقارن قطع استفاده میشود.



### Further aspects

- Touch and step voltage  
DIN VDE 0141
- Interference  
DIN VDE 0228
- Surge arresters  
IEC 60099-4
- Overvoltages  
IEC 60071-1  
IEC 60071-2
- Neutral point earthing  
DIN VDE 0141  
Insulation co-ordination  
IEC 60071-1



## Current Transformer

## ترانسفورماتور جریان

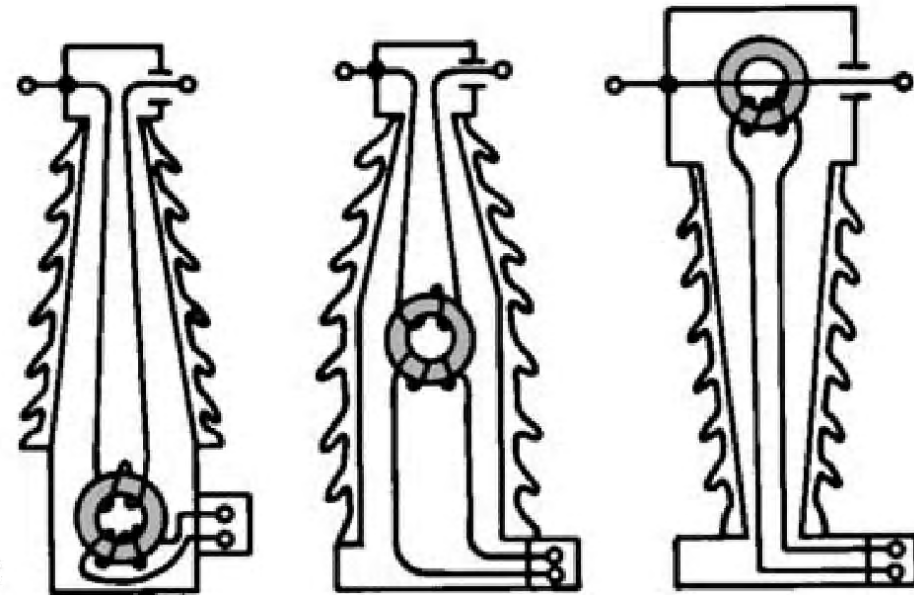
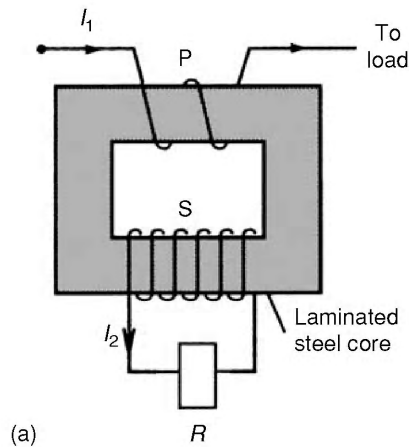
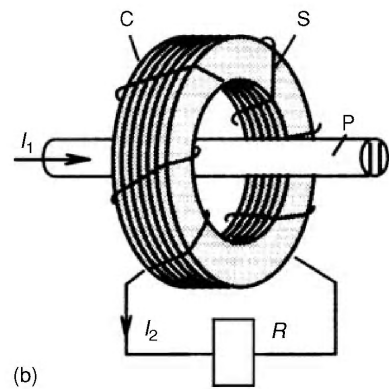
کاربردها: 



کاهش جریان سیستم قدرت به جریان کمتر جهت اندازه گیری یا حفاظت

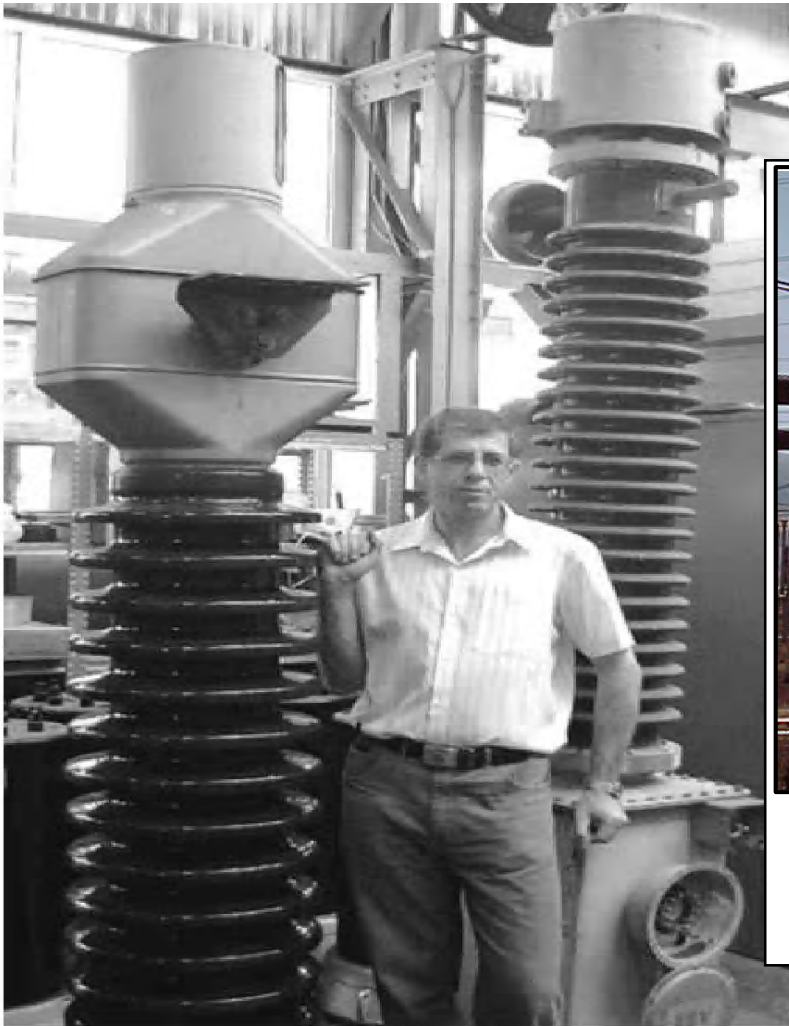
ایزوله نمودن مدار ثانویه از اولیه

ایجاد جریان ثانویه استاندارد



(9)

## رله و حفاظت: ترانسفورماتورهای اندازه گیری

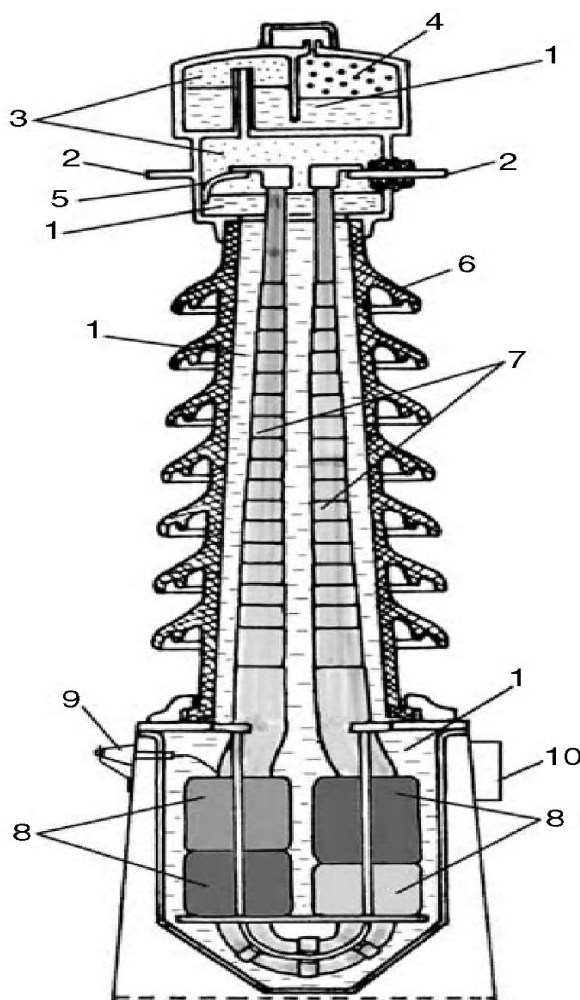


Very High Voltage CT



Medium-Voltage CT

## رله و حفاظت: ترانسفورماتورهای اندازه گیری



One of the most widespread constructions of a high-voltage CT (160 kV), with oil-impregnated paper insulation. 1 — Oil; 2 — copper plates for connecting to the controlled current circuit; 3 — volumes filled with nitrogen; 4 — air; 5 — jumper strap linking one of the outlets with the metal case of the upper reservoir; 6 — porcelain insulator; 7 — insulated primary conductor (primary turn); 8 — four independent secondary windings, each with its own magnetic core; 9 — insulator on the outer wall of the tank, with the outlet connected to the tank; 10 — terminal box with outlets of secondary windings.

## Optical CT

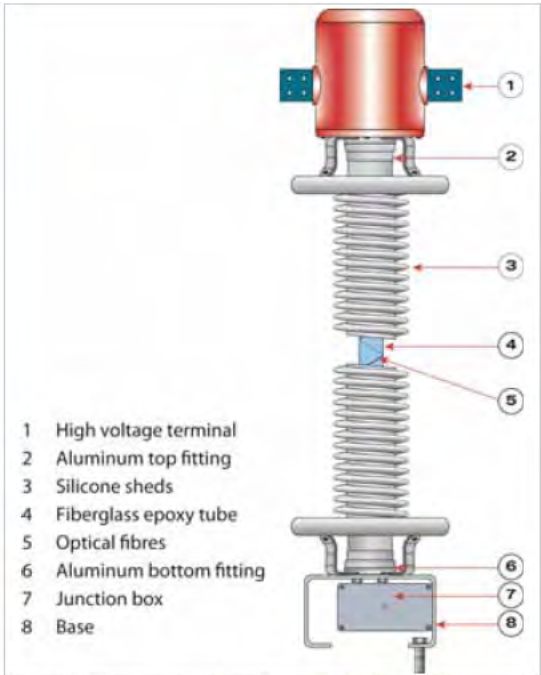


Figure 6.26 Cross section of an Alstom CTO 72.5kV to 765kV current transformer with an optical sensor

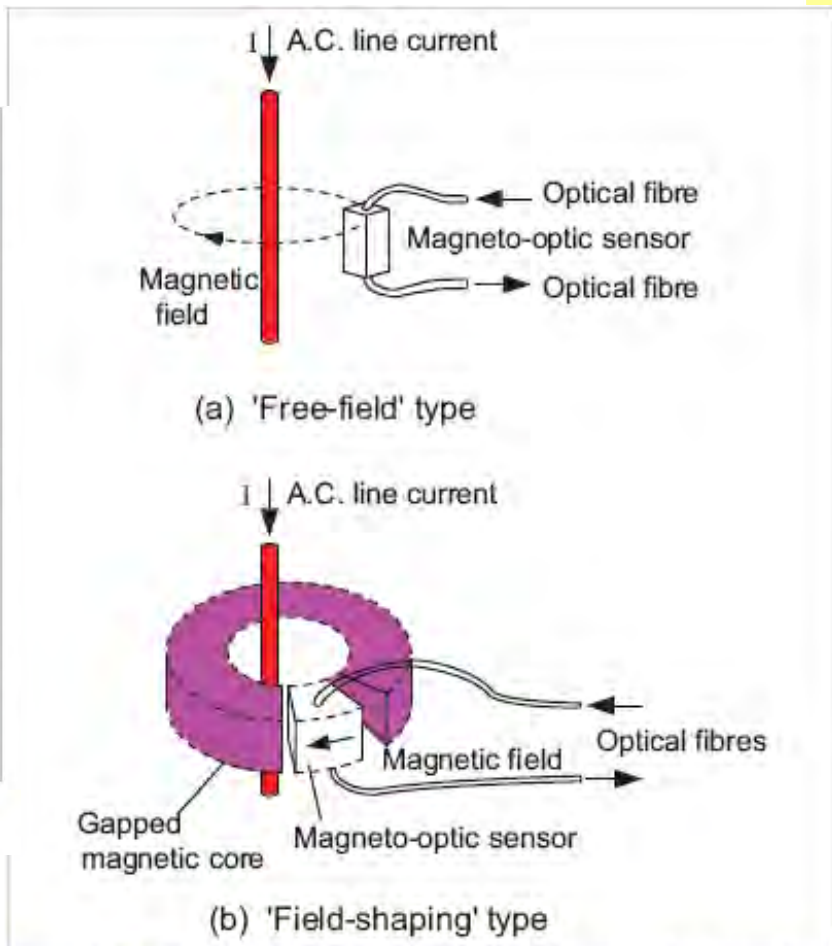


Figure 6.20: Optical current sensor based on the magnetic properties of optical materials

## Hall Effect Current Transformer

- ✓ In this case the sensing element is a semiconducting wafer that is placed in the gap of a magnetic concentrating ring.
- ✓ This allows very accurate current measurements in both dc and high-frequency applications.

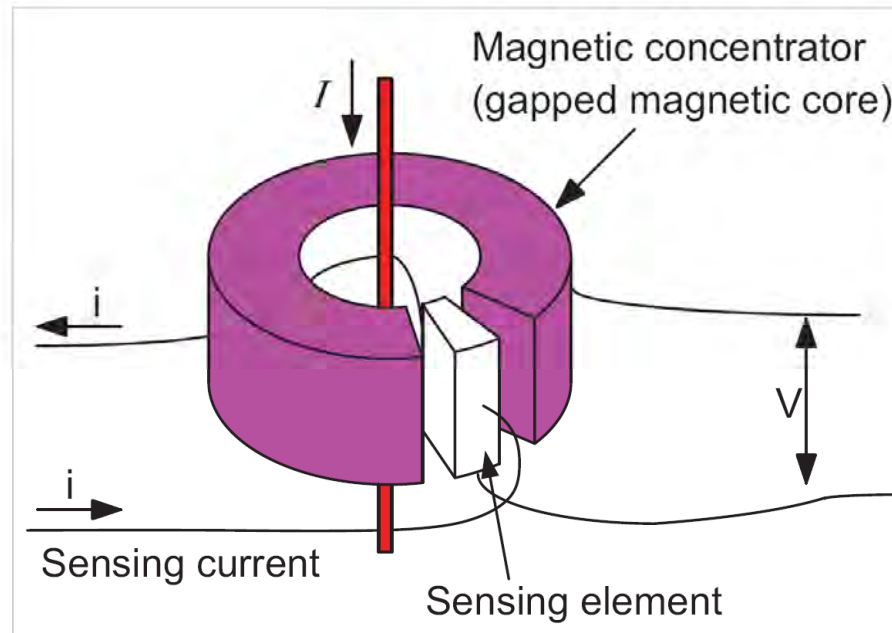
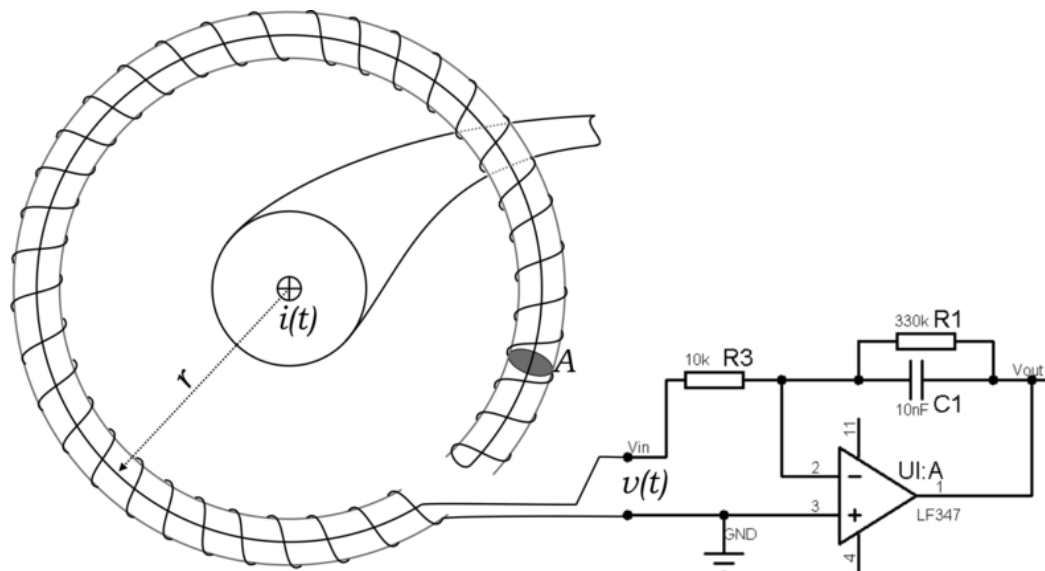


Figure 6.27: Conceptual design of a Hall-effect current sensing element fitted in a field-shaping gap

## Rogowski Coils

The Rogowski coil is based on the principle of an air-cored current transformer with a very high load impedance. The secondary winding is wound on a toroid of insulation material.

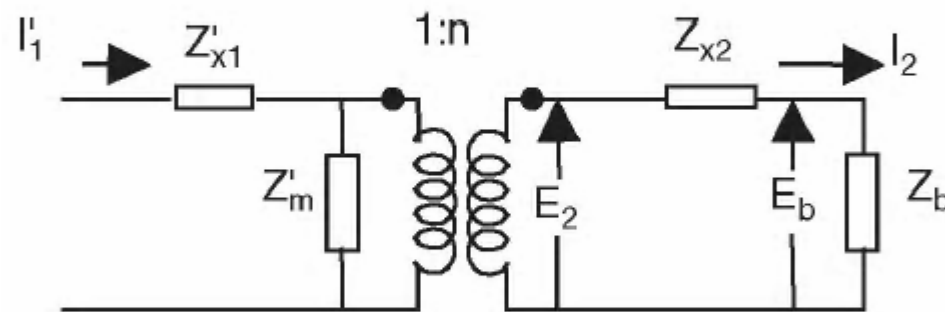


$$V = \frac{-AN\mu_0}{l} \frac{dI}{dt}$$

$$v_{out}(t) = -\frac{1}{RC} \int v_{in}(t) dt$$

## رله و حفاظت: ترانسفورماتورهای اندازه گیری

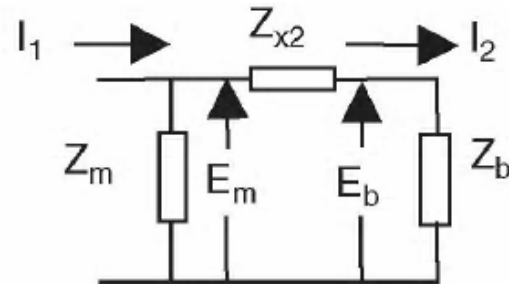
- خروجی بصورت استاندارد  $5^A$  یا  $1^A$
  - انواع: اندازه گیری - CT حفاظتی
- مدار معادل CT در حالت ماندگار:



$Z_b$ : امپدانس کلیه رله ها و یا وسایل اندازه گیری متصل  
به ثانویه (بردن)

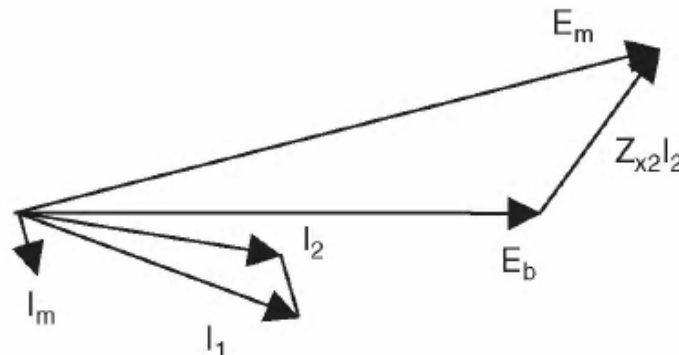
## رله و حفاظت: ترانسفورماتورهای اندازه گیری

ز دید اولیه شبکه مانند منبع جریان عمل می کند:



$$I_1 = \frac{I_1'}{n}, \quad Z_m = n^2 Z_m'$$

$$I_m = \frac{E_m}{Z_m}, \quad I_1 = I_2 + I_m$$







## وله و حفاظت: ترانسفورماتورهای اندازه گیری

$$\varepsilon = \frac{I_1 - I_2}{I_1} = \frac{I_m}{I_1} \quad \text{خطای پریونیت جریان:}$$

$$R = \frac{1}{1 - \varepsilon} \quad \text{ضریب اصلاح نسبت:}$$

مثال: یک ترانس جریان با نسبت ۵:۵۰۰ و امپدانس نشتی ثانویه  $(0.01 + j0.1) \Omega$  و بردن اهمی  $2,0 \Omega$  و  $Z_m = 4 + j15 \Omega$  داریم. خطای جریان و ضریب اصلاح نسبت را محاسبه نمایید.

$$I_1 = \frac{E_m}{Z_m \parallel (Z_b + Z_{x2})}$$



## رله و حفاظت: ترانسفورماتورهای اندازه گیری

$$E_m = \frac{I_1 \times (4.0 + j15.0) \times (0.01 + j0.1)}{(4.01 + j15.1)}$$

$$E_m = I_1 \times 1.922 \angle 9.62^\circ$$

$$I_m = \frac{E_m}{Z_m} = \frac{I_1 \times 1.922 \angle 9.62^\circ}{(4.0 + j15.0)}$$

$$I_m = I_1 \times 0.1238 \angle 65.45^\circ$$

$$\varepsilon = \frac{I_m}{I_1} = 0.1238 \angle -65.45^\circ$$

$$R = \frac{1}{(1.0 - 0.1238 \angle -65.45^\circ)}$$

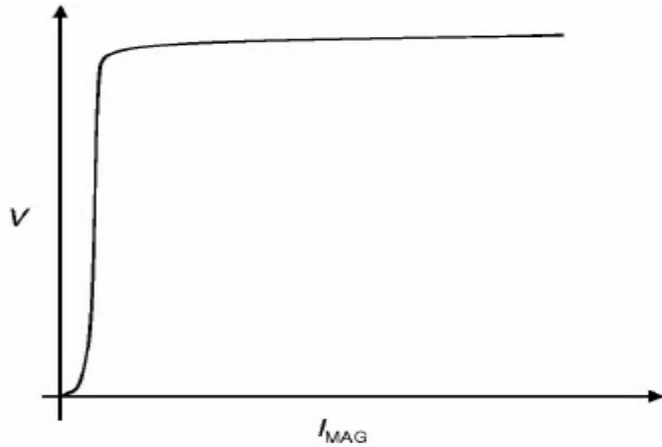
$$R = 1.0468 \angle -6.79^\circ$$

$$Z_b = 1.0^\Omega \Rightarrow R = 1.025 \angle -3.44^\circ$$

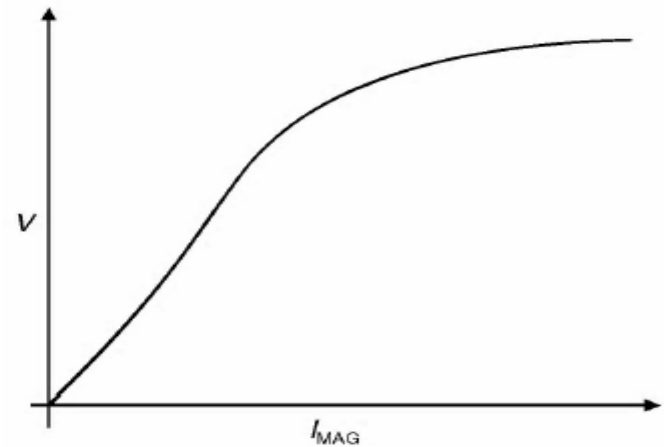
$$Z_b = j2.0^\Omega \Rightarrow R = 1.13 \angle 1.73^\circ$$

## رله و حفاظت: ترانسفورماتورهای اندازه گیری

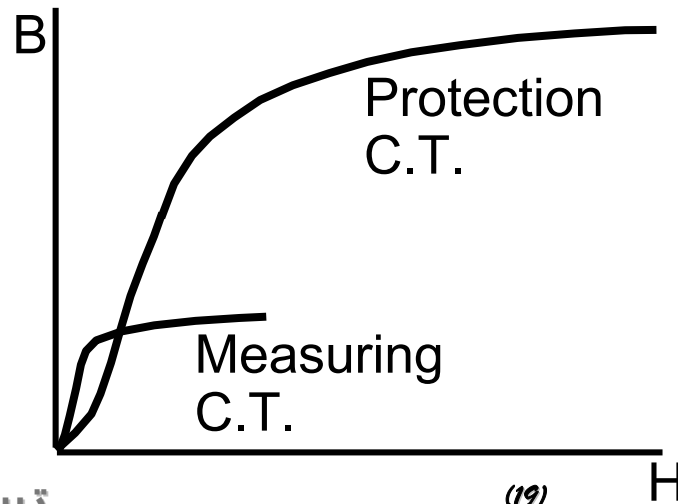
•  $Z_m$  در حالت واقعی مقدار ثابتی نیست، و توسط نمودار تحریک مغناطیسی هسته تعیین می شود:



منحنی مغناطیس شونگی CT اندازه گیری

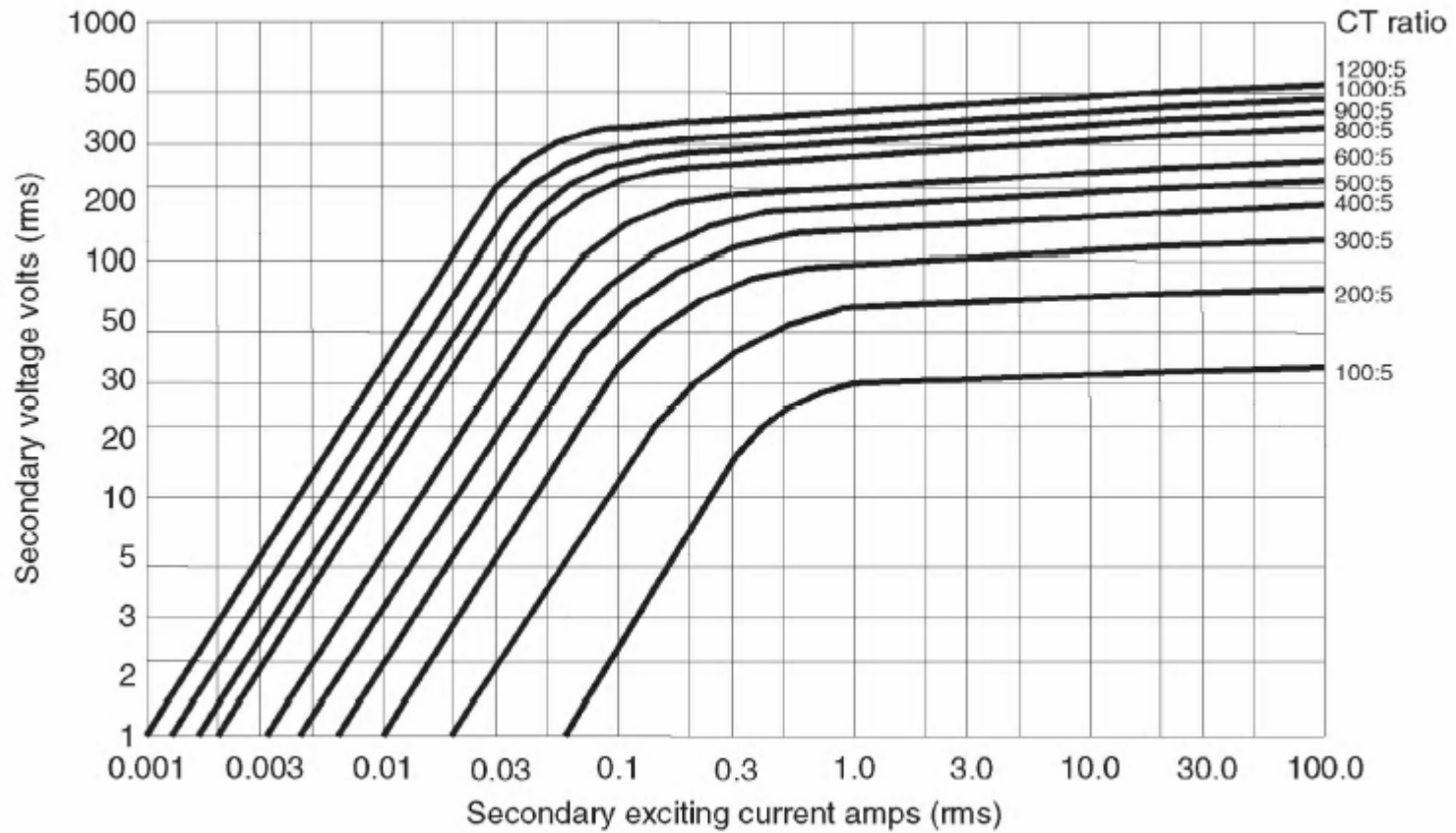


منحنی مغناطیس شونگی CT حفاظتی



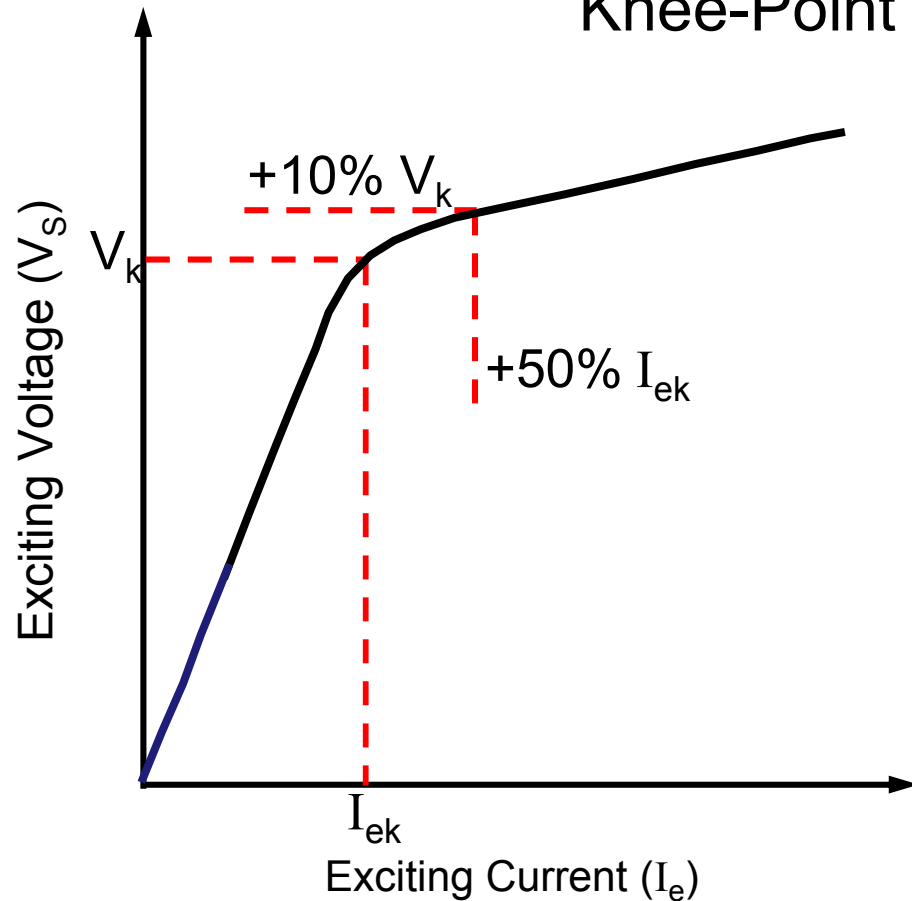


## رله و حفاظت: ترانسفورماتورهای اندازه گیری





## Knee-Point Voltage Definition



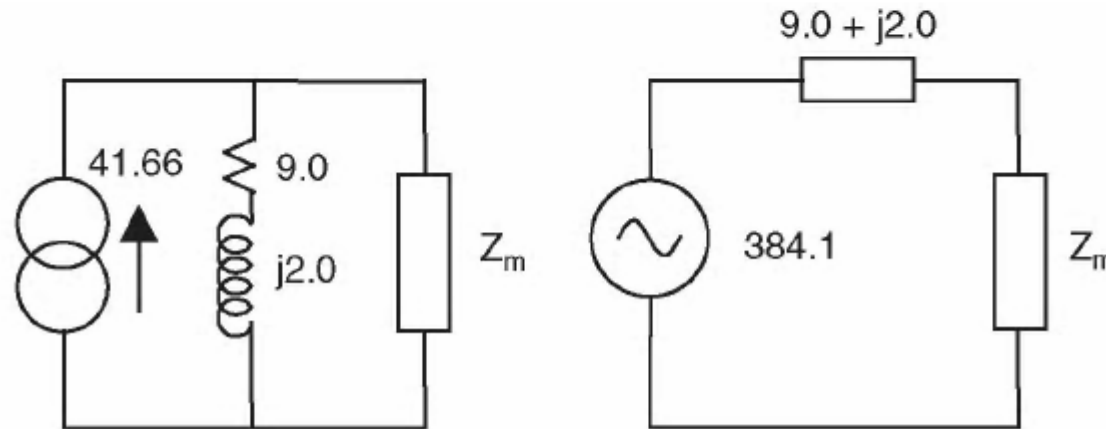
*IEEE CT standards prefer to use log-log scales, defining the Knee point as the excitation voltage at which the gradient of the curve is  $45^\circ$ . The voltage found by this definition is typically 5 to 10% different to the point on the excitation curve found by the IEC definition.*

**IEC 60044-1**

## وله و حفاظت: ترانسفورماتورهای اندازه گیری

مثال: یک CT با نسبت دور ۶۰۰:۵ و منحنی مغناطیس شونددگی مطابق شکل قبل را در نظر بگیرید. اگر جریان اولیه  $5000^A$  باشد و امپدانس بار  $Z_b=9+j2$  بوده و امپدانس پراکندگی ثانویه قابل صرف نظر باشد، جریان ثانویه چقدر است؟ زاویه امپدانس مغناطیس شونددگی  $60^\circ$  درجه است.

جریان منتقل شده اولیه به ثانویه برابر است:  $5000 \times 5 / 600 = 41.66^A$





### رله و حفاظت: ترانسفورماتورهای اندازه گیری

$$I_m = \frac{384.1}{\left[ |Z_m| \times (0.5 + j0.866) + (9.0 + j2.0) \right]} \quad \text{و} \quad E_2 = I_m Z_m = F(I_m)$$

$ Z_m $	$ I_m $	$ E_2 $
$\infty$	0	384.1
100	3.61	361.0
10	21.82	218.2

محل برخورد دو منحنی:  $I_m = 17 \text{ A}, E_2 = 260 \text{ V}.$

$$I_m = 17 \angle -29.96^\circ \quad \text{و} \quad E_{th} = 384.1 \angle 12.53^\circ \quad \text{و} \quad I_1 = 41.66 \angle 0^\circ$$

$$I_z = 28.24 \angle 17.51^\circ \quad \text{و} \quad \epsilon = 0.408 \angle -29.96^\circ$$

$$R = 1.47 \angle -17.51^\circ$$



## رله و حفاظت: ترانسفورماتورهای اندازه گیری

کلاس بندی استاندارد CT ها (ANSI یا IEEE):

در این استاندارد به هر CT یک کد اختصاص داده می شود که هر کد شامل ۲ عدد صحیح و یک حرف می باشد که دو عدد را از هم جدا کرده است:

به طور مثال T ۳۰۰ یا C ۴۰۰. عدد اول ( سمت چپ ) بیشترین خطای ممکن CT را ( بر حسب درصد ) بیان می کند هرگاه ولتاژ ثانویه برابر عدد دوم و جریانی برابر ۲۰ برابر جریانی نامی از CT عبور می کند (چون اکثر CT های مورد استفاده جریان ثانویه نامی ۵ دارند این جریان برابر  $5 \times 20 = 100$  خواهد بود ). بطور مثال C ۴۰۰ نشان می دهد که اگر جریان ثانویه  $100^A$  او ولتاژ آن  $400^V$  باشد حداکثر ۱۰٪ خطا داریم .





## رله و حفاظت: ترانسفورماتورهای اندازه گیری

مثال:

یک CT با نسبت دور ۵:۶۰۰ و کلاس ۴۰۰C۱۰ را در نظر بگیرید. این CT جریان ثانویه  $100^A$  را با خطای کمتر از ۱۰٪ تحت ولتاژ ثانویه  $400^V$  از خود عبور می‌دهد. لذا اندازه امپدانس مغناطیس شونددگی تقریباً برابر با  $400/(0.1*100)=40^{\Omega}$  می‌باشد. اگر جریان اولیه  $5000^A$  باشد، جریان منتقل شده به ثانویه برابر  $41.66^A = 5000*5/600$  خواهد بود. از آنجاییکه خطا حداکثر ۱۰٪ است، جریان مغناطیس شونددگی حداکثر  $4.16^A$  بوده و ولتاژ ثانویه حداکثر  $167^V = 4.16*40$  خواهد بود. حداکثر امپدانس بردنی که  $167^V$  در ثانویه ایجاد می‌کند برابر با  $4.45^{\Omega} = 167/(41.66-4.16)$  است. البته برای تمام بردن های کمتر، مقدار خطا کمتر از ۱۰٪ خواهد شد.



## رله و حفاظت: ترانسفورماتورهای اندازه گیری

Class "P"

کلاس دقت بر اساس استاندارد IEC 60044-1

Specified in terms of :-

- i) Rated burden
- ii) Class (5P or 10P)
- iii) Accuracy limit factor (A.L.F.)

Example :-

15 VA 10P 20

To convert VA and A.L.F. into useful volts

$$V_{\text{useful}} \approx \frac{\text{VA} \times \text{ALF}}{I_N}$$

**Accuracy Limit Factor - A.L.F.**  
**(or Saturation Factor)**

**Ratio of :-**

$$I_{\text{PRIMARY}} : I_{\text{RATED}}$$

**up to which the C.T. rated accuracy is maintained.**

**e.g. 200 / 1A C.T. with an A.L.F. = 5 will maintain its accuracy for**  
 **$I_{\text{PRIMARY}} < 5 \times 200 = 1000 \text{ Amps}$**



## رله و حفاظت: ترانسفورماتورهای اندازه گیری

کلاس دقت بر اساس استاندارد IEC 60044-1

Classes :- 5P, 10P, 'X'

### Designation (Classes 5P, 10P)

(Rated VA)                      (Class)                      (ALF)

Multiple of rated current ( $I_N$ ) up to which declared accuracy will be maintained with rated burden connected.

5P or 10P.

Value of burden in VA on which accuracy claims are based.

(Preferred values :- 2.5, 5, 7.5, 10, 15, 30 VA)

$$Z_B = \text{rated burden in ohms} \\ = \frac{\text{Rated VA}}{I_N^2}$$

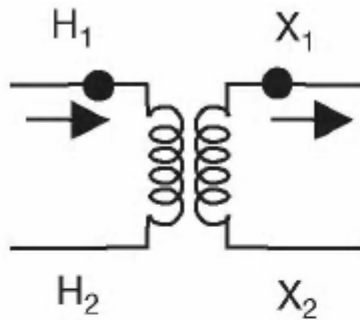


### Limits of Error for Accuracy Class 5P and 10P

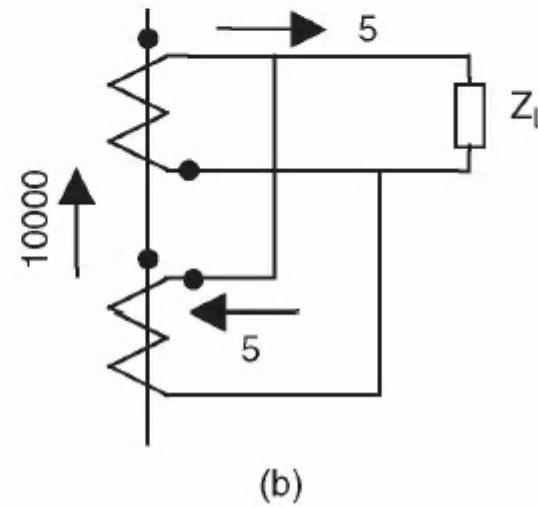
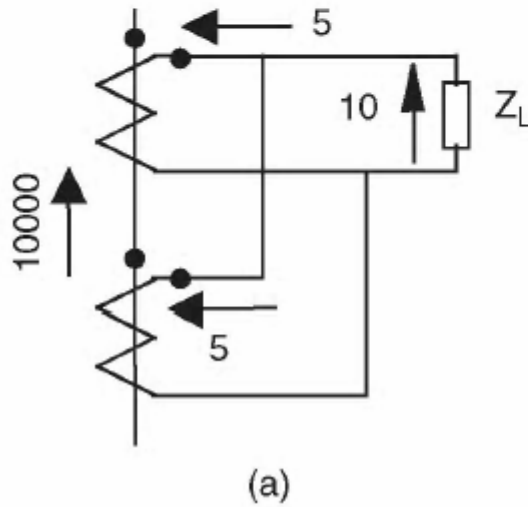
Accuracy Class	Current Error at rated primary current (%)	Phase Displacement at rated primary current		Composite Error (%) at rated accuracy limit primary current
		Minutes	Centiradians	
5P	$\pm 1$	$\pm 60$	$\pm 1.8$	5
10P	$\pm 3$			10

## رله و حفاظت: ترانسفورماتورهای اندازه گیری

علامت گذاری پلاریتهی سیم پیچی ها CT:



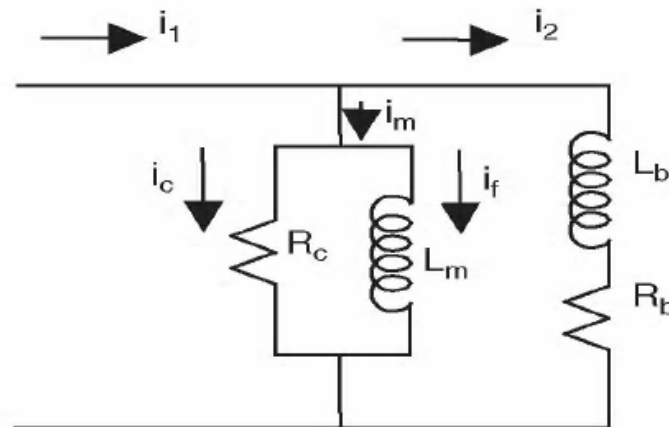
مثال: برای اتصال موازی دو CT با نسبت دور ۵:۱۰۰۰۰ داریم:



## رله و حفاظت: ترانسفورماتورهای اندازه گیری

### عملکرد ترانس جریان در حالت گذرا:

- به هنگام بروز خطا جریانی بسیار بزرگتر از جریان نامی از CT عبوری می کند.
- جریان خطای حاوی یک مولفه DC است که موجب بایاس هسته و در نتیجه باعث اشباع هسته و ایجاد اغتشاش قابل توجه در جریان ثانویه می شود.
- ابتدا با فرض خطی بودن مشخصه مغناطیس شوندگی هسته، حالات گذرا ترانس بررسی و سپس بطور کیفی اثر غیر خطی بودن ترانس در نظر گرفته می شود.



(30)



## رله و حفاظت: ترانسفورماتورهای اندازه گیری

$$i_1(t) = I_{\max} [\cos(\omega t - \theta) - \varepsilon^{-t/T} \cos \theta] \quad \text{for } t > 0$$

$$= 0 \quad \text{for } t < 0$$

$$i_1(s) = I_{\max} \cos \theta \left( \frac{s}{s^2 + \omega^2} + \frac{T}{1 + sT} \right) + I_{\max} \sin \theta \left( \frac{\omega}{s^2 + \omega^2} \right)$$

$$v_2(s) = R_c i_c = s L_m i_f = i_2 (R_b + s L_b)$$

$$\lambda = L_m i_f \quad i_2 = i_1 - (i_f - i_c)$$

برای بردن مقاومتی خالص:  $L_b = 0$

$$v_2 = \frac{R_c R_b}{R_c + R_b} \frac{1}{s + 1/\tau} I_1 \quad \lambda = \frac{R_c R_b}{R_c + R_b} \frac{1}{s + 1/\tau} i_1$$

$$\tau = \frac{R_c L_m + R_b L_m}{R_b R_c}$$

$$\lambda = I_{\max} \cos \theta \frac{R_c R_b}{R_c + R_b} \left\{ \varepsilon^{-t/\tau} \left[ -\frac{\tau T}{\tau - T} + \tau (\sin \varphi \cos \varphi \tan \theta - \cos^2 \varphi) \right] \right.$$

$$\left. + \varepsilon^{-t/T} \left( \frac{\tau T}{\tau - T} \right) + \tau \frac{\cos \varphi}{\cos \theta} \cos(\omega t - \theta - \varphi) \right\}$$

(31)



## رله و حفاظت: ترانسفورماتورهای اندازه گیری

$$i_2 = \frac{1}{R_b} \cdot \frac{d\lambda}{dt}$$

$$= I_{\max} \cos \theta \frac{R_c}{R_c + R_b} \left\{ \varepsilon^{-t/\tau} \left[ -\frac{T}{\tau - T} + (\sin \varphi \cos \varphi \tan \theta - \cos^2 \varphi) \right] - \varepsilon^{-t/T} \left( \frac{\tau}{\tau - T} \right) - \omega \tau \frac{\cos \varphi}{\cos \theta} \sin(\omega t - \theta - \varphi) \right\}$$

جاییکه:  $\tan \varphi = \omega \tau$

مثال:

$$i_1 = 141.4 \times \varepsilon^{-10t} - 141.4 \cos(\omega t)$$

$$\theta = \pi, R_c = 100, R_b = 0.5, T = 0.1 \text{ s}$$

$$\tau = \frac{(100 + 0.5) \times 0.005}{100 \times 0.5} = 0.01005$$

$$\omega \tau = 377 \times 0.01005 = 3.789$$

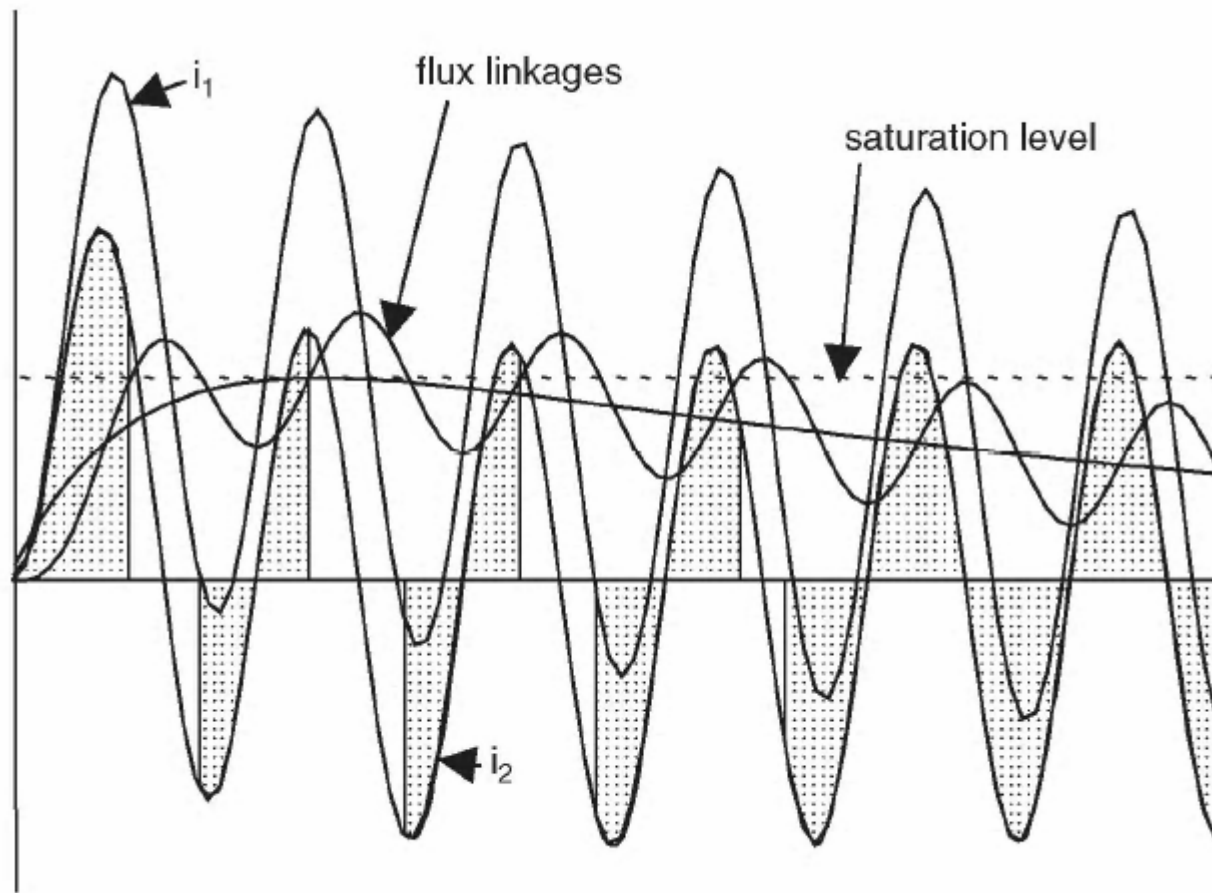
$$\varphi = \tan^{-1}(3.789) = 75.21^\circ = 1.3127 \text{ rad}$$

$$\lambda = -0.7399 \varepsilon^{-99.5t} + 0.786 \varepsilon^{-10t} - 0.1804 \cos(\omega t - 1.3127)$$

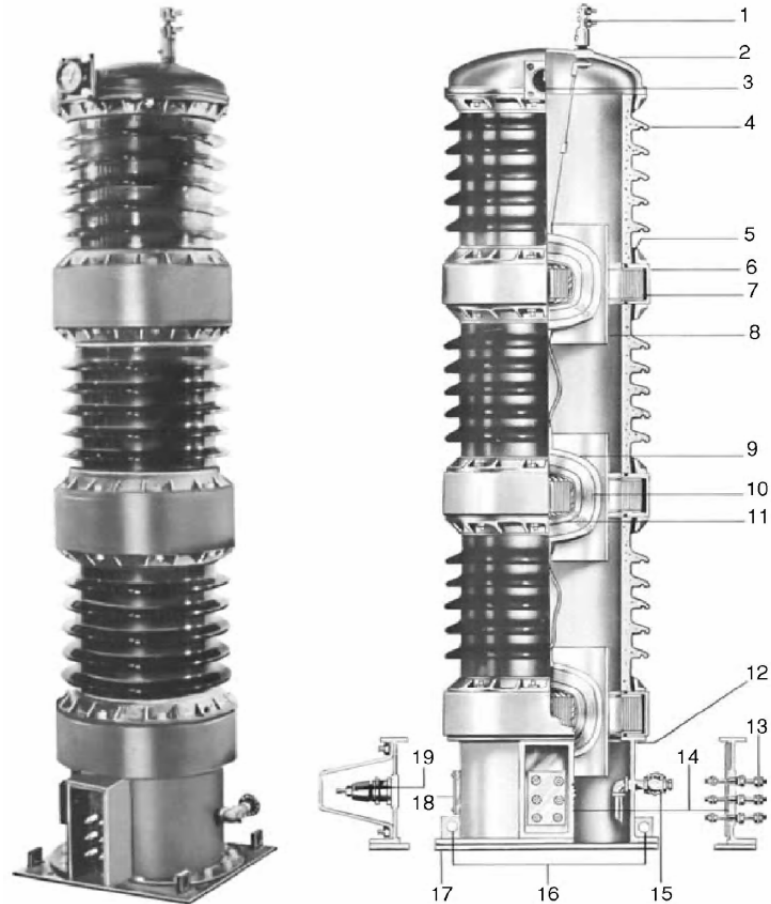
$$i_2 = 147.24 \varepsilon^{-99.5t} - 15.726 \varepsilon^{-10t} + 136.02 \sin(\omega t - 1.3127)$$



## رله و حفاظت: ترانسفورماتورهای اندازه گیری

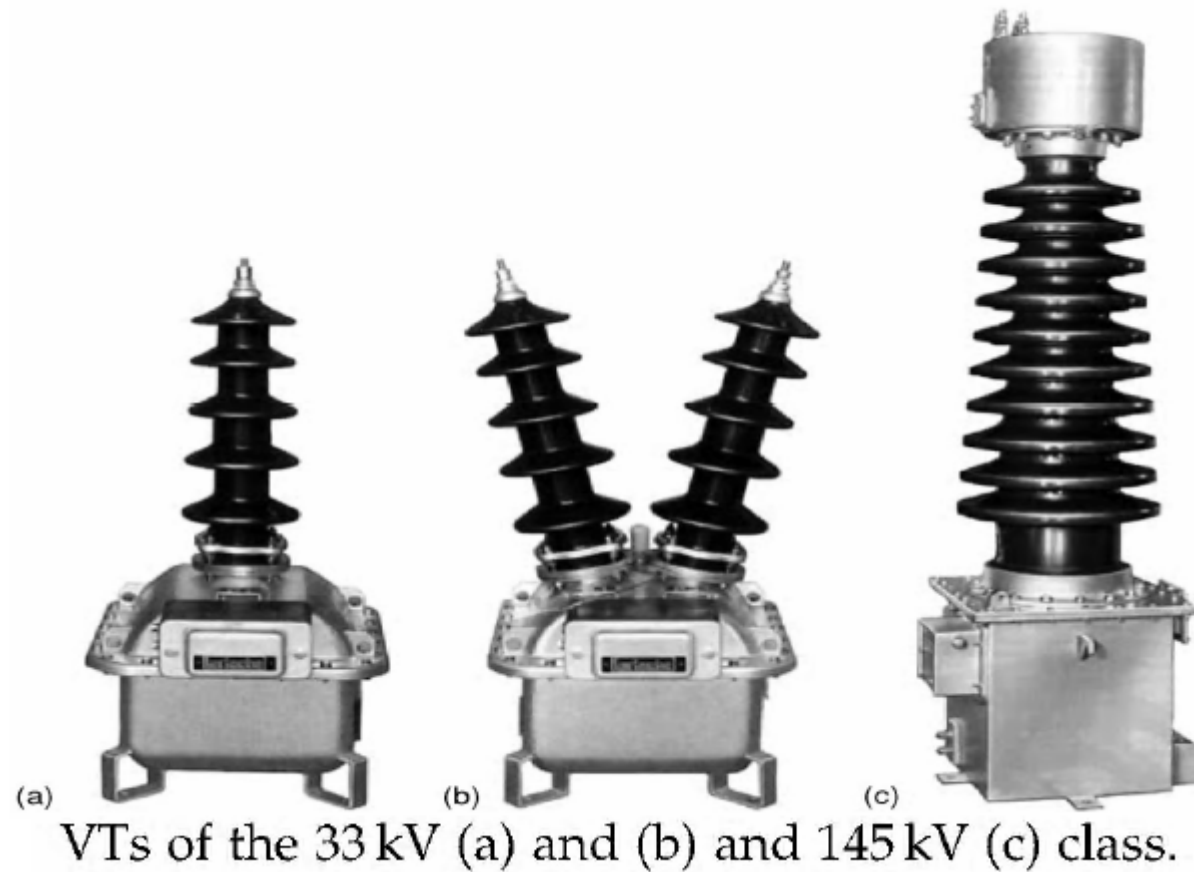


## رله و حفاظت: ترانسفورماتورهای اندازه گیری



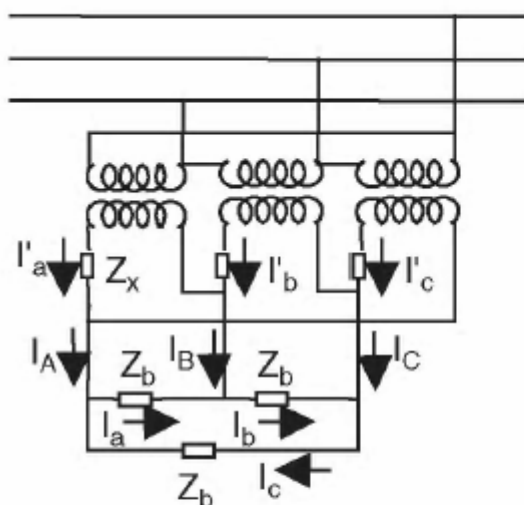
EU type oil immersed cascade VT (General Electric Co.). 1 — HV terminal; 2 — dome-shaped cover; 3 — liquid-level gage; 4 — porcelain shell; 5 — clamping ring; 6 — cylinder assembly; 7 — formed core; 8 — insulation barriers; 9 — coupling winding; 10 — primary winding; 11 — secondary and tertiary winding; 12 — base tank; 13 — secondary and tertiary terminals; 14 — terminal housing; 15 — drain valve; 16 — eye-bar for lifting a complete VT; 17 — bolter base plate; 18 — nameplate; 19 — neutral (ground) bushing. (General Electric Instruction GEH-1629H.)

## رله و حفاظت: ترانسفورماتورهای اندازه گیری



## رله و حفاظت: ترانسفورماتورهای اندازه گیری

مثال:



$$I'_a = \frac{E_{ab}}{Z_b} = \frac{E_{ab0} - I'_a Z_x}{Z_b}$$

$$E_{ab} = E_{ab0} \frac{Z_b}{Z_x + Z_b}$$

PT هایی با اتصال اولیه و ثانویه مثلث را در نظر بگیرید. هر PT دارای امپدانس پراکنده  $(1 + j5)\Omega$  می باشد. امپدانس بار دن  $50\Omega$  بوده و بصورت مثلث به هم متصل شده اند. ولتاژ اولیه  $69^{kv}$  و نسبت دور  $\frac{69000}{120} = 575$  است. جریان بار را بدست آورید.

## رله و حفاظت: ترانسفورماتورهای اندازه گیری

ترانسفورماتورهای ولتاژ با کوپلاژ خازنی :

### Coupling Capacitor Voltage Transformers (CCVT)



High-voltage VTs of capacitor type of the 345, 362, and 800 kV class.

(37)

## رله و حفاظت: ترانسفورماتورهای اندازه گیری

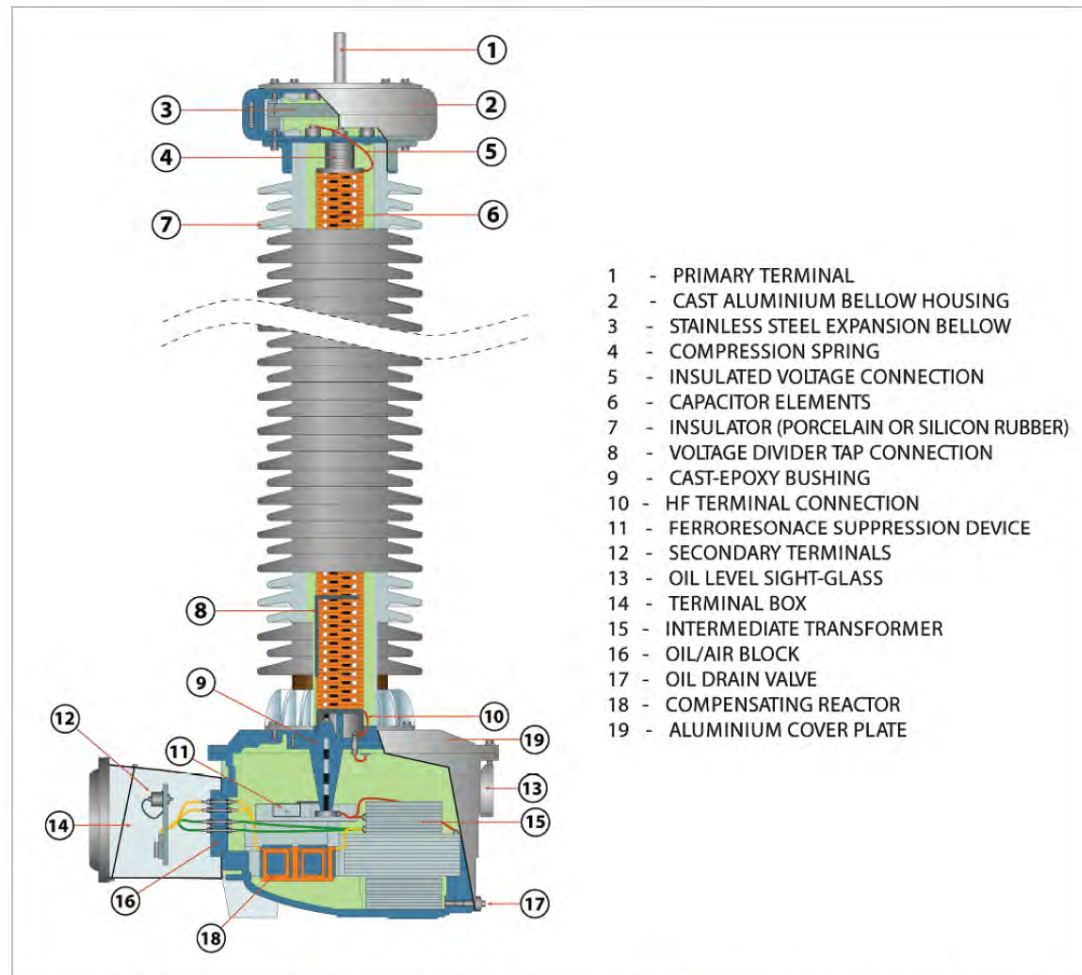


Figure 6.8: Section view of an Alstom OTCF 72.5kV to 765kV coupling capacitor voltage transformer



## رله و حفاظت: ترانسفورماتورهای اندازه گیری

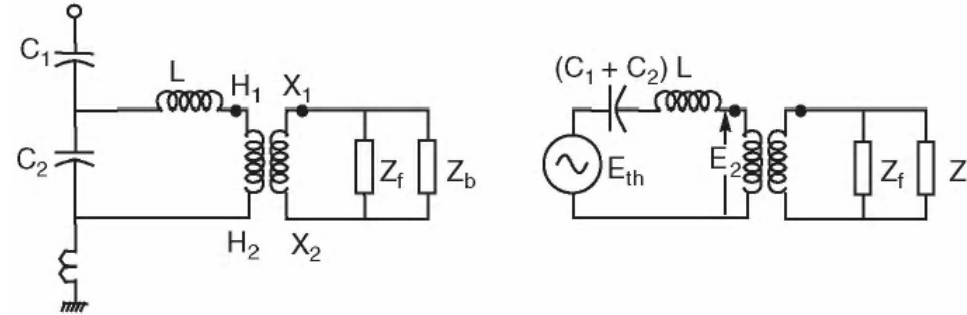
Accuracy Class	0.8 - 1.2 x rated voltage 0.25 - 1.0 x rated burden at 0.8pf	
	voltage ratio error (%)	phase displacement (minutes)
0.1	+/- 0.1	+/- 5
0.2	+/- 0.2	+/- 10
0.5	+/- 0.5	+/- 20
1.0	+/- 1.0	+/- 40
3.0	+/- 3.0	not specified

Table 6.1: Measuring Voltage Transformer error limits

Accuracy Class	0.25 - 1.0 x rated burden at 0.8pf 0.05 - $V_f$ x rated primary voltage	
	Voltage ratio error (%)	Phase displacement (minutes)
3P	+/- 3.0	+/- 120
6P	+/- 6.0	+/- 240

Table 6.2: Additional limits for protection Voltage Transformers

## رله و حفاظت: ترانسفورماتورهای اندازه گیری



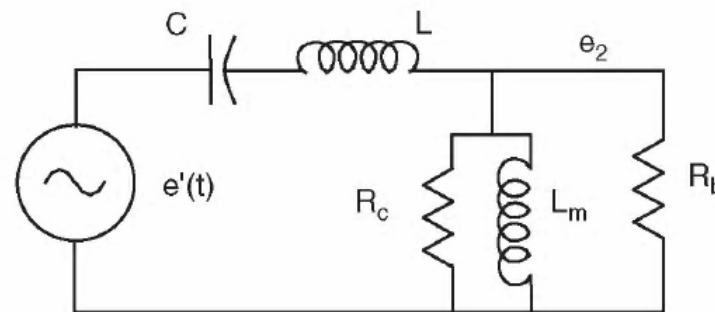
• با تقسیم ولتاژ خازنی، ولتاژ به حدود  $1^{kv}$  تا  $4^{kv}$  کاهش می یابد.

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

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

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

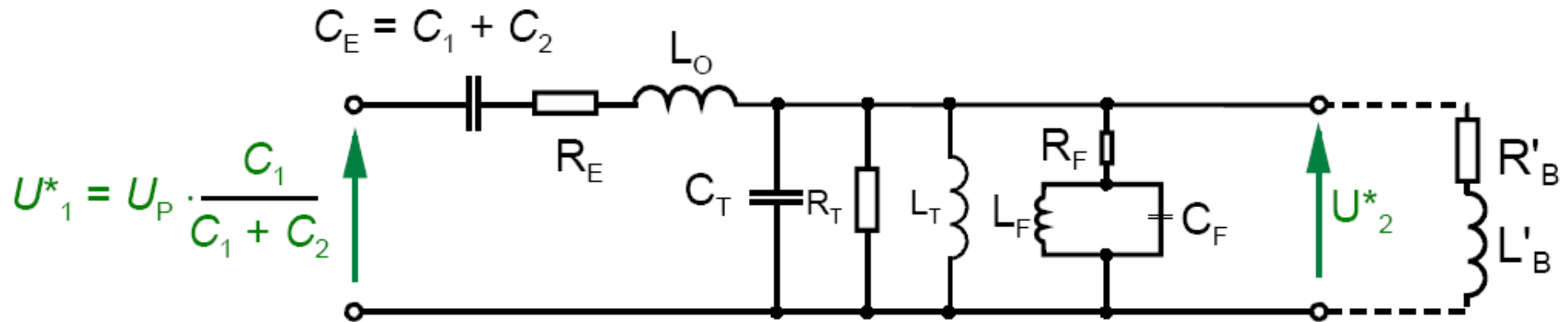
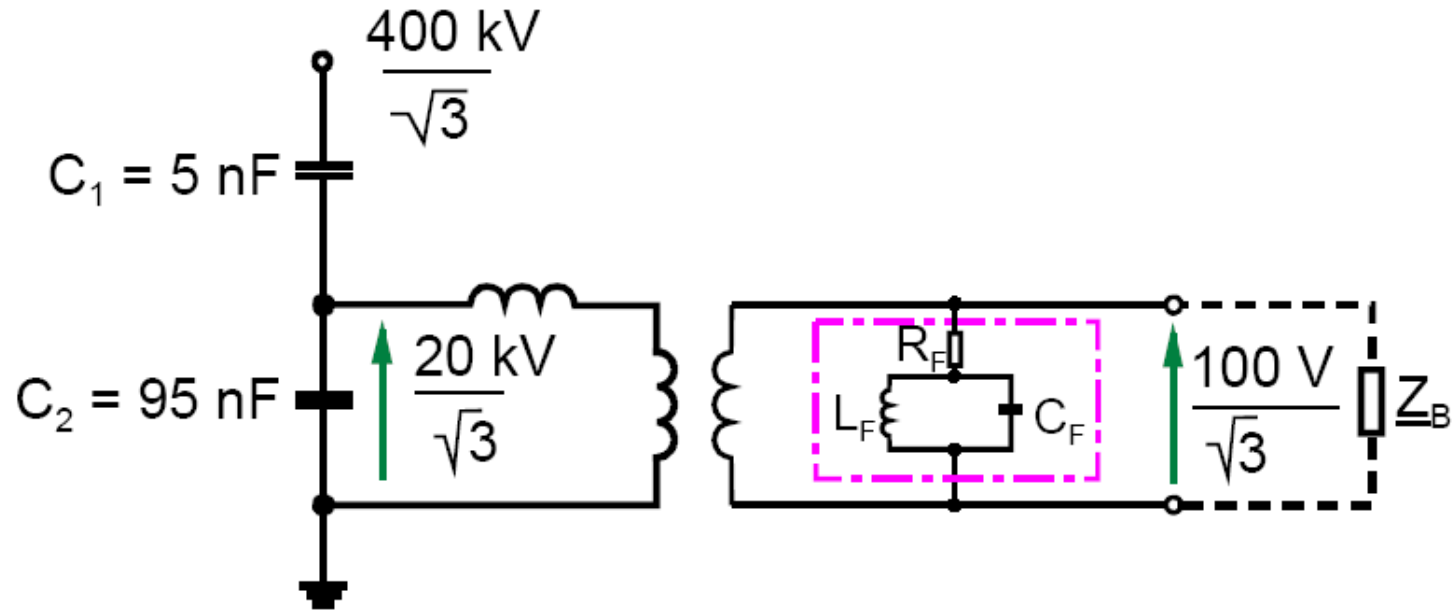
حالت گذرای ترانس ولتاژ (CCVT):



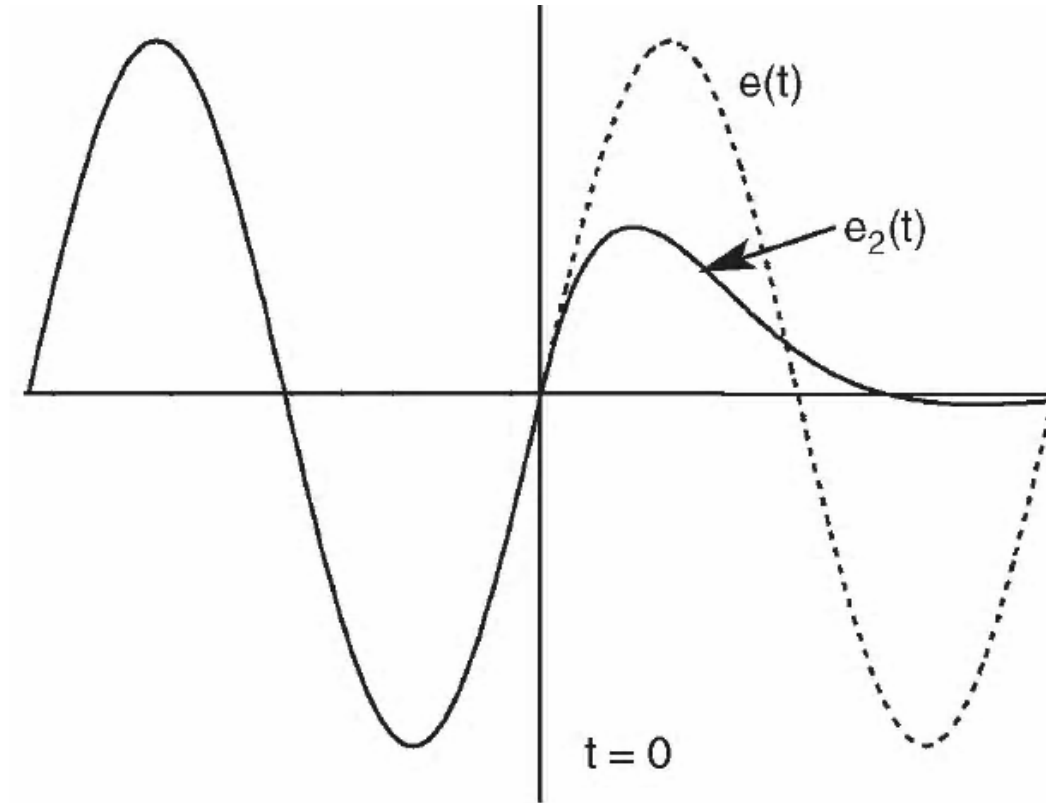
(40)



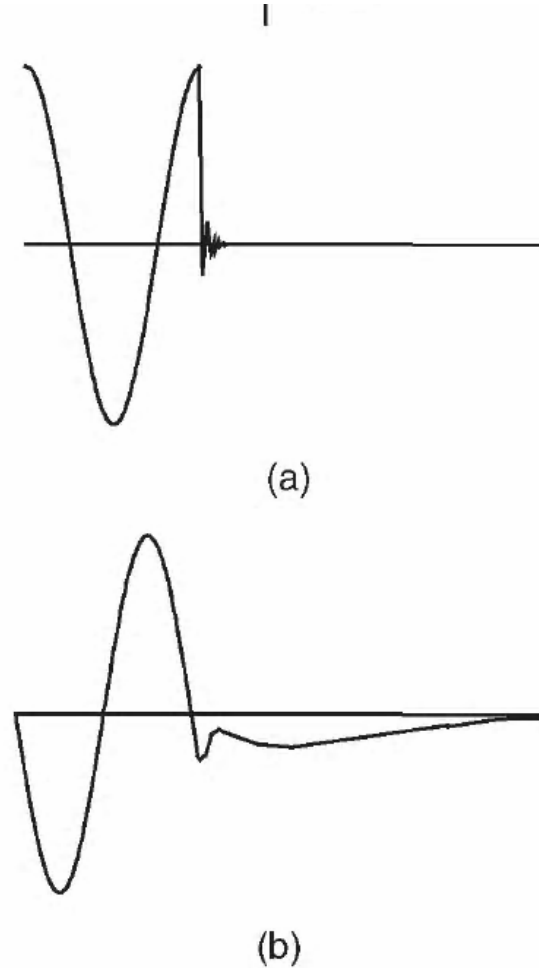
## رله و حفاظت: ترانسفورماتورهای اندازه گیری



## رله و حفاظت: ترانسفورماتورهای اندازه گیری



## رله و حفاظت: ترانسفورماتورهای اندازه گیری



**Figure 3.20** CCVT response for a complete model circuit: (a) fault at voltage maximum; (b) fault at voltage zero



## رله و حفاظت: ترانسفورماتورهای اندازه گیری

$e(t) = E_{\max} \cos(\omega t + \theta)$  for  $t \leq 0$ ; and  $e(t) = 0$  for  $t > 0$   
چون  $L$  و  $C$  برای فرکانس  $\omega$  تنظیم شده‌اند، لذا ولتاژ روی بار هم همان  $E_{\max} \cos(\omega t + \theta)$  برای  $t < 0$  خواهد بود. حال چنانچه از جمع آثار استفاده کنیم می‌توانیم در طول خطا پاسخ مدار را به یک منبع  $E_{\max} \cos(\omega t + \theta)$  و یک منبع  $-E_{\max} \cos(\omega t + \theta)$  بدست آورده با هم جمع کنیم.

$$e'(t) = -E_{\max} \cos(\omega t + \theta) \quad \text{for } t \geq 0; \text{ and } e'(t) = 0 \quad \text{for } t < 0$$

$$e'(s) = -E_{\max} \cos \theta \frac{s - \omega \tan \theta}{s^2 + \omega^2}$$

$$e'_2(s) = e'(s)e'_2(s) = e'_2(s) \frac{L_m}{\tau L} \frac{s^2}{s^3 + s^2(L + L_m)/\tau L + s\omega + \omega^2/\tau}$$

$$\tau = \frac{L_m(R_c + R_b)}{R_c R_b}$$



## رله و حفاظت: ترانسفورماتورهای اندازه گیری

برای  $L_m = \infty$  داریم:

$$\tau' = \frac{L(R_c + R_b)}{R_c R_b} \quad e'_2(s) = e'(s) \frac{1}{\tau'} \frac{s}{s^2 + s/\tau + \omega^2}$$

$$e'_2(t) = -E_{\max} [\cos(\omega t + \theta)$$

$$- \cos \theta \sqrt{1 + (\cot \varphi + \operatorname{cosec} \varphi \tan \theta)^2} \times \varepsilon^{-\omega t \cos \varphi} \times \sin(\omega t \sin \varphi + \psi)]$$

$$\psi = \arctan[-\sin \varphi / (\cos \varphi + \tan \theta)]$$

جایگاه:



## رله و حفاظت: ترانسفورماتورهای اندازه گیری

مثال:

خطا در صفر ولتاژ (زاویه ۹۰ درجه)، مقاومت تلفات هسته  $1000 \Omega$  و مقاومت بار  $2000 \Omega$ ، اندوکتانس تنظیم  $1.33 \text{H}$ :

$$\tau' = 0.002, \quad \cos \varphi = 1/2 \quad \omega \tau' = 0.6613, \quad \sin \varphi_{cp} = 0.7485$$

$$\varphi = 48.46^\circ = 0.8458 \text{ rad}$$

$$\theta = \infty, \quad \psi = 0.$$

$$e_2'(t) = E_{\max} [\cos(\omega t + \pi/2) - 1.336 \times \varepsilon^{-250t} \times \sin(282.2t)]$$

و با توجه به ولتاژ قبل از خطا داریم:

$$e_2(t) = E_{\max} \cos(\omega t + \pi/2) \quad \text{for } t \leq 0$$

$$e_2(t) = 1.336 E_{\max} \times \varepsilon^{-250t} \times \sin(282.2t) \quad \text{for } t > 0$$

## Ferro-Resonance

The exciting impedance  $Z_e$  of the auxiliary transformer T and the capacitance of the potential divider together form a resonant circuit that usually oscillates at a sub-normal frequency.

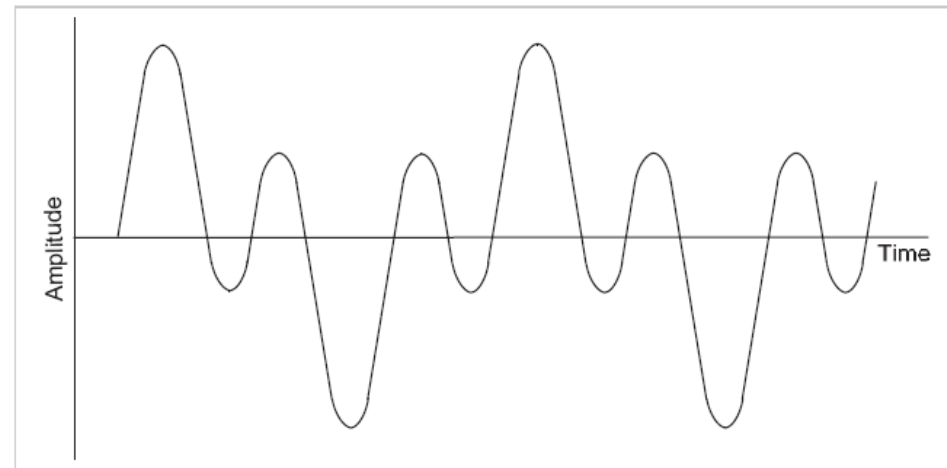
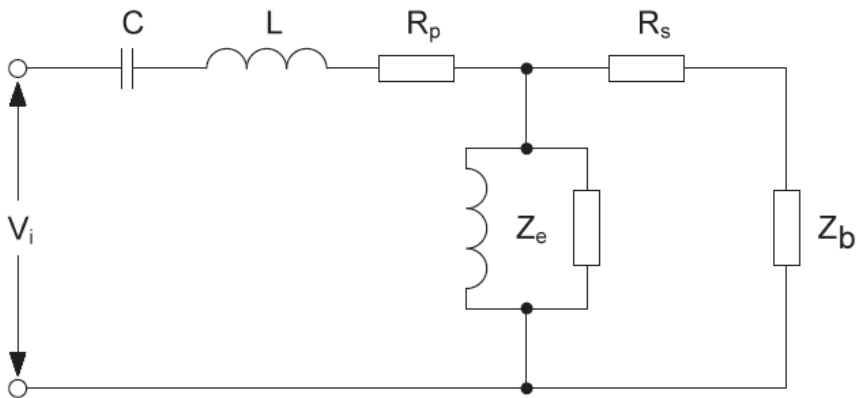


Figure 6.9: Typical secondary voltage waveform with third sub-harmonic oscillation