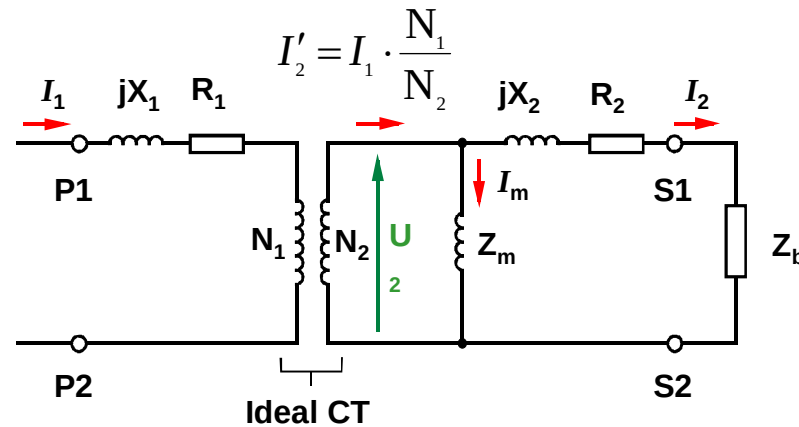


Transformadores de Voltaje y corriente

Gerhard Ziegler

Circuito equivalente del Transformador de Corriente



X_1 = Reactancia referida primario

R_1 = Resistencia devanado primario

X_2 = Reactancia referida secundario

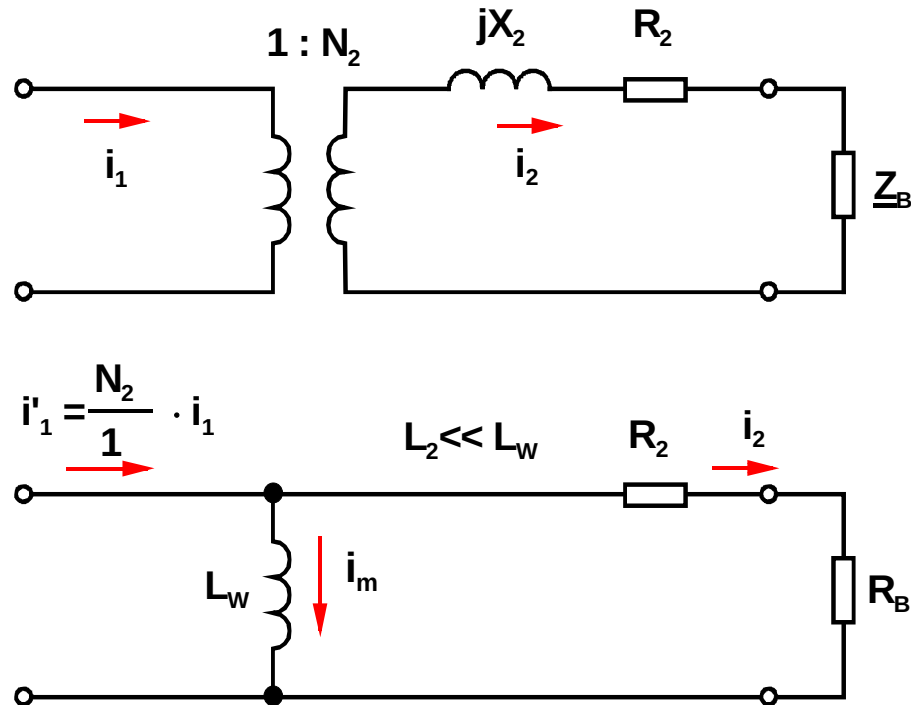
Z_0 = Impedancia de Magnetización

R_2 = Resistencia devanado secundario

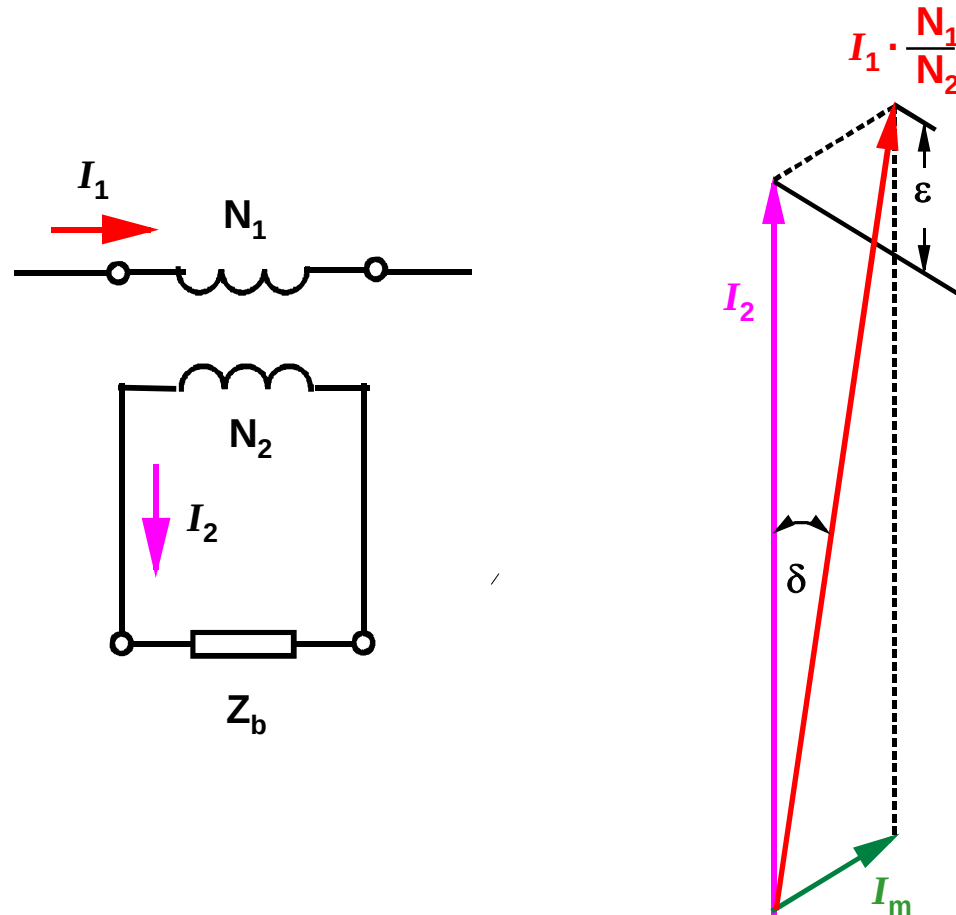
Z_b = Carga secundaria

Nota: Normalmente las reactancias X_1 y X_2 se pueden despreciar

Circuito simplificado del Transformador de Corriente



Desplazamiento de fase(δ) y error(ε)



Transformador de corriente para protecciones

Clases de acuerdo a la norma IEC 60044-1: 5P ó 10P

Especificación TC: 300/1 A , 5P10, 30 VA, $R_{CT} \leq 5 \text{ Ohm}$

Ratio $I_{n\text{-prim.}} / I_{n\text{-Sek.}}$

5% precisión
hasta $I = \text{ALF} \times I_n$

ALF

(Factor límite de precisión)

Resistencia secundaria de devanado

Burden nominal P_{NB}

$$P_i = I_{\text{sec.}}^2 \times R_{CT}$$

El factor límite de precisión en servicio normalmente es mayor al factor ALF del especificado en el TC dado por la relación de burden así:

$$ALF' = ALF \times \frac{P_i + P_{B\text{-}rated}}{P_i + P_{B\text{-}connected}}$$

Criterio de diseño TC:

$$ALF' \geq \frac{I_{S.C.-Max}}{I_n} \times K_{TF}$$

K_{TF} (Factor límite transitorio) considera el aumento de flujo debido a la componente D.C. de $I_{S.C.}$. K_{TF} va de acuerdo al tipo de rele a utilizar y es especificado por el fabricante.

Comportamiento del TC en estado estable

IEC 60044-1 especificaciones de clases:

Clases de precisión	Error a Corriente nominal (I_n)	Angulo error δ a corriente nominal I_n	Error total con $n \times I_n$ (rango límite de precisión)
5P (5PR) *)	$\pm 1 \%$	± 60 minutes	5 %
10P (5PR) *)	$\pm 5\%$	————	10 %
PX	Punto de inflexión voltaje y corriente de magnetización, Resistencia devanado secundario R_{CT}		

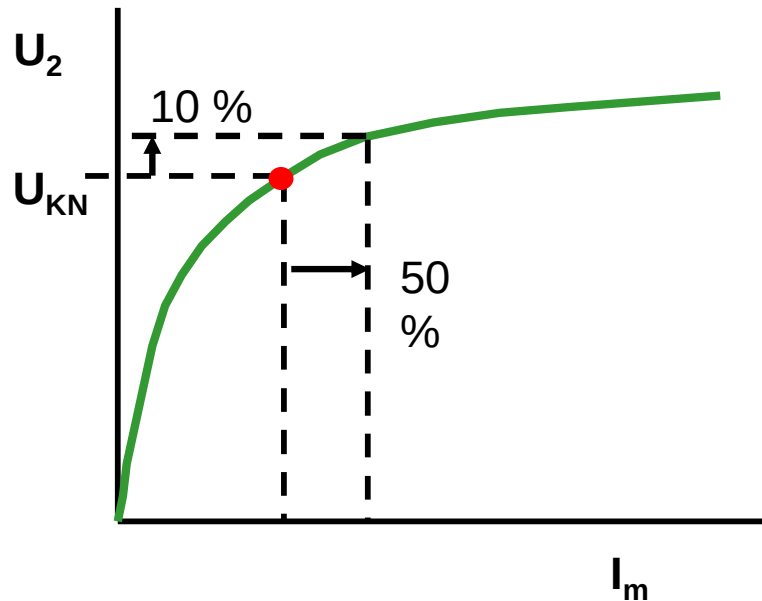
*) Clases con baja remanencia $\leq 10\%$

TC: Estandar para rendimiento transitorio

IEC 60044-6 se especifican 4 clases:

Clases	Error con rango de corriente		Máximo error con Rango límite de precisión	Remanencia
	% error	Angulo error		
TPX (núcleo cerrado)	$\pm 0,5 \%$	$\pm 30 \text{ min}$	$\hat{\varepsilon} \leq 10\%$	no limit
TPY Cámara de aire anti-remanente	$\pm 1,0 \%$	$\pm 30 \text{ min}$	$\hat{\varepsilon} \leq 10\%$	$< 10 \%$
TPZ núcleo lineal	$\pm 1,0 \%$	$\pm 180 \pm 18 \text{ min}$	$\hat{\varepsilon} \leq 10\%$ (a.c.currentonly)	depreciable
TPS núcleo entre hierro	Versión especial para protección de alta impedancia Punto de inflexión voltaje, Resistencia devanado secundario			No limit

Definición Punto de inflexión voltaje



British Standard BS3938:
Class X

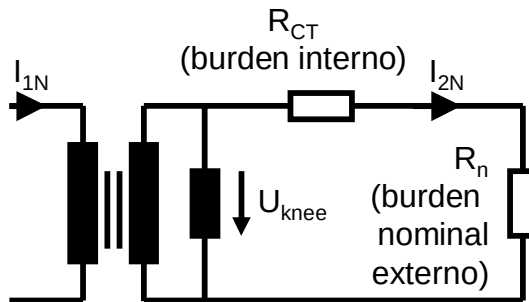
or

IEC 60044-1
Class PX

Class X: Definido por:

- ☐ Corriente primaria
- ☐ Relación No. Vueltas (Este error no excedera $\pm 0.25\%$)
- ☐ Punto inflexión voltaje
- ☐ Corriente inflexión con punto inflexión voltaje
- ☐ Resistencia devanado secundario corregido a 75°C

Relación entre Factor Límite de precisión ALF y Punto de inflexión Voltaje

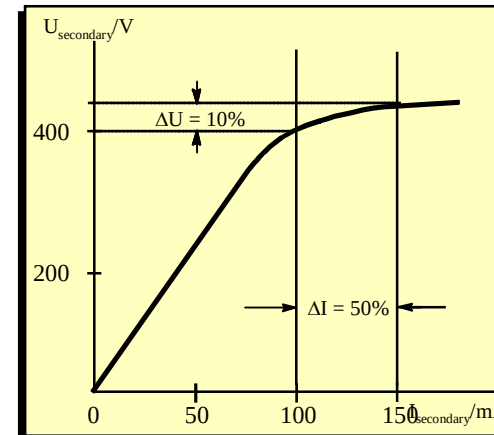


Ejemplo:
IEC Class 5P: 600/1A, 5P35, 15 VA, $R_{CT} = 4\Omega$
to
IEC Class PX: 600/1A:

$$U_{knee} = \frac{(15\Omega + 4\Omega) \cdot 35}{1.3} = 511V$$

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

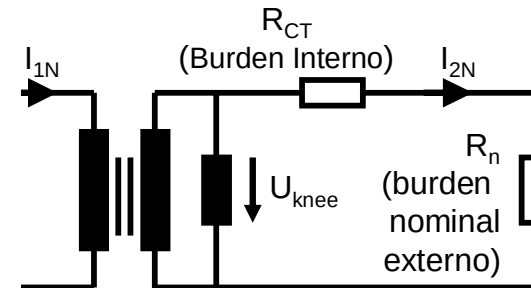
$$= \frac{(P_n + P_{CT}) \cdot ALF_n}{1.3 \cdot I_{2n}}$$



Relación entre Factor Límite de precisión ALF y Punto de inflexión Voltaje

Ejemplo: Un IEC PX CT

$I_{2N} = 1A$ Corriente nominal secundaria
 $U_{knee} = 460V$ Punto inflexión voltaje
 $R_{CT} = 5\Omega$ Burden Interno
 $R' = 1\Omega$ Burden del rele



Corriente máxima circulante A.C. sin componente D.C. (secundaria):

$$I_{max} = \frac{U_{AL}}{R_{CT} + R} = \frac{1.3 \cdot 460V}{5\Omega + 1\Omega} = \frac{600V}{6\Omega} = 100A$$

CT con 20VA:

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

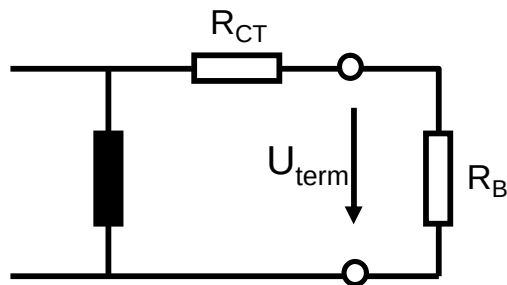
$$ALF = \frac{I_{max}}{I_n} = \frac{100A}{1A} = 100$$

CT con 10VA:

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

Para burdens bajos conectados, con cortas distancias hacia el rele y con reles numéricos con un burden de 0.1 VA requiere menores factores límites de precisión

TC Especificación de norma ANSI/IEEE C57.13

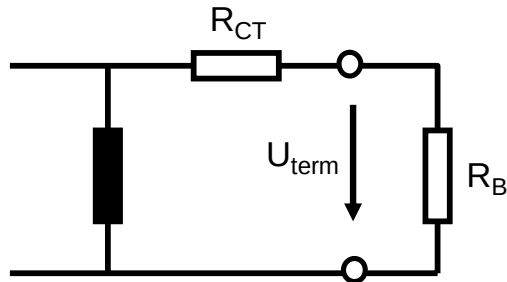


El TC es dimensionado de manera que el error de transformación no exceda 10% en el rango de 1 a 20 veces la corriente nominal secundaria.

La asignación de la clase corresponde al voltaje máximo del terminal U_{term} a 20 veces la corriente nominal secundaria:

Rated current	5A (US standard)
Class	Standard burden
C100,	1 Ohm
C200	2 Ohm
C400	4 Ohm
C800	8 Ohm

Conversión de ANSI C57.13 a IEC para TC 5A sec.



Ejemplo C200
típico 5A

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

Factor Nominal Límite de precisión ALF_n

U_{term} es definido como el voltaje a $20 \cdot I_n$ y conectado como carga externa.

$ALF_n = 20$ para toda clase núcleo C

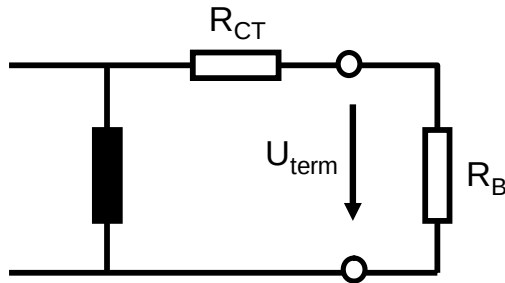
Nominal ANSI-Carga Estandar

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

Clase P Burden Nominal

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

Conversión de ANSI C57.13 a IEC para TC 1A sec.



Example C200, 1A

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

Nominal Accuracy Limiting Factor ALF_n

U_{term} es definido como el voltaje a $20 \cdot I_n$ y conectado como carga externa.

$ALF_n = 20$ para toda clase núcleo C

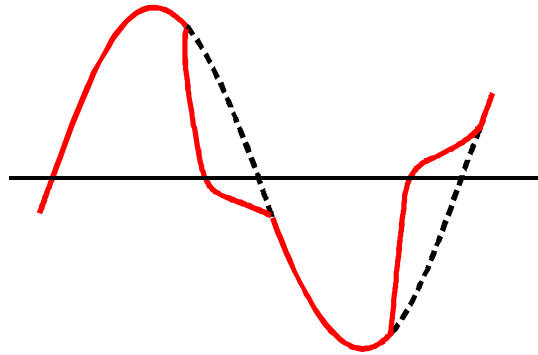
Nominal ANSI-Carga estandar

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

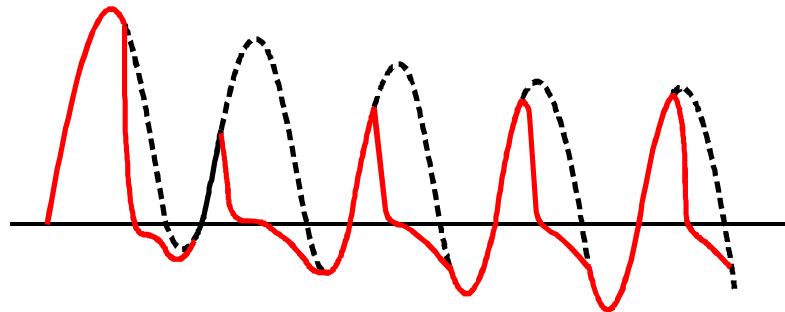
Clase P Burden Nominal

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

Saturación en Transformador de Corriente

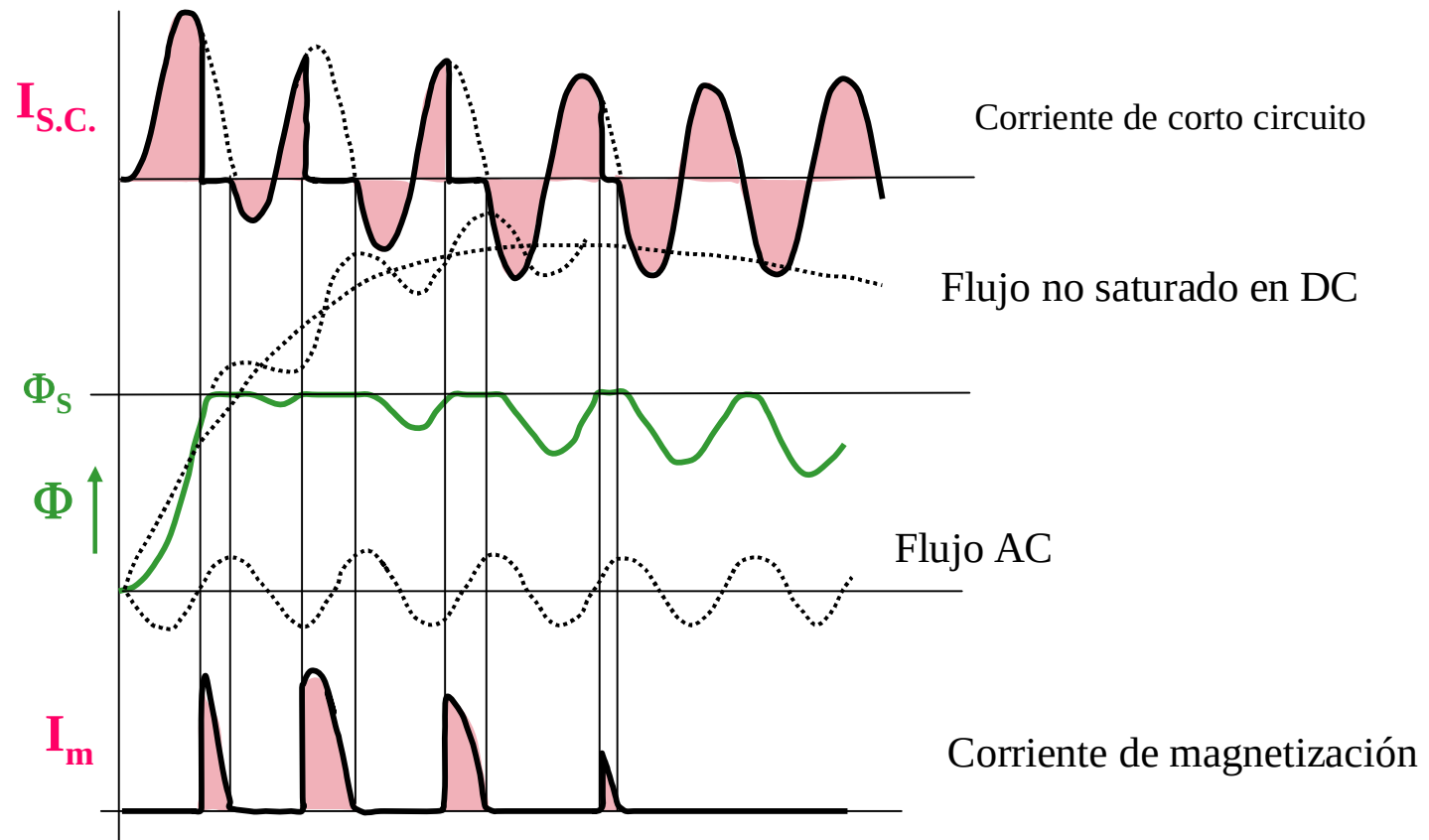


Saturación en estado estacionario con corriente AC



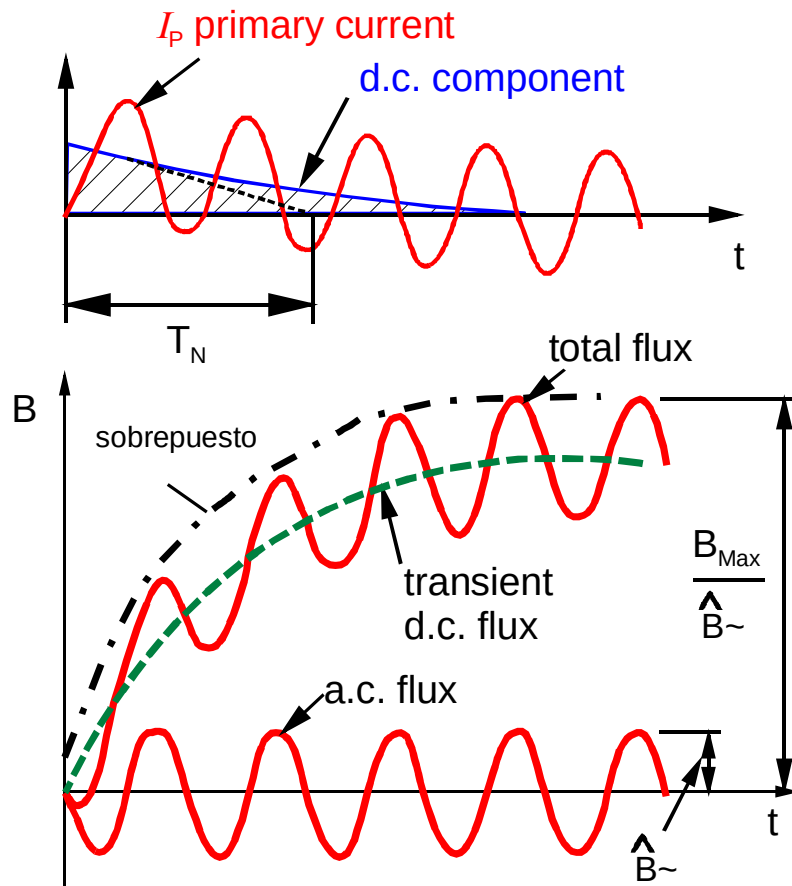
Saturación transitoria con offset corriente

TC Saturación Corrientes y magnetización



Densidad de flujo en el TC (inducción) durante corto circuito off-set

Aumento en inducción (Θ es el ángulo al iniciar la falla)



$$\frac{B}{\hat{B}_{\sim}} = 1 + \frac{\omega \cdot T_N \cdot T_S}{T_N - T_S} \cdot \cos \Theta \cdot \left(e^{-\frac{t}{T_N}} - e^{-\frac{t}{T_S}} \right) + \sin \Theta \cdot e^{-\frac{t}{T_S}} - \sin(\omega t + \Theta)$$

Caso crítico: Falla con voltaje cruce por cero $\Theta = 90^\circ$ y asumiendo máximo a.c. (sobrepuesto):

$$\frac{B}{\hat{B}_{\sim}} = 1 + \frac{\omega \cdot T_N \cdot T_S}{T_N - T_S} \cdot \left(e^{-\frac{t}{T_N}} - e^{-\frac{t}{T_S}} \right)$$

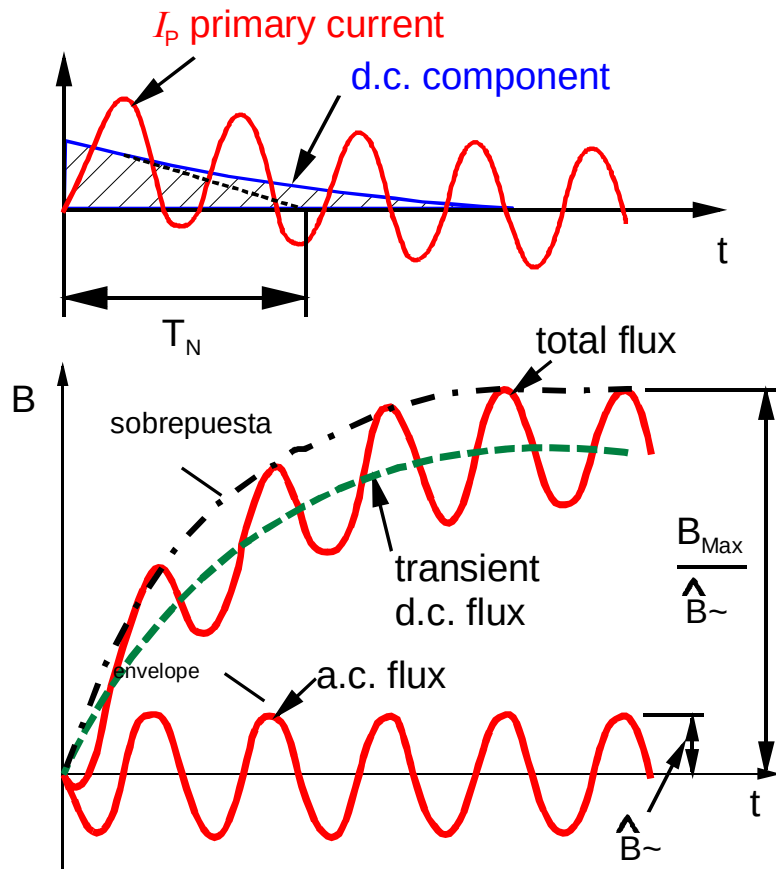
$$\frac{B_{Max}}{B_{\sim}} = 1 + \omega \cdot T_S \cdot \left(\frac{T_N}{T_S} \right)^{\frac{T_S}{T_S - T_N}}$$

$$t_{B_{Max}} = \frac{T_N \cdot T_S}{T_S - T_N} \cdot \ln \frac{T_S}{T_N}$$

$$T_S = \frac{L_w}{R_i + R_B} = \frac{1}{\omega \cdot \tan \delta} \quad T_S[60Hz] = \frac{9084}{\delta_{[min]}} [ms]$$

Inducción transitoria en núcleo de hierro TCs ($T_S \gg T_N$)

Factor de Dimensionamiento transitorio del TC K_{TF}



$$\frac{B}{\hat{B}} = 1 + \omega \cdot T_N \cdot \left(1 - e^{-\frac{t}{T_N}}\right)$$

Inducción transitoria
(curva sobrepuesta)

$$\frac{B_{Max}}{\hat{B}} = 1 + \omega \cdot T_N$$

Maxima inducción
(curva sobrepuesta)

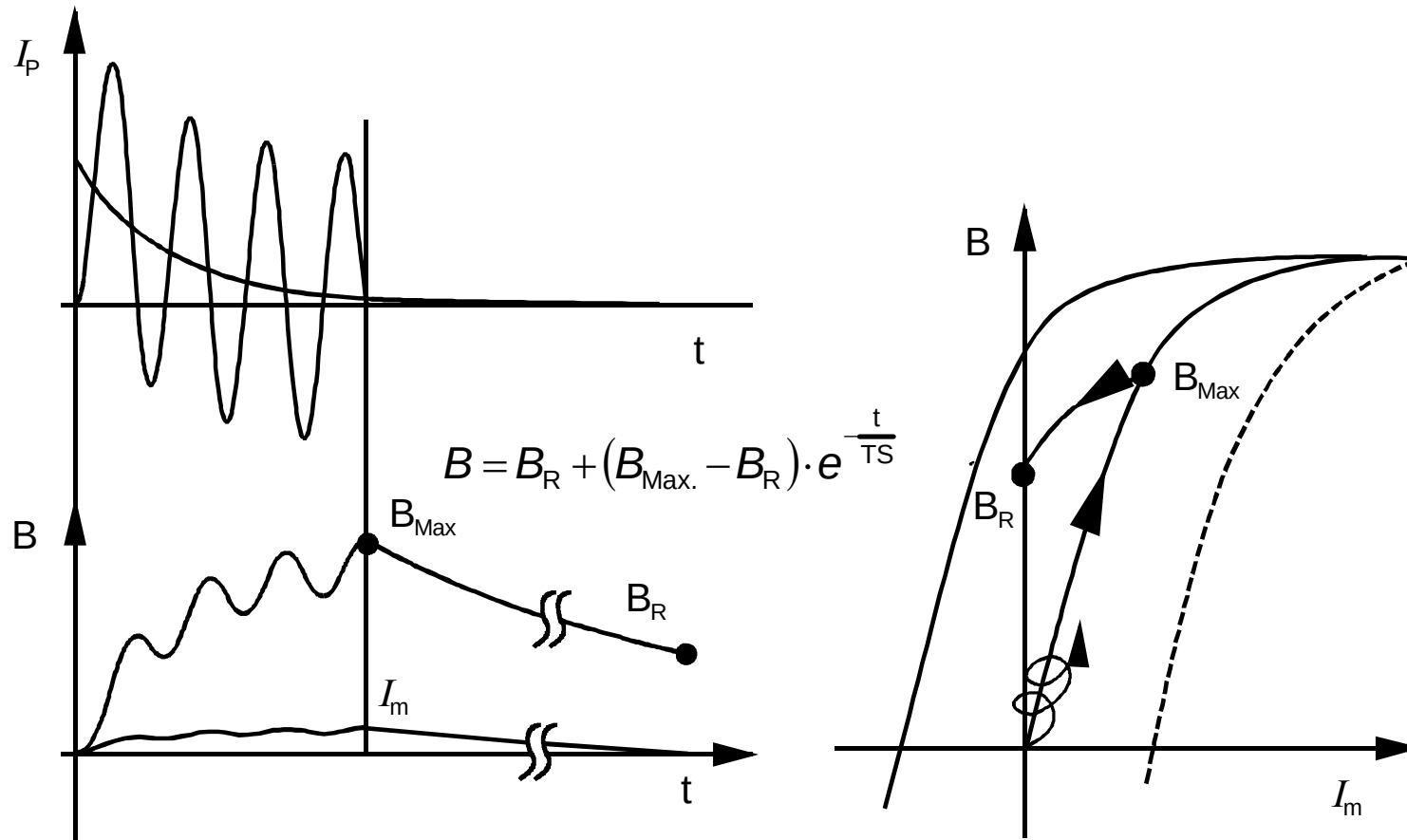
$$K_{TF} = 1 + \omega T_N = 1 + \frac{X_N}{R_N}$$

Factor dimensión
transitoria (sin saturación
durante el tiempo total de
la falla)

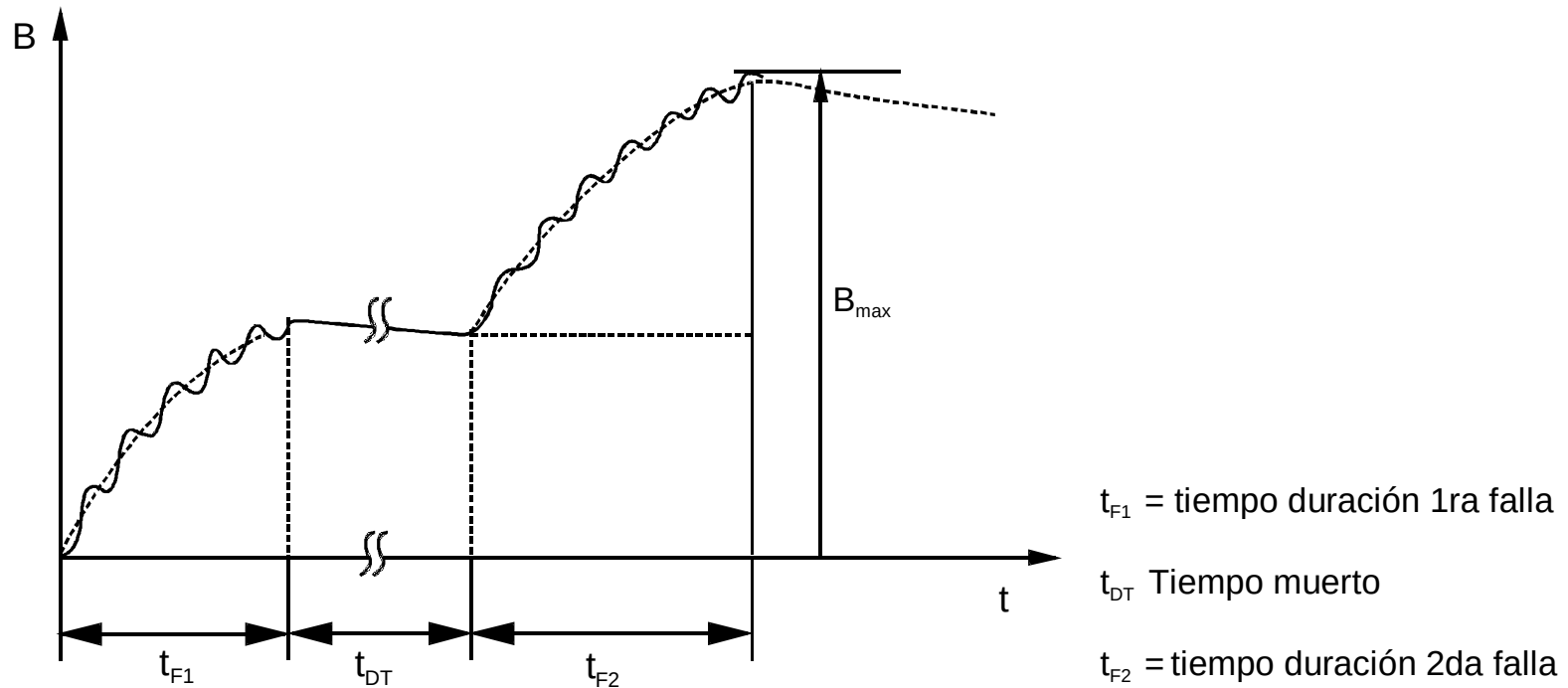
$$K'_{TF} = 1 + \omega T_N \cdot \left(1 - e^{-\frac{t_M}{T_N}}\right)$$

Factor dimensión
transitoria para
saturación límite sin el
tiempo t_M

Magnetización y des-magnetización

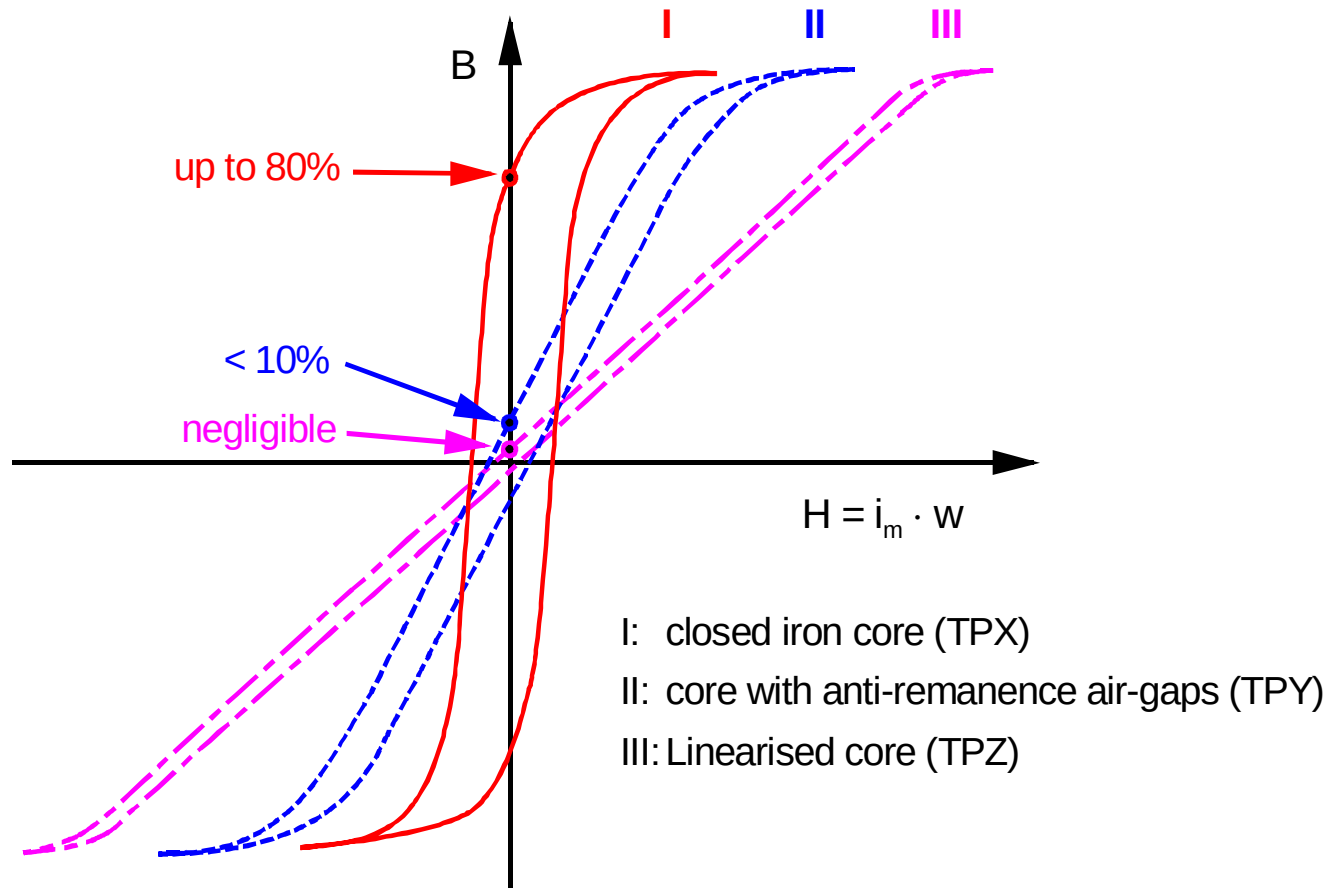


Comportamiento del flujo magnético en el caso de recierre no exitoso



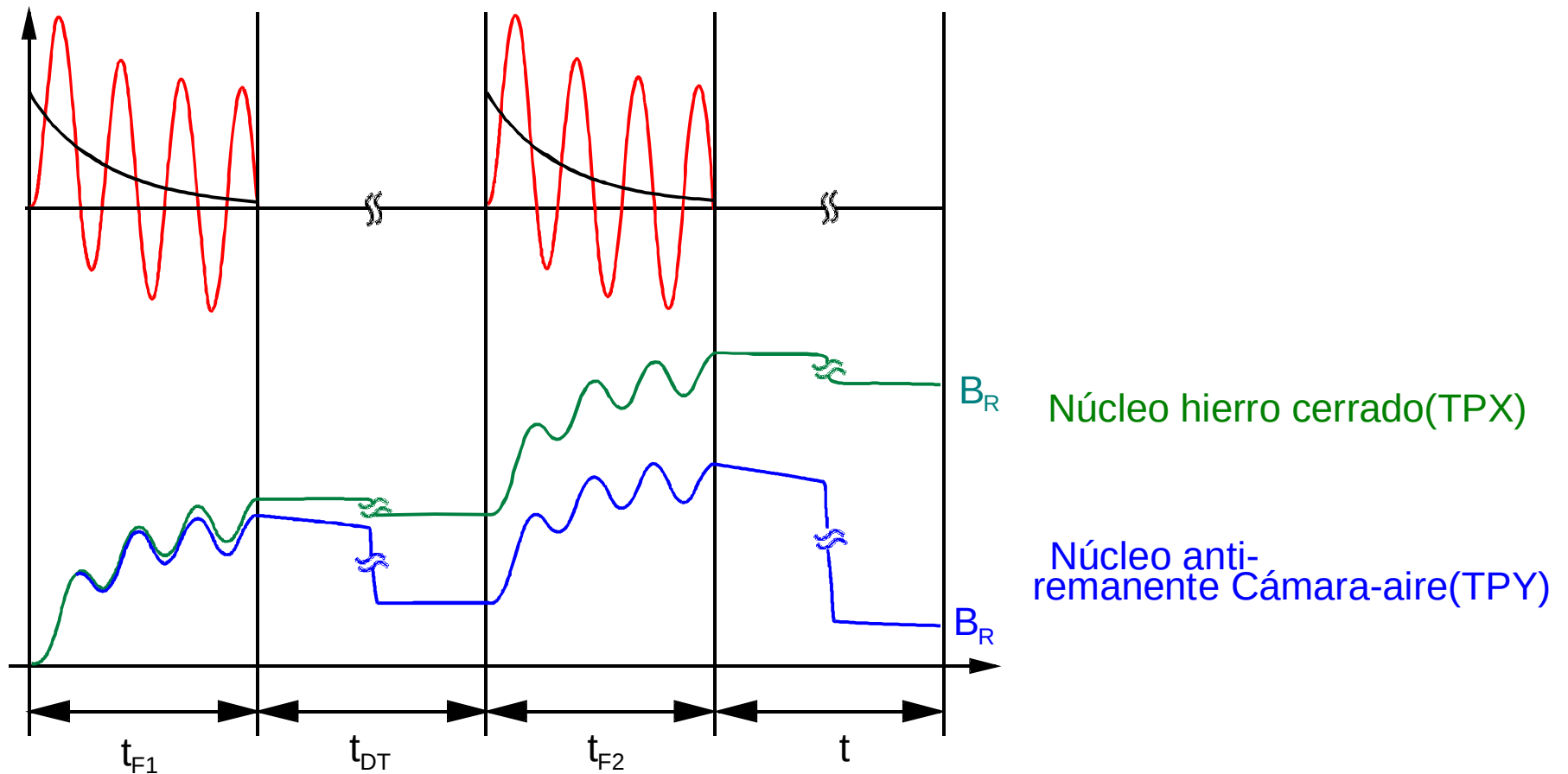
$$\frac{B_{max}}{\hat{B}_{\sim}} = \left[1 + \frac{\omega \cdot T_N \cdot T_S}{T_N - T_S} \left(e^{-\frac{t_{F1}}{T_N}} - e^{-\frac{t_{F1}}{T_S}} \right) \right] \cdot e^{-\frac{t_{DT} + t_{F2}}{T_S}} + \left[1 + \frac{\omega \cdot T_N \cdot T_S}{T_N - T_S} \left(e^{-\frac{t_{F2}}{T_N}} - e^{-\frac{t_{F2}}{T_S}} \right) \right]$$

Curva de magnetización y punto de remanencia

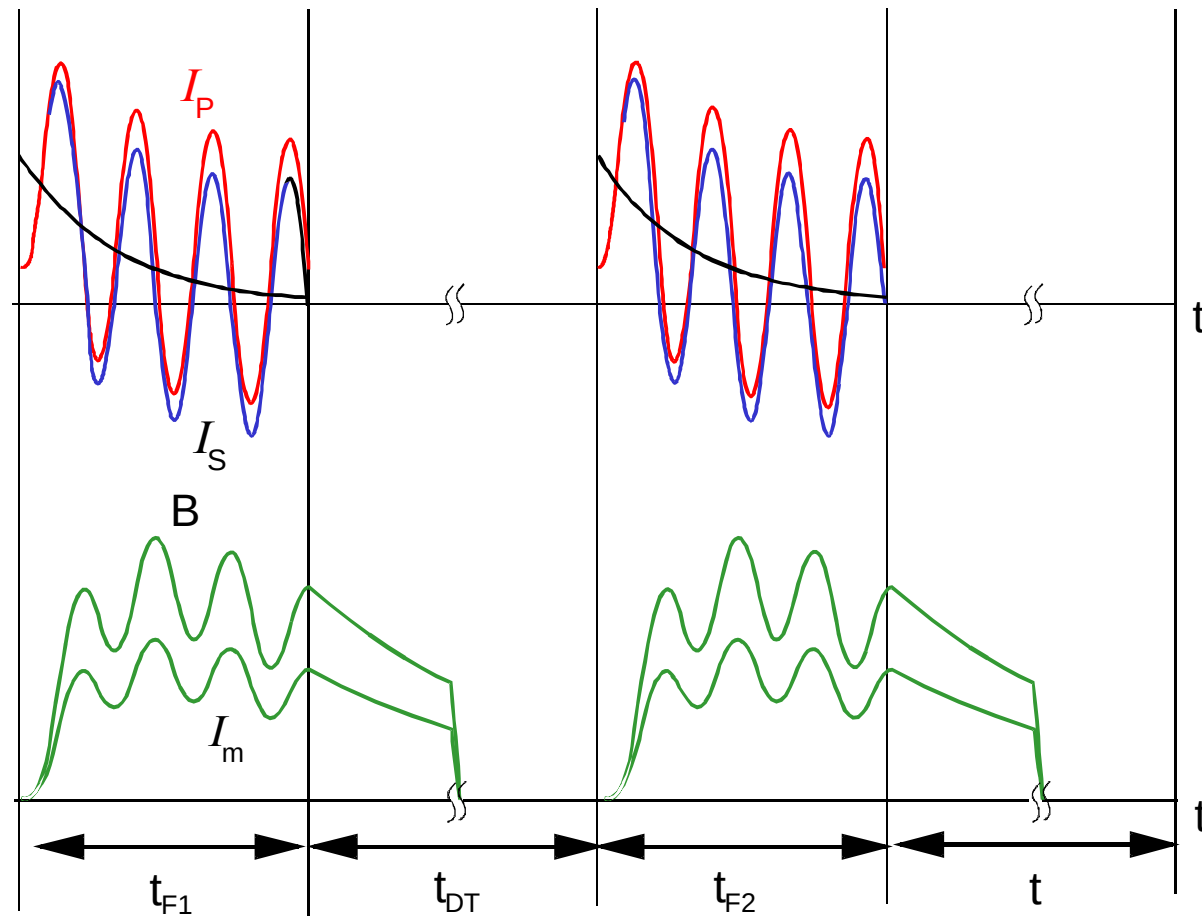


Transformador Corriente TPX y TPY

Flujo magnético con autorecierre no exitoso



Transformador Corriente con núcleo lineal (TPZ), Flujo magnético con autorecierre no exitoso



Estándares Transformadores de voltaje

Clases de TV según IEC 60044-3

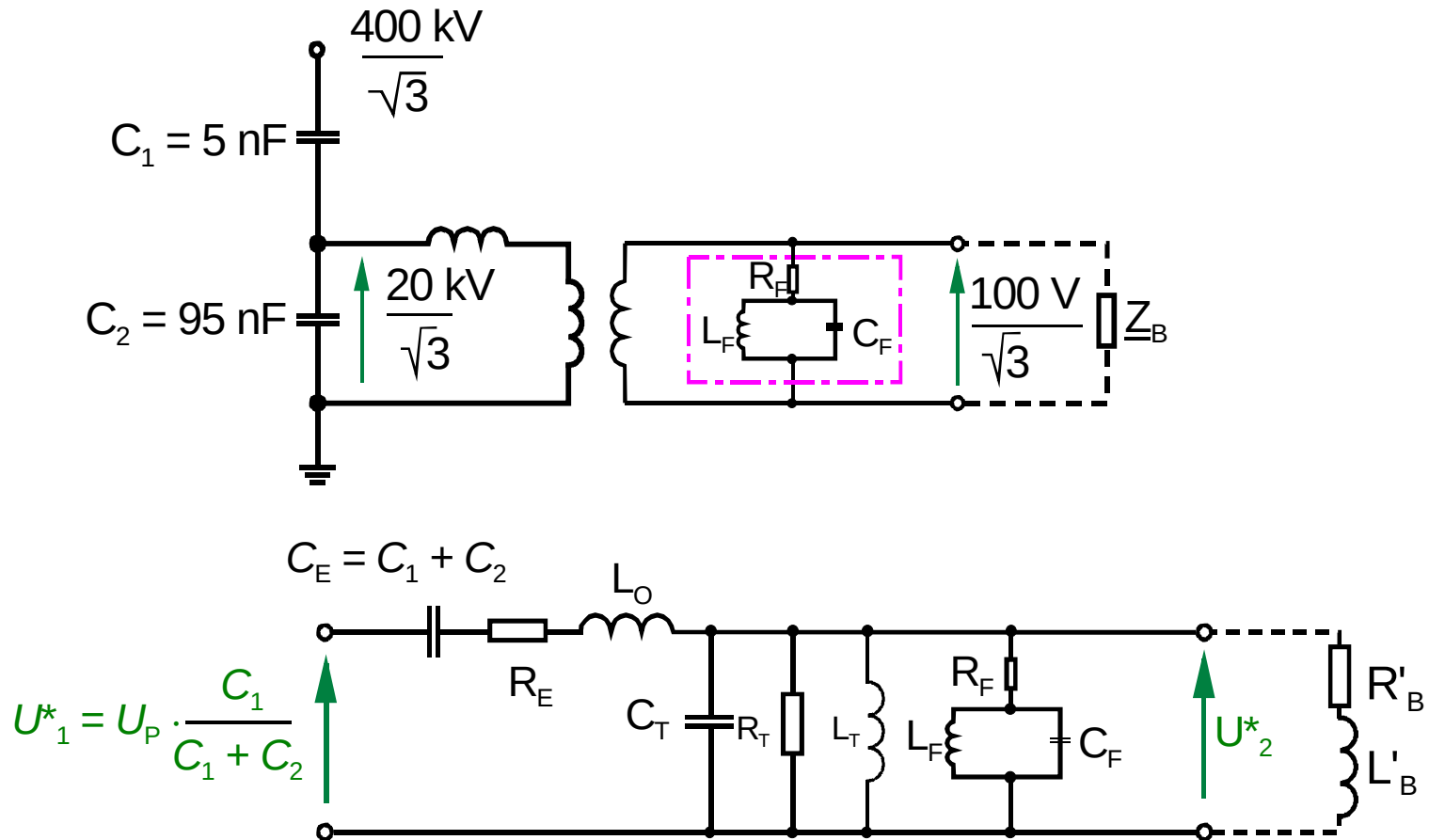
Clases	Error permisible en $0.05 \cdot U_N$ y $1.0 \cdot U_N$	
	Error voltaje F_U	Error ángulo δ
3P	$\pm 3.0 \%$	120 minutos
5P	$\pm 6.0 \%$	240 minutos

TVs especificado Clase P también debe cumplir una clase de medida.

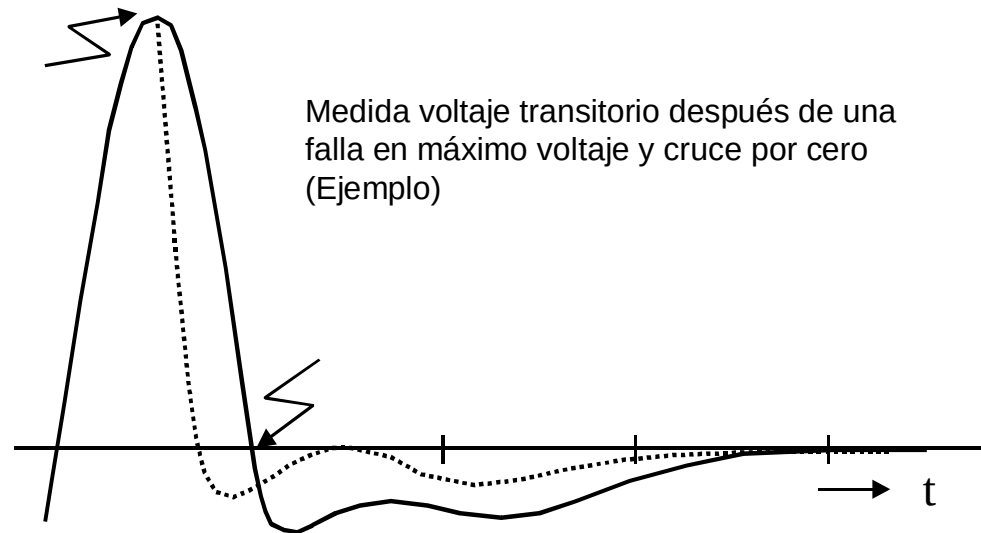
TV clase de medida

Clases	Error voltaje permisible en %	Error ángulo permisible en minutos
	en $1.0 \cdot U_N$	en $1.0 \cdot U_N$
0,	0,1	5
0,2	0,2	10
0,5	0,5	20
1	1	40
3	3	Not specified
Comentario: En 2% del rango de voltaje y burdens entre 25% and 100% del rango de burden y $\cos\varphi = 0.8$, el error permisible puede duplicarse .		

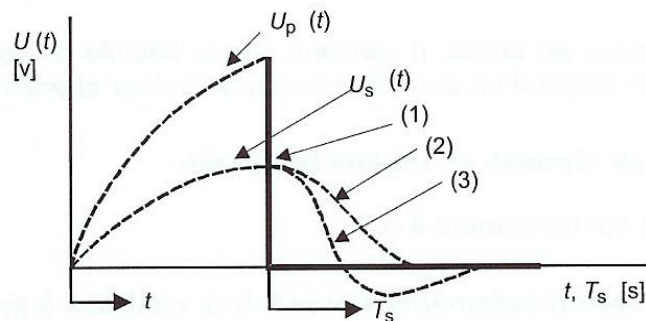
Transformador de voltaje capacitivo, Circuito equivalente



Comportamiento transitorio de los TVCs, Recomendaciones de IEC 60044-5



Tiempo T_s in ms	Relación $\frac{U_s(t)}{\sqrt{2} \cdot U_s} \cdot 100\%$		
	Clases		
	3PT1 6PT1	3PT2 6PT2	3PT3 6PT3
10	---	≤ 25	≤ 4
20	≤ 10	≤ 10	≤ 2
40	≤ 10	≤ 2	≤ 2
60	≤ 10	≤ 0.6	≤ 2
90	≤ 10	≤ 0.2	≤ 2



Recomendaciones IEC 60044-5

Dimensionamiento del TC

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

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

Burden nominal TC:

Burden interno del TC:

$$P_{BN} = R_{CT} \times I_{2N}^2$$

Burden conectado:

$$P_B = R_B \times I_{2N}^2$$

$R_B = R_{CT} + R_C + R_R$ = burden resistivo

R_C = resistencia del cableado

R_R = burden del rele de protección

$$\text{con } ALF' \geq K_{OD} \cdot \frac{I_{S.C.}}{I_N}$$

Teórico:

Sin saturación durante el
Tiempo de cortocircuito: $K'_{TF} = \frac{B_{Max}}{\hat{B}} = 1 + \omega T_N = 1 + \frac{X_N}{R_N}$

$$K_{OD} \geq K_{TF} \cdot K_{Rem}$$

Sin saturación para
tiempo t_M :

$$K''_{TF} = \left[1 + \frac{\omega \cdot T_N \cdot T_S}{T_N - T_S} \left(e^{-\frac{t_M}{T_N}} - e^{-\frac{t_M}{T_S}} \right) \right]$$

$$K_{Rem} = 1 + \frac{\% \text{ Remanencia}}{100}$$

Práctica: Use el K_{TF} -valor recomendado por el fabricante

Requisitos prácticos para el TC

Factor Transitorio de dimensionamiento KTD (Reles Siemens)

Protección
Distancia
7SA6/7SA522

Falla punto inicial	$K_{TD} \geq 2$ (≥ 1 si $T_N < 30\text{ms}$)
Falla en punto límite	$K_{TD} \geq 5$

Protección
Diferencial de
Transformador
7UT6

Durante la falla $K_{TD} \geq 5$

Consultar los manuales y guías de aplicación de los fabricantes de relés verificando así recomendaciones específicas para el dimensionamiento del TC!

Protección
Diferencial de
Linea
7SD6/7SD52/53

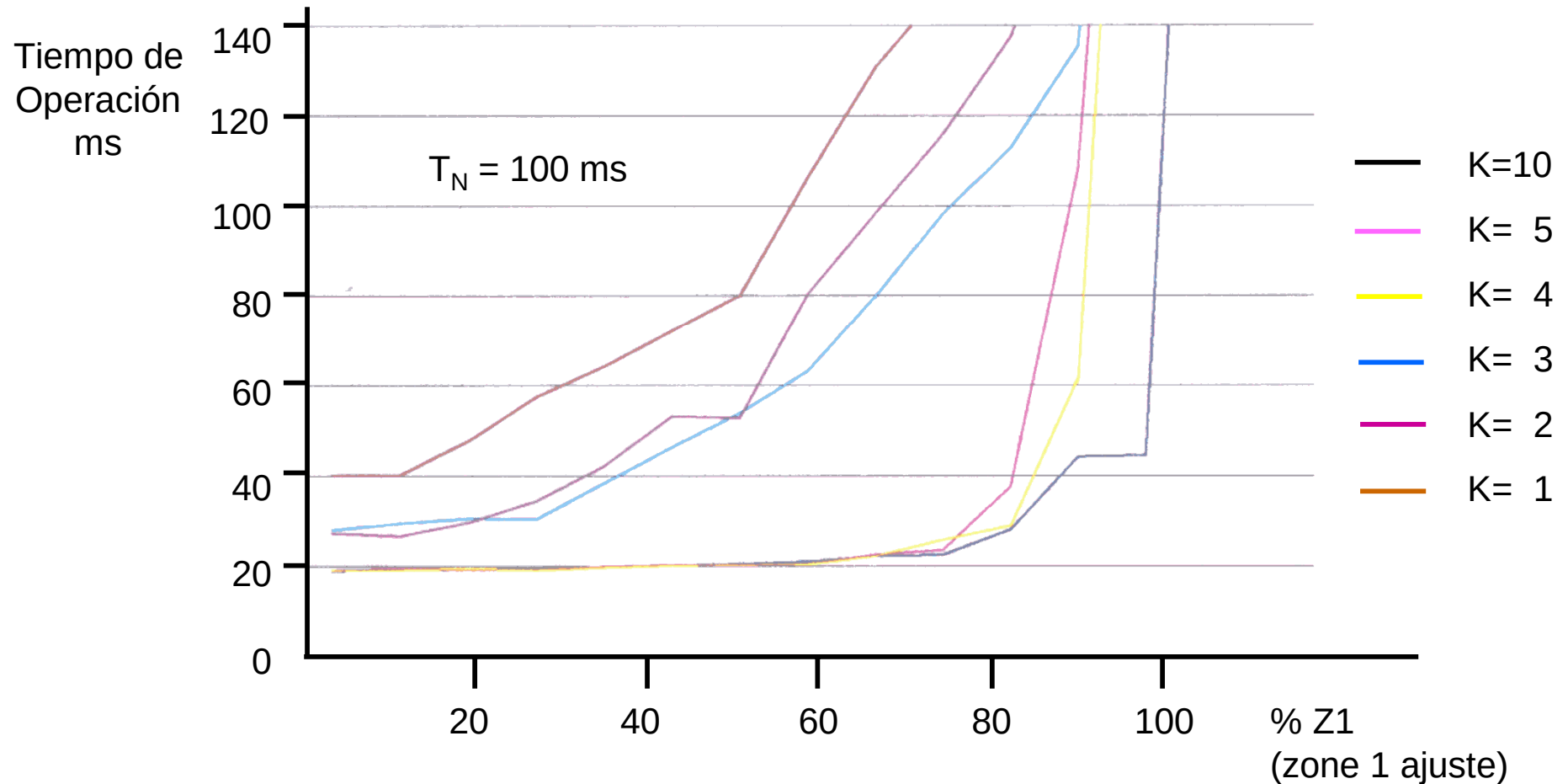
Durante la falla $K_{TD} \geq 1.2$

Protección
Diferencial de
Barra 7SS52

Durante la falla $K_{TD} \geq 0.5$

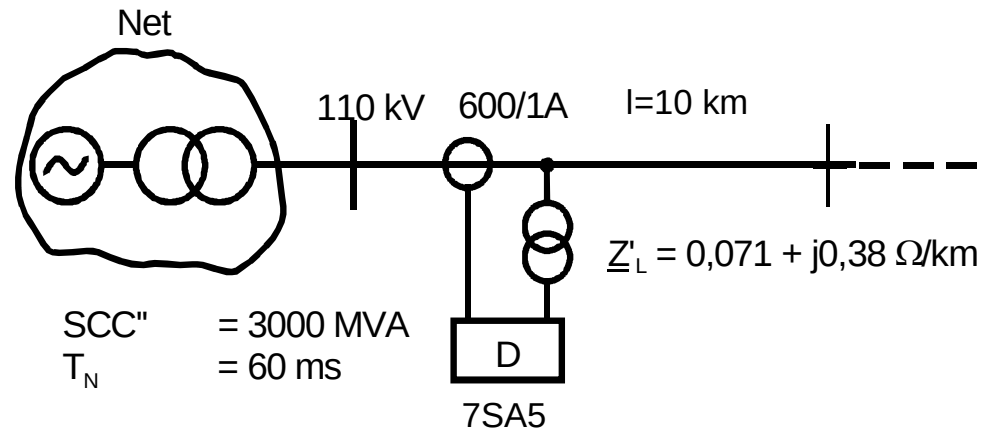
7SA6 / 7SA522: Tiempo operativo del TC en saturación

Influencia del dimensionamiento del TC en la operación del rele



Dimensionamiento del TC para protección de distancia

Ejemplo de cálculo (1)



Dado:

Configuración de línea, tal como la figura

TCs: 600/1

Longitud cableado al rele: 80 m total, área transversal 2,5 mm² Cu

Determinar:

1. Factor Límite de Precisión nominal para los TCs (Tipo TPX, 5P, 30 VA)
2. Factor Límite de Precisión nominal cuando el auto-recierre considera el ciclo CO-CO (tiempo de operación del interruptor: 60 ms, tiempo muerto: 0.4 s.)

Dimensionamiento del TC para protección de distancia

Ejemplo de cálculo (2)

Condición 1): Falla al 0,1% de la línea sin AR

La máxima corriente de cortocircuito es:

$$I_{S.C.-max.} = \frac{SCC}{1.1 \cdot \sqrt{3} \cdot U_N} = \frac{3000 \text{ MVA}}{1.1 \cdot \sqrt{3} \cdot 110} = 14.4 \text{ kA}$$

$$T_N = 60 \text{ ms}$$

Para el rele 7SA5 y $T_N = 60 \text{ ms}$: $K_{TF}=2$.
De esta manera:

$$ALF' = 2 \cdot \frac{14400}{600} = 48$$

El TC debe ser diseñado para la condición 2)!

Condición 2): Falla al final de la línea sin AR

La impedancia de falla es:

$$X_s \approx Z_s = \frac{1.1 \cdot U_s}{\sqrt{3} \cdot I_s} = \frac{1.1 \cdot 110 \text{ kV}}{\sqrt{3} \cdot 14.4 \text{ kA}} = 4.85 \Omega$$

$$R_s = \frac{X_s}{\omega \cdot T_N} = X_s \cdot \frac{R_s}{X_s} = \frac{4.85}{377 \cdot 0.06} = 0.214 \Omega$$

Falla en el límite (85% long. De línea):

$$X_L = 0.85 \cdot 10 \cdot 0.38 = 3.23 \Omega$$

$$R_L = 0.85 \cdot 10 \cdot 0.071 = 0.60 \Omega$$

De tal forma que la corriente de falla es:

$$I_{F-\text{límitede línea}} = \frac{1.1 \cdot U_N / \sqrt{3}}{Z_s + Z_L} \approx \frac{1.1 \cdot U_N / \sqrt{3}}{\sqrt{(X_s + X_L)^2 + (R_s + R_L)^2}}$$

$$= \frac{1.1 \cdot 110 / \sqrt{3}}{\sqrt{(4.85 + 3.23)^2 + (0.214 + 0.60)^2}} = 8.6 \text{ kA}$$

Para el rele 7SA5 : $K_{TF}=5$.
De manera que:

$$ALF' = 5.0 \cdot \frac{8600}{600} = 71.7$$

CT dimensioning for distance protection (3)

Calculation example: Usual Design

Cálculo del Factor Límite de Precisión(ALF):

Resistencia del cableado desde el TC al rele:

$$R_L = 2 \cdot \frac{\rho \cdot l}{Q} = \frac{0.0179 \cdot 80}{2.5} = 1.15 \Omega$$

Burden del rele 7SA5: $R_R = 0.1 \Omega$

Burden Total: $R_B = R_L + R_R = 1.25 \Omega$

Finalmente se tiene que el Factor Límite de Precisión :

$$ALF \geq \frac{3 + 1.25}{3 + 15} \cdot 71.7 = 16.9 \quad \text{Chosen: } n=20$$

Donde la especificación completa del TC es:

5P20, 15 VA, $R_{CT} \leq 3 \text{ Ohm}$

Observación:

Para el cálculo de R_L , la doble longitud del cable de conexión de corriente secundaria (de un lado a otro) se tuvo en cuenta. Además se asumió que las corrientes de cortocircuito monofásica y trifásica eran de valor aproximado.

Cuando la corriente monofásica de cortocircuito es significativamente baja, el cálculo debe hacerse por separado para ambos tipos de falla.

- El cortocircuito trifásico con la longitud sencilla del cable de conexión.
- La falla monofásica con la longitud doble del cable de conexión.