

PROTECCIÓN DE INSTALACIONES FRENTE A SOBREINTENSIDADES Y SOBRETENSIONES

CONCEPTOS BÁSICOS

CIRCUITO

INTENSIDAD DE EMPLEO I_e

INTENSIDAD DE DISEÑO I_B

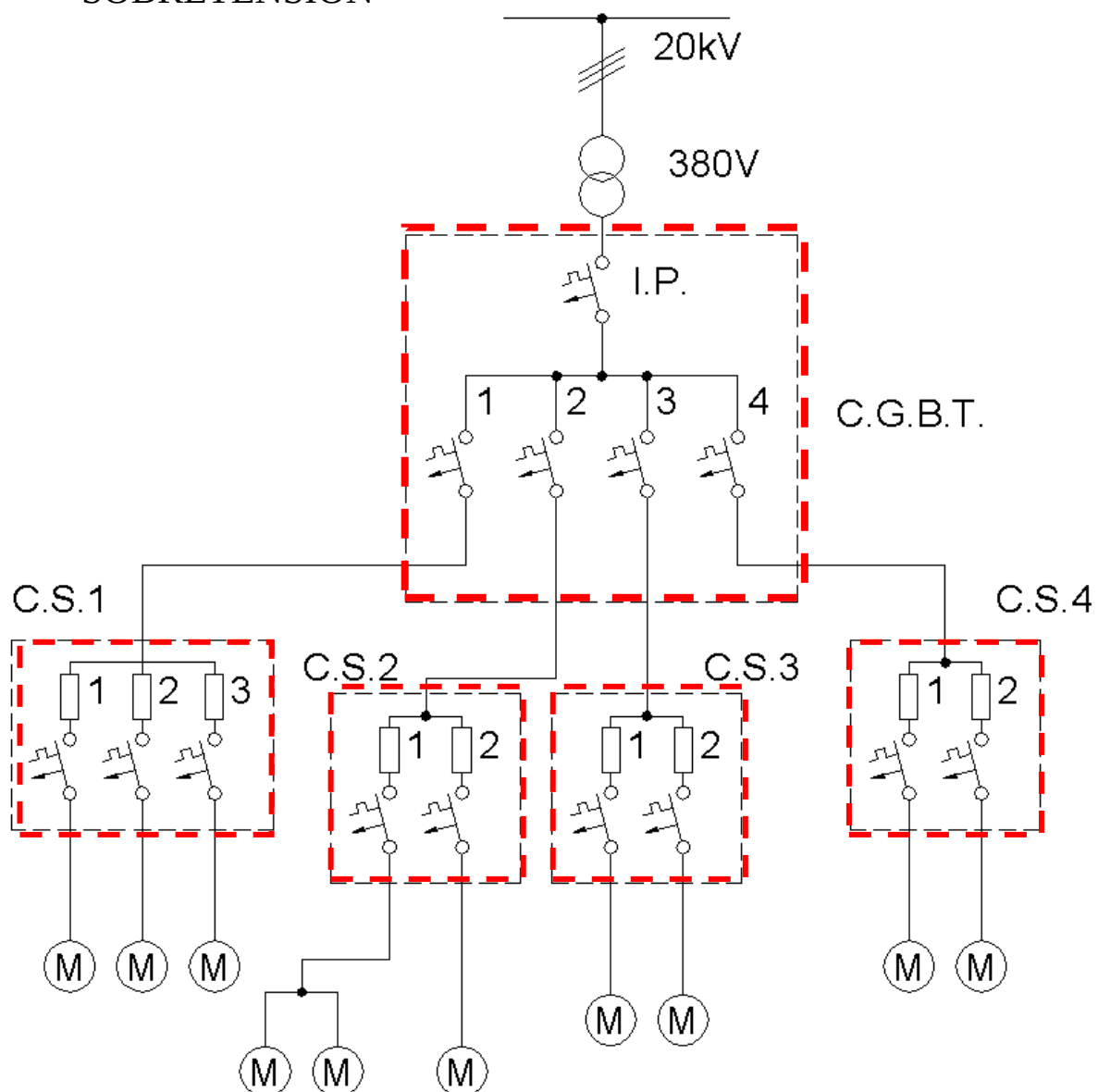
INTENSIDAD ADMISIBLE I_Z

SOBREINTENSIDAD

CORRIENTE DE SOBRECARGA

CORRIENTE DE CORTOCIRCUITO

SOBRETENSIÓN



NORMATIVA

MIE BT 020

UNE 20 460, parte 4-43 y 4-473

PROTECCIÓN CONTRA SOBRECARGAS

Tipos de sobrecarga

- SOBRECARGAS PREVISIBLES (MOMENTÁNEAS) ? Diseño adecuado de la instalación

ej: Arranque de un motor, fases de un proceso

- SOBRECARGAS NO PREVISIBLES ? ACTUACIÓN PROTECCIONES

ej: Averías (cojinetes motor, máq. accionada, exceso de consumo

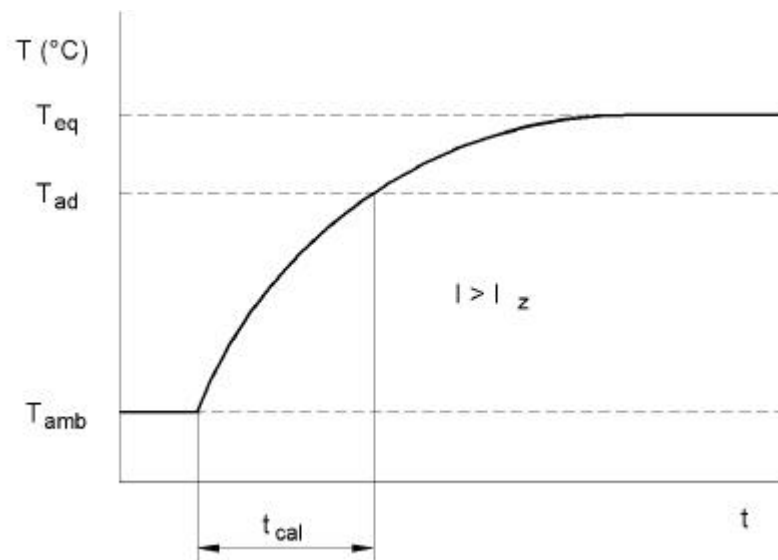
Efectos de las sobrecargas

Si $I > I_Z$? $T_c > T_{adm}$? propiedades dieléctricas y mecánicas se degradan, hasta producir defectos de aislamiento

Valores de las temperaturas máximas admisibles en cables aislados, en servicio continuo y en cortocircuito, según UNE 20-460. Los valores entre paréntesis son los indicados en el Reglamento de Baja Tensión.

Aislamiento	T_{AD} (°C) (Servicio cont.)	T_{MAX} (°C) (Cortocircuito)
Policloruro de vinilo	70 (75)	160
Polietileno Reticulado Butil Etilenopropileno	90 (90)	220

FUNDAMENTO DE LA PROTECCIÓN FRENTE A SOBRECARGAS



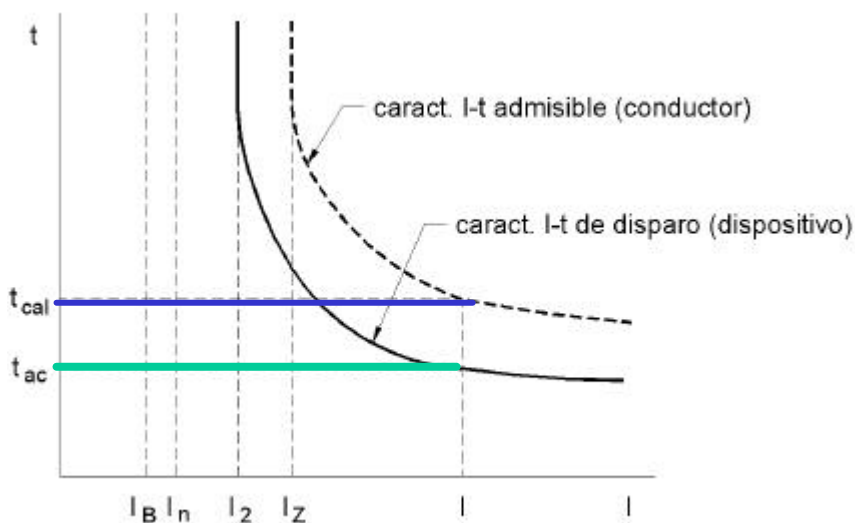
T_{eq} : Temperatura equilibrio

T_{ad} : Temperatura admisible

t_{cal} : tiempo calentamiento

t_{ac} : tiempo actuación

Protección efectiva ? $t_{ac} < t_{cal}$



I_n : Int. nominal disp. de protección.

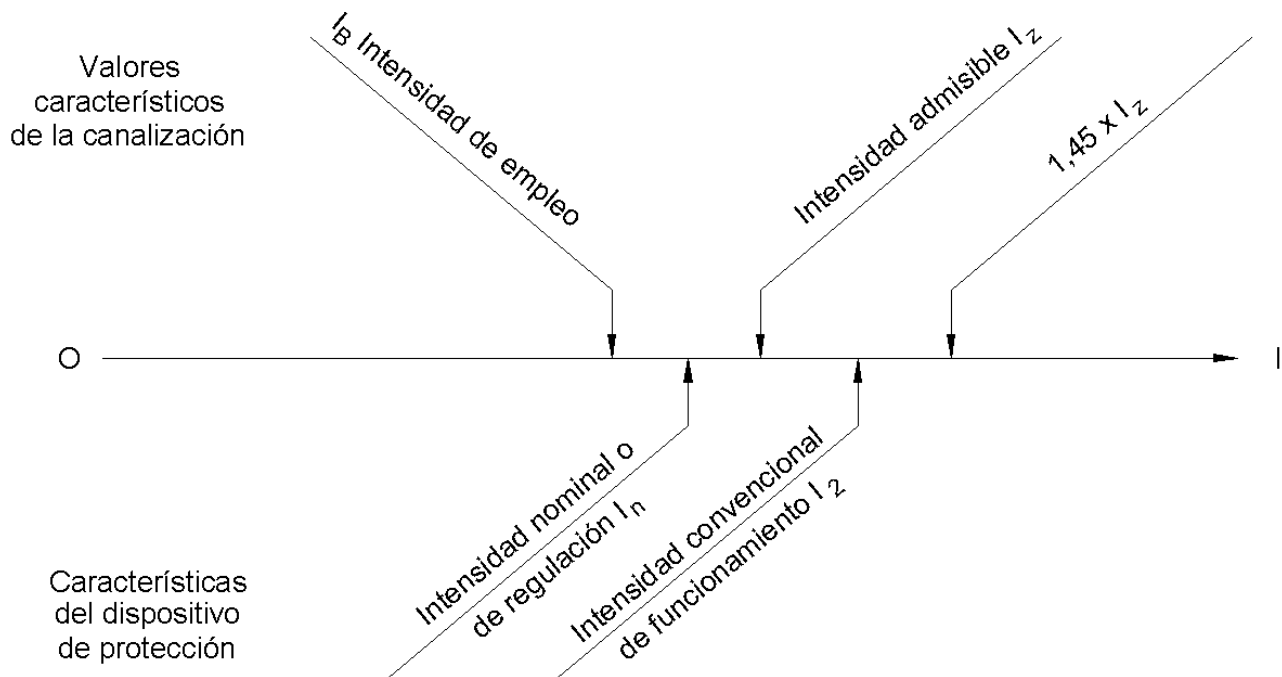
I_2 : Int. convencional de funcionamiento (disparo garantizado)

DISPOSITIVOS DE PROTECCIÓN ADMITIDOS

- Interruptor magnetotérmico.
- Interruptor automático con disparador directo de sobreintensidad de tiempo inverso o con disparador indirecto asociado a un relé térmico.
- Fusibles gG (o gL).
- Contactor combinado con relé térmico.

COORDINACIÓN ENTRE INTERRUPTORES Y DISPOSITIVOS DE PROTECCIÓN

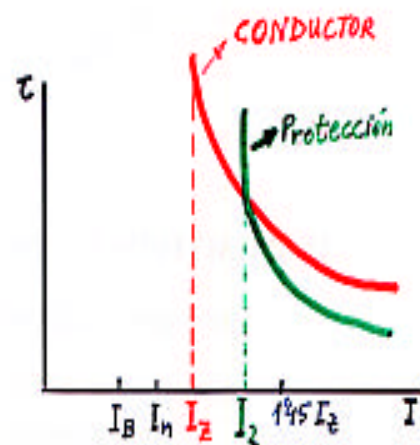
conductor ? ? ? I_B ? I_n ? I_Z
 ?
 protegido ? ? ? I_2 ? $1.45 I_Z$



SOBRECARGAS PELIGROSAS

SOBRECARGAS PELIGROSAS

$I_Z \leq I \leq I_2$
 $\Rightarrow$ INTERESA
 $I_B \leq I_n \leq I_2$
 $I_Z \leq I_2$



Ejemplo 1: Protección de un cable trifásico, de tensión nominal $U_n=750$ V, instalado al aire, y una intensidad de diseño $I_B= 16$ A.

Sección del cable, (tabla 1, MIE BT 017):

$$I_B = 16 \text{ A}, \quad K=1 \quad ? \quad S = 2,5 \text{ mm}^2 \quad ? \quad I_Z = 17 \text{ A}$$

• Protección mediante **fusible**:

$$\text{debe cumplir} \quad I_B \quad ? \quad I_n \quad ? \quad I_2 \quad ? \quad 16 \quad ? \quad I_n \quad ? \quad 17$$

fusible normalizado que cumple esta condición es de 16 A por tratarse de un fusible tipo gG:

$$I_2 = 1,6 \times I_n = 26,6 \text{ A}$$

Por tanto **no** se cumple la condición [3], ya que:

$$1,45 \times I_Z = 24,65 \text{ A} < I_2 \quad ? \quad \text{El fusible de 16 A } \mathbf{no} \text{ protege eficazmente la línea frente a sobrecargas, según la norma UNE 20 460.}$$

Si se quiere efectuar la protección mediante fusible, habría que dimensionar la línea con una sección mayor, por ejemplo $S= 4 \text{ mm}^2$. de este modo:

$$I_Z = 23 \text{ A}$$

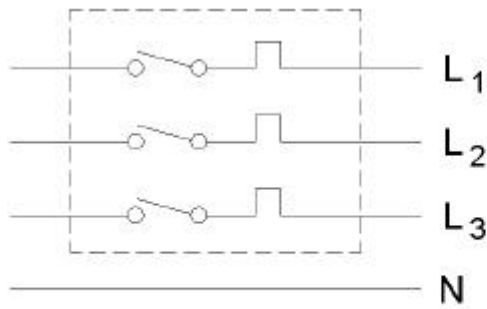
$$1,45 \times I_Z = 33,45 \text{ A} > I_2 \quad ? \quad \text{se cumple la condición [3].}$$

• Protección mediante **interruptor automático**, $S=2,5\text{mm}^2$

magnetotérmico de $I_n=16$ A, se cumple [2].

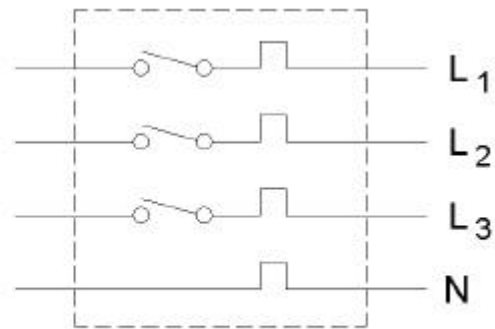
si es normalizado se cumple [3], ya que $I_2=1,45 \times I_n$.

PROTECCIÓN DEL CONDUCTOR NEUTRO



$$S_N = S_f$$

↓
No requiere protección

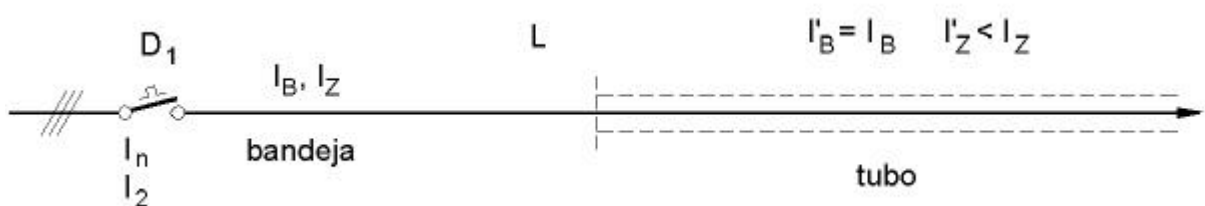


$$S_N < S_f$$

↓
Dispositivo de protección adecuado a la I admisible que dispara el dispositivo de corte de los cond. de fase

SITUACIÓN DE LOS DISPOSITIVOS DE PROTECCIÓN FRENTE A SOBRECARGAS

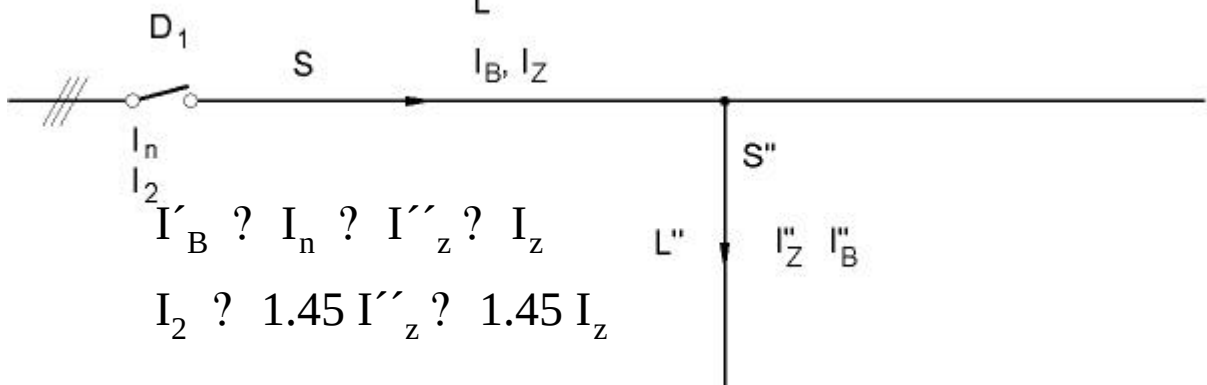
- En el origen de los circuitos
- En los puntos en que disminuye I_Z (int. adm.)
- Excepción: puede omitirse si la parte por debajo del punto de disminución de I_Z está efectivamente protegida por un dispositivo situado antes



$$I_B ? I_n ? I'_z ? I_z$$

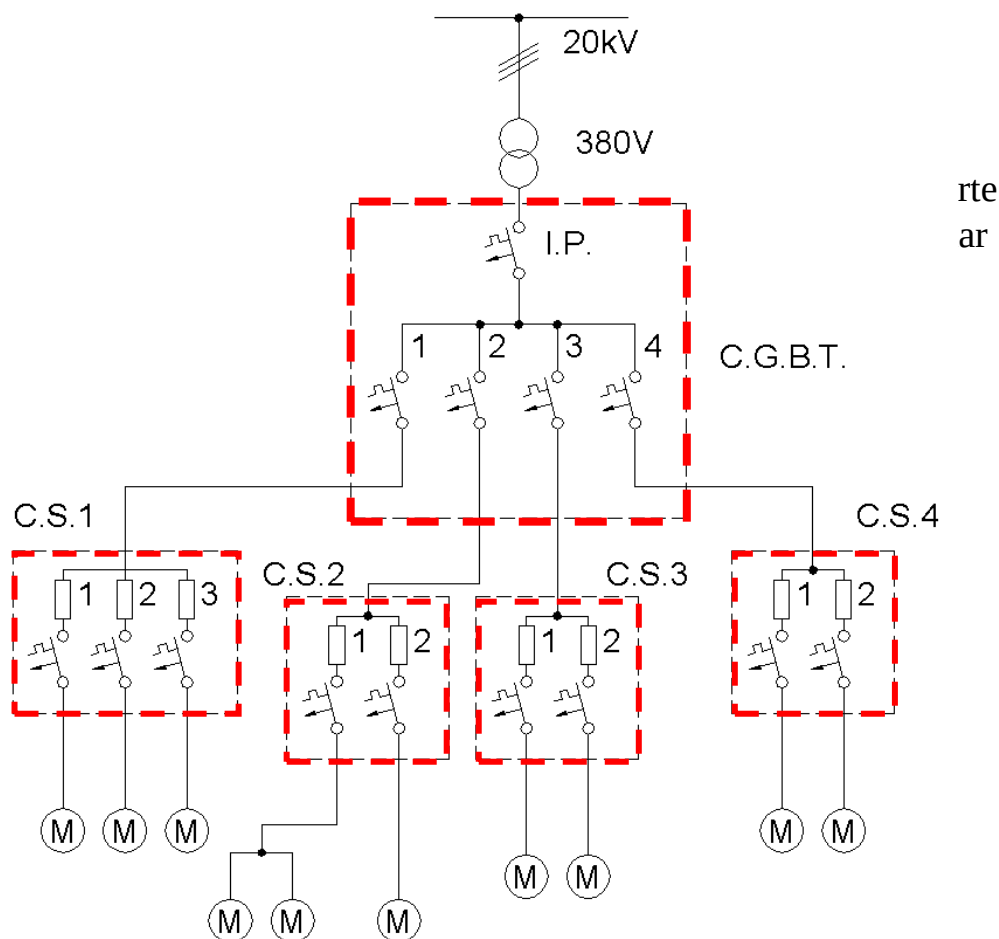
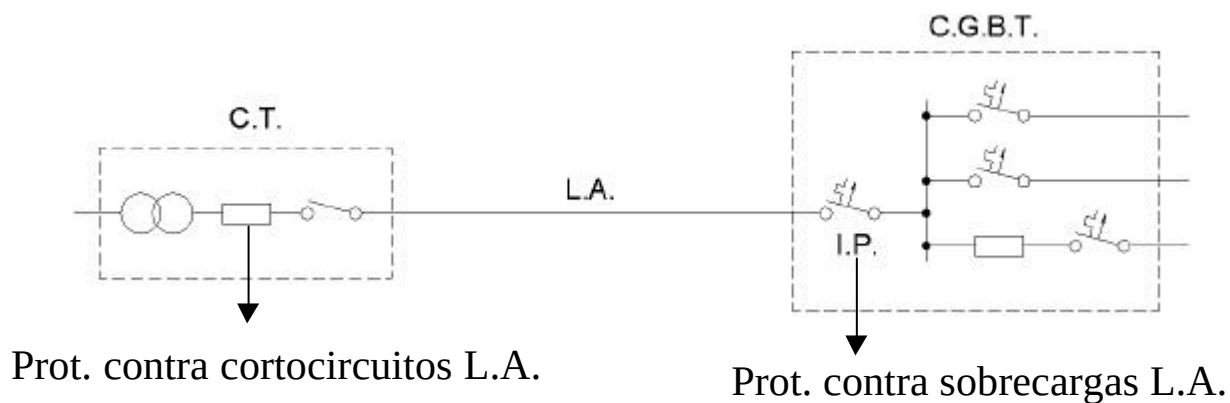
$$I_2 ? 1.45 I'_z ? 1.45 I_z$$

? Línea protegida en toda su longitud



$$I'_B ? I_n ? I''_z ? I_z$$

$$I_2 ? 1.45 I''_z ? 1.45 I_z$$



OMISIÓN DE LA PROTECCIÓN CONTRA SOBRECARGAS POR RAZONES DE SEGURIDAD (UNE 20-460 / 4-473)

En circuitos en los que el corte de la alimentación imprevista puede ser peligroso; ej:

- ctos excitación máq. de c.c.
- ctos de alimentación de electroimanes de elevación.
- ctos 2^{arios} transformadores de intensidad.
- ctos de alimentación de disps. de extinción de incendios.

PROTECCIÓN FRENTE A CORTOCIRCUITOS

Origen de los cortocircuitos

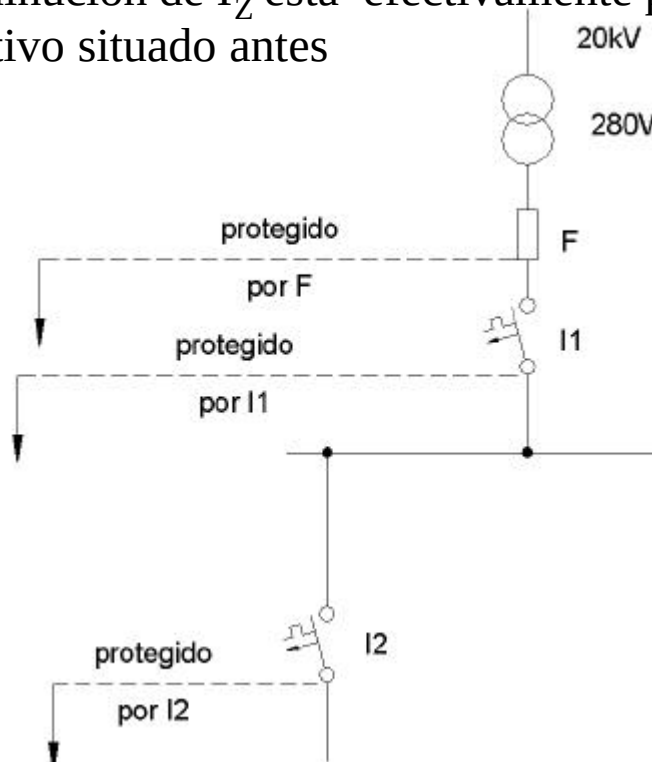
- Fallos puntuales de aislamiento: sobretensión
origen mecánico
- Defectos en las cargas conectadas
- Defectos de conexión de la instalación

Efectos de los cortocircuitos

- Efectos térmicos: $I_{cc} \gg 1000 I_n$ Rápida destrucción del aislamiento en las partes recorridas por I_{cc}
- Efectos electrodinámicos: Rotura de embarrados

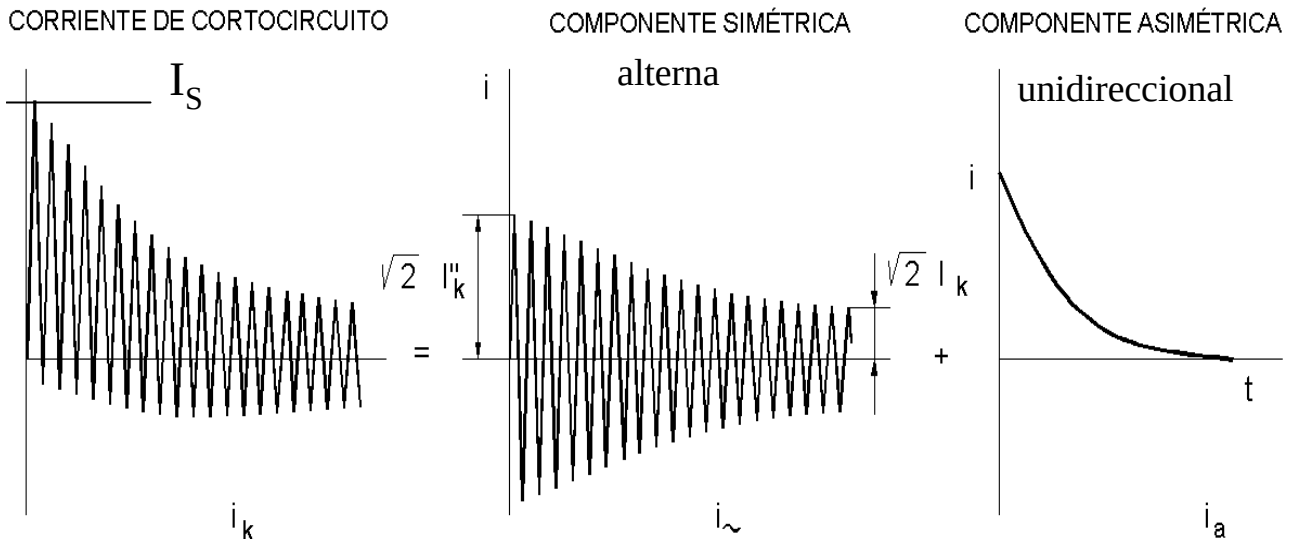
SITUACIÓN DE LOS DISPOSITIVOS DE PROTECCIÓN FRENTE A CORTOCIRCUITOS

- En el origen de los circuitos y en los puntos en que disminuye I_Z (int. adm.)
- Excepción: puede omitirse si la parte por debajo del punto de disminución de I_Z está efectivamente protegida por un dispositivo situado antes



PARÁMETROS CARACTERÍSTICOS DE LAS CORRIENTES DE CORTOCIRCUITO

Caso general



Componentes

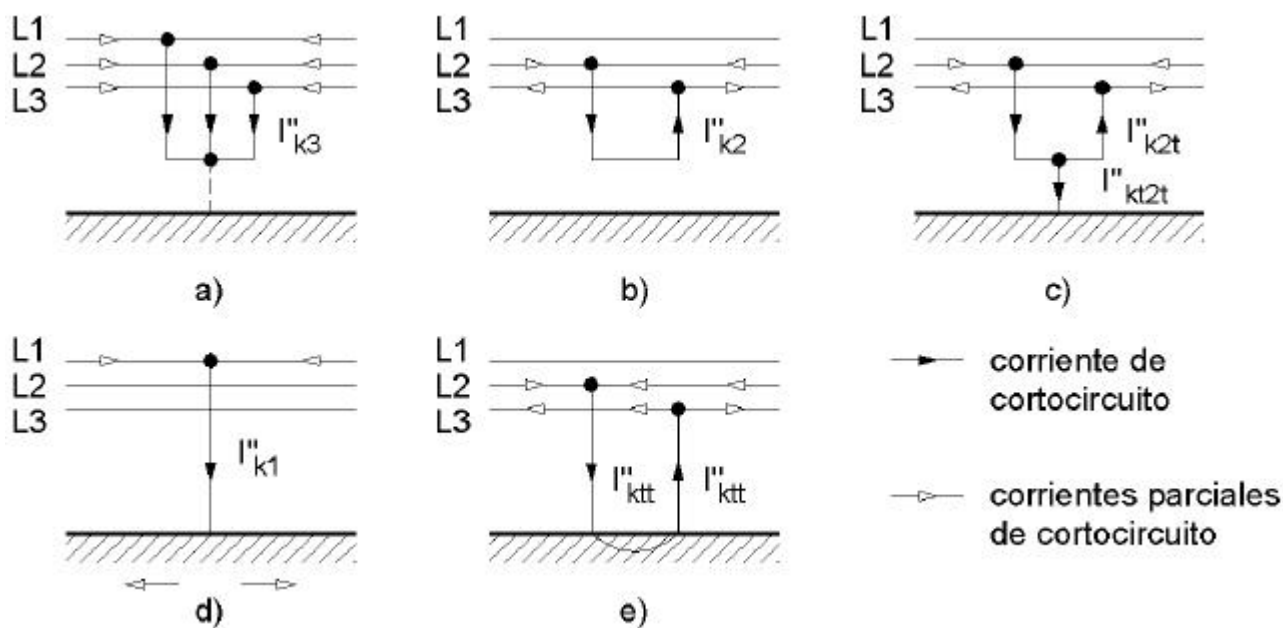
- Componente simétrica $i_{\sim}(t)$ (alterna)
- Componente asimétrica I_a (unidireccional o continua)

Parámetros

- Corriente de cortocircuito $i_k(t)$
- Corrientes parciales de cortocircuito
- Corriente simétrica de cortocircuito $i_{\sim}(t)$
- Corriente Inicial simétrica de cortocircuito I_k''
- Corriente máxima asimétrica de cortocircuito I_s (corriente de cresta)
- Corriente permanente de cortocircuito I_k
- Corriente simétrica de corte I_{sc}
- Potencia de cortocircuito para la corriente inicial simétrica S_k'' (potencia de cortocircuito)

$$S_K'' = \sqrt{3} U_n I_K''$$

TIPOS DE CORTOCIRCUITOS



a) CORTOCIRCUITO TRIPOLAR: mayores corrientes, fácil de analizar, poco frecuente.

b) CORTOCIRCUITO BIPOLAR SIN CONTACTO A TIERRA.

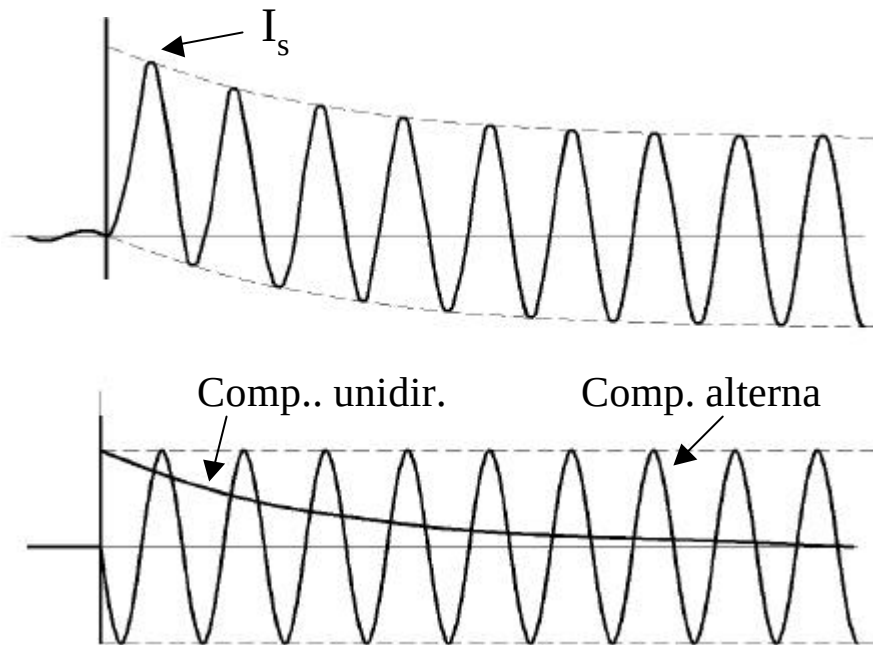
c) CORTOCIRCUITO BIPOLAR CON CONTACTO A TIERRA.

d) CORTOCIRCUITO UNIPOLAR A TIERRA: más frecuente.

e) DOBLE DEFECTO A TIERRA.

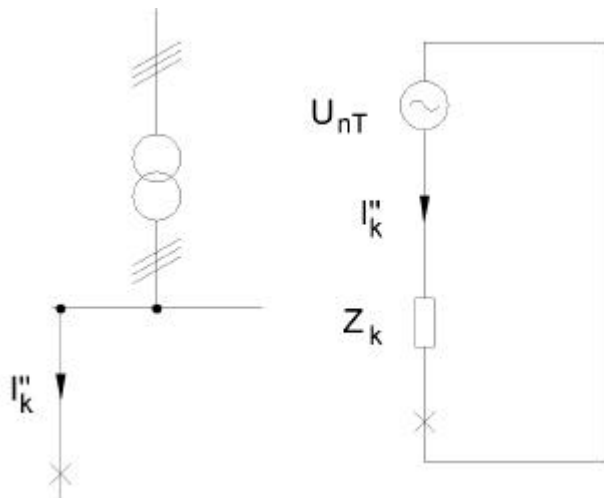
C.C. TRIPOLARES ALIMENTADOS DESDE LA RED

(no hay generadores o motores de potencia elevada próximos)



$$I_k'' \approx I_k \approx I_{sc}$$

CÁLCULO DE LA CORRIENTE INICIAL SIMÉTRICA I_k''

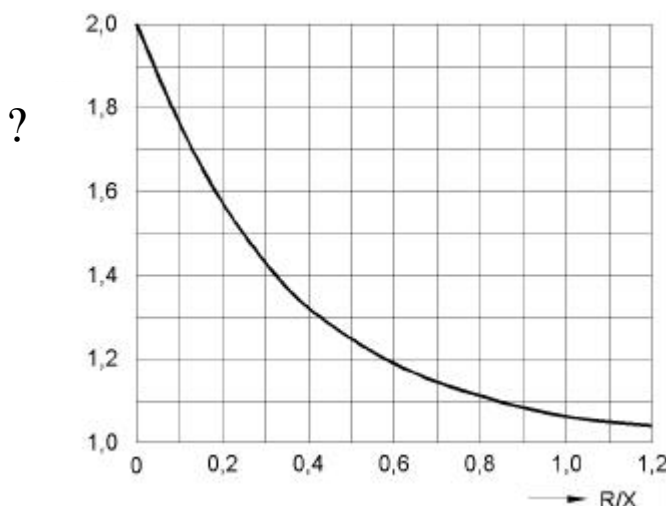


$$I_k'' \approx \frac{U_{nT}}{\sqrt{3} Z_k} \approx I_k \approx I_{sc}$$

U_{nT} tensión nominal transf.

$Z_k = (R_k + j X_k)$
impedancia del circuito de defecto.

CÁLCULO DE LA CORRIENTE MÁXIMA ASIMÉTRICA I_s

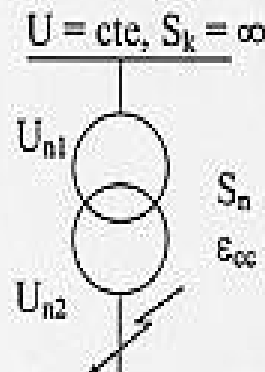


$$I_s = \sqrt{2} \approx I_k''$$

$$f = f(R_k, X_k)$$

Cálculo de la I_{cc} en bornes de un transformador

- Caso $S_k = S_{cc} = \infty$



Ejemplo : $S_n = 1600 \text{ kVA}$, $\epsilon_{cc} = 6\%$, $20.000/380 \text{ V}$

$$I_{k(2^\circ)} = I_{ccp,2^\circ} = \frac{I_{n,2}}{\epsilon_{cc}} = \frac{\frac{1600 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 380}}{0,06} = \frac{2431}{0,06} = 40,51 \text{ kA}$$

$$Z_{cc(2^\circ)} = \epsilon_{cc} \cdot \frac{U_{n,2}^2}{S_n} = 0,06 \cdot \frac{380^2}{1600 \cdot 10^3} = 5,4 \text{ m}\Omega$$

$$I_{k(2^\circ)} = \frac{U_{n,2}}{\sqrt{3} \cdot Z_{cc(2^\circ)}} = \frac{380}{\sqrt{3} \cdot 5,4 \cdot 10^{-3}} = 40,51 \text{ kA}$$

Obsérvese que si $\epsilon_{Rcc}=1\% \rightarrow \epsilon_{Xcc} = \sqrt{36^2 - 1^2} = \sqrt{35} \approx 5,92\%$

Es decir $\epsilon_{Xcc} \approx \epsilon_{cc}$

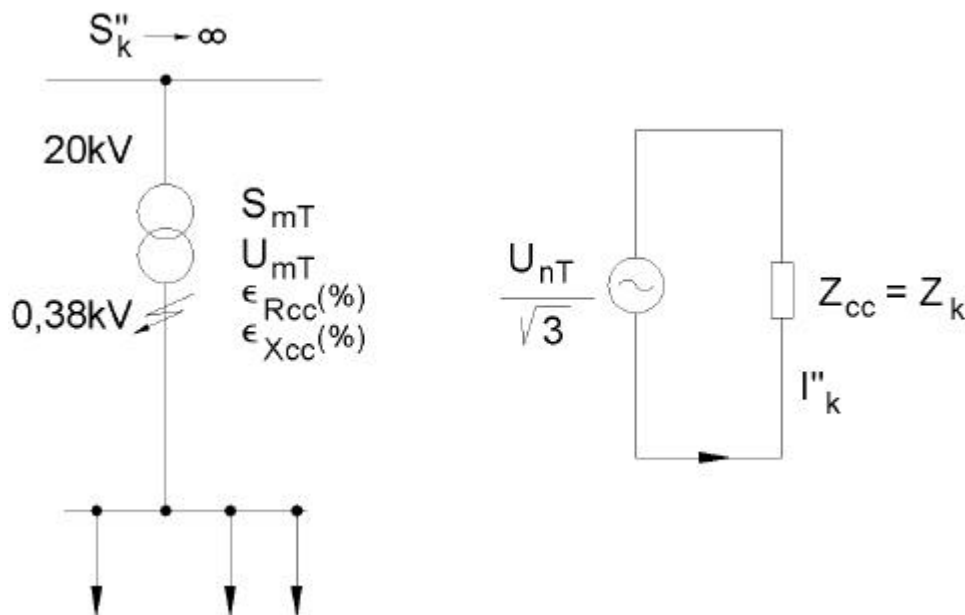
En este caso, salen : $R_{cc} = 0,9 \text{ m}\Omega$, $X_{cc} = 5,382 \text{ m}\Omega$

$$\frac{R}{x} = \frac{1}{5,92} = 0,17 \rightarrow \chi = 1,62$$

$$I_s = I_{max,cc} = \chi \cdot \sqrt{2} \cdot I_k = 1,62 \cdot \sqrt{2} \cdot 40,5 \approx 93,2 \text{ kA}$$

C.C. EN BORNES DEL TRANSF. (B.T.) SUPONIENDO RED DE M.T. DE POTENCIA INFINITA

- Aproximación usual ? I''_k, I_s ligeramente mayores



Datos:

S_{nT} : Potencia nominal del Transformador (kVA).

U_{nT} : Tensión nominal secundaria (V).

$\%R_{cc}$: Componente resistiva de la c.d.t.

$\%X_{cc}$: Componente inductiva de la c.d.t.

Cálculo de la **impedancia de cortocircuito del transformador**

$$R_{cc} = \frac{\%R_{cc}}{100} \frac{U_{nT}^2}{S_{nT}} \quad (m\Omega) \quad ?$$

$$X_{cc} = \frac{\%X_{cc}}{100} \frac{U_{nT}^2}{S_{nT}} \quad (m\Omega) \quad ?$$

$$Z_{cc} = \sqrt{R_{cc}^2 + X_{cc}^2} \quad (m\Omega) \quad ?$$

Cálculo de la **impedancia de defecto:**

$$Z_k = Z_{cc} \quad R_k = R_{cc} \quad X_k = X_{cc}$$

Cálculo de I''_k e I_s

$$I''_k = \frac{U_{nT}}{\sqrt{3} Z_k} \quad I_k = I_{sc} \quad I_s = \sqrt{2} I''_k$$

en este caso I''_k se puede calcular:

I_{nT} corriente nominal del transf.

$\%_{cc}$ c.d.t. cortocircuito.

$$I''_k = \frac{100 I_{nT}}{\%_{cc}}$$

Ejemplo 4: Cálculo de las corrientes de cortocircuito en bornes de un transformador de distribución de potencia $S_n = 1.600$ kVA, relación 20/0,38 kV, y caídas de tensión porcentuales en cortocircuito $\%R_{cc}=1$, $\%X_{cc}=6$.

$$R_{cc} = \frac{1}{100} \frac{380^2}{1.600} = 0,905 \text{ m}\Omega$$

$$X_{cc} = \frac{6}{100} \frac{380^2}{1.600} = 5,415 \text{ m}\Omega$$

$$Z_k = \sqrt{0,905^2 + 5,415^2} = 5,49 \text{ m}\Omega$$

$$I_k'' = \frac{380}{\sqrt{3} \cdot 5,49} = 39,9 \text{ kA}$$

$$R_k / X_k = 1/6 \quad ? \quad ? = 1,65$$

$$I_s = \sqrt{2} \cdot 1,65 \cdot 39,9 = 90,28 \text{ kA}$$

Ejemplo 5: Cálculo de la corriente de cortocircuito en bornes del transformador del ejemplo 4, considerando la impedancia de la red de distribución de 20 kV; se supone $S_k'' = 350$ MVA.

$$R_{cc} = 0,905 \text{ m}\Omega$$

$$X_{cc} = 5,415 \text{ m}\Omega$$

$$Z_{cc} = 5,490 \text{ m}\Omega$$

$$Z_L = 1,1 \cdot \frac{380^2}{1000 \cdot 350} = 0,454 \text{ m}\Omega$$

$$X_L = 0,995 \cdot 0,454 = 0,451 \text{ m}\Omega$$

$$R_L = 0,1 \cdot 0,451 = 0,045 \text{ m}\Omega$$

} Referidos 2º

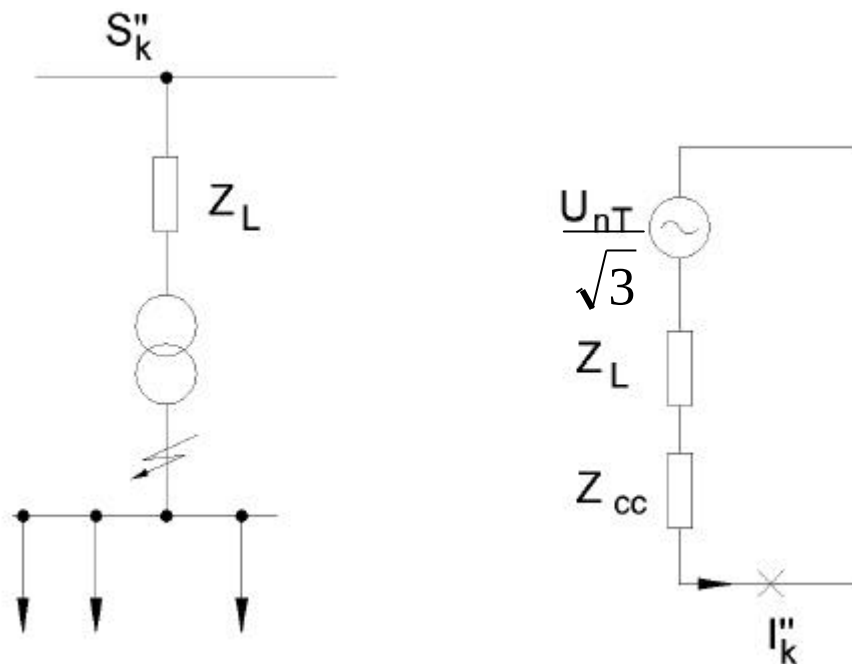
$$Z_k = \sqrt{(0,045 + 0,905)^2 + (0,451 + 5,415)^2} = 6,016 \text{ m}\Omega$$

$$I_k'' = I_k = \frac{380}{\sqrt{3} \cdot 6,016} = 36,47 \text{ kA}$$

$$R_k / X_k = (0,045 + 0,905) / (0,451 + 5,490) = 0,16 \quad ? \quad ? = 1,6$$

$$I_s = \sqrt{2} \cdot 1,6 \cdot 36,47 = 82,52 \text{ kA}$$

C.C. EN BORNES DEL TRANSF. CONSIDERANDO LA IMPEDANCIA DE LA RED DE M.T.



Datos:

Transformador: S_{nT} , U_{nT} , $?_{Rcc}$, $?_{Xcc}$, $?_{R_{cc}}$, X_{cc}
 Red: S''_k : Potencia de cortocircuito de la red MVA

Cálculo de la **impedancia, reactancia y resistencia** de la línea de distribución, referidas al secundario del transformador:

$$Z_L = 1,1 \frac{U_{nT}^2}{1.000 S''_k} \text{ m?}$$

$$X_L = 0,995 Z_L \text{ m?}$$

$$R_L = 0,1 X_L \text{ m?}$$

Cálculo de la **impedancia de defecto**:

$$R_k = R_L + R_{cc}$$

$$X_k = X_L + X_{cc}$$

$$Z_k = \sqrt{(R_L + R_{cc})^2 + (X_L + X_{cc})^2} \text{ (m?)}$$

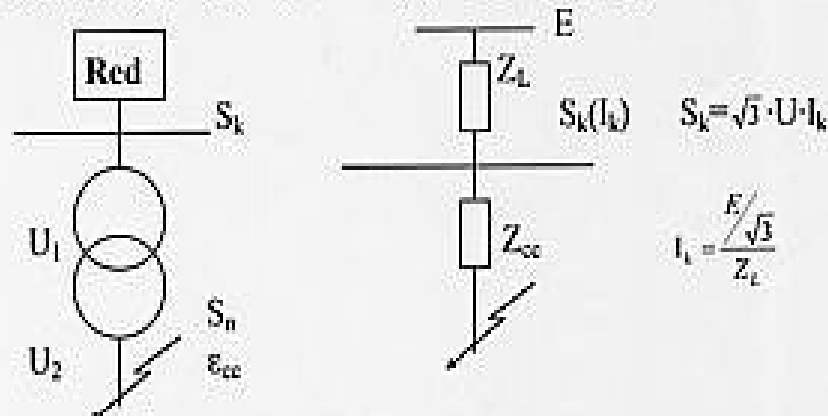
Cálculo de I''_k e I_s

$$I''_k ? \frac{U_{nT}}{\sqrt{3} Z_k} ? I_k ? I_{sc}$$

$$I_s = \sqrt{2} ? I''_k$$

Cálculo de la I_{cc} en bornes de un transformador

- Caso de $S_k = S_{cc} = k$ ($S_k = 350 \text{ MVA}$)



$$Z_L (\text{ref } 20 \text{ kV}) = 1,1 \frac{U_{n,1}^2}{S_k} = 1,1 \frac{20^2}{350} = 1,25 \Omega$$

$$Z_L (\text{ref } 380 \text{ V}) = 1,1 \frac{U_{n,2}^2}{S_k} = 1,1 \frac{380^2}{350 \cdot 10^6} = 0,454 \text{ m}\Omega$$

Ejemplo : Cálculo de la c.c. en bornes de un transformador

$$\left. \begin{array}{l} S_k = 350 \text{ MVA} \\ S_n = 1600 \text{ kVA} \\ \epsilon_{cc} = 0,06 \\ 20.000 / 380 \text{ V} \end{array} \right\} \longrightarrow \begin{array}{l} Z_{L(20)} = 0,454 \text{ m}\Omega \\ Z_{cc(2^\circ)} \cong X_{cc(2^\circ)} = 5,4 \text{ m}\Omega \end{array}$$

$$Z_{TOT(2^\circ)} \cong X_{TOT} = Z_{cc(2^\circ)} + Z_{L(2^\circ)} = 5,4 + 0,454 = 5,854 \text{ m}\Omega$$

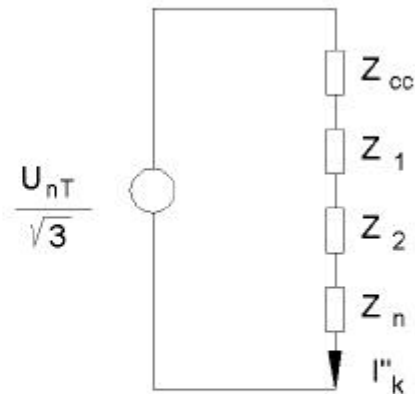
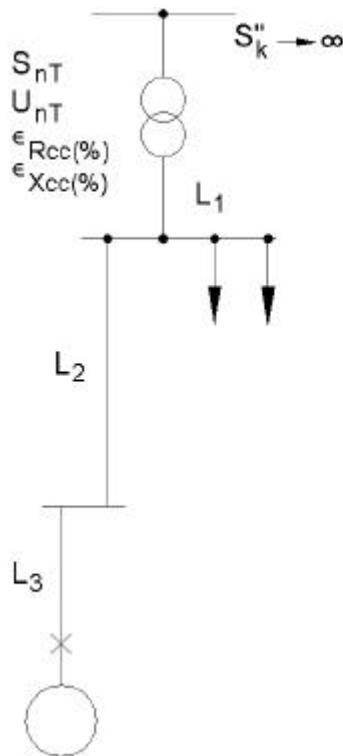
$$I_{k,(2^\circ)} = \frac{U_{n,1}}{\sqrt{3} \cdot Z_{TOT(2^\circ)}} = 37,5 \text{ kA}$$

Considerando las resistencias:

$$\begin{array}{llll} R_L = 0,045 \text{ m}\Omega & R_{cc} = 0,9 \text{ m}\Omega & R_T = 0,945 & Z_{TOT} = 5,856 \text{ m}\Omega \\ X_L = 0,451 \text{ m}\Omega & X_{cc} = 5,328 \text{ m}\Omega & X_T = 5,779 & R/X = 0,163 \rightarrow \chi \cong 1,6 \end{array}$$

$$I_k = \chi \cdot \sqrt{2} \cdot I_k = 1,6 \cdot \sqrt{2} \cdot 37,5 = 84,85 \text{ kA}$$

C.C. EN UN PUNTO ALEJADO DEL TRANSFORMADOR



Se sigue el mismo proceso que en los casos anteriores, pero ahora:

$$R_k = R_{cc} + R_1 + R_2 + R_3 + \dots$$

$$X_k = X_{cc} + X_1 + X_2 + X_3 + \dots$$

$$Z_k = \sqrt{R_k^2 + X_k^2}$$

Cálculo de I_k'' e I_s

$$I_k'' = \frac{U_{nT}}{\sqrt{3} Z_k} \quad I_k \quad I_{sc}$$

$$I_s = \sqrt{2} \quad I_k''$$

$$? = f(R_k, X_k)$$

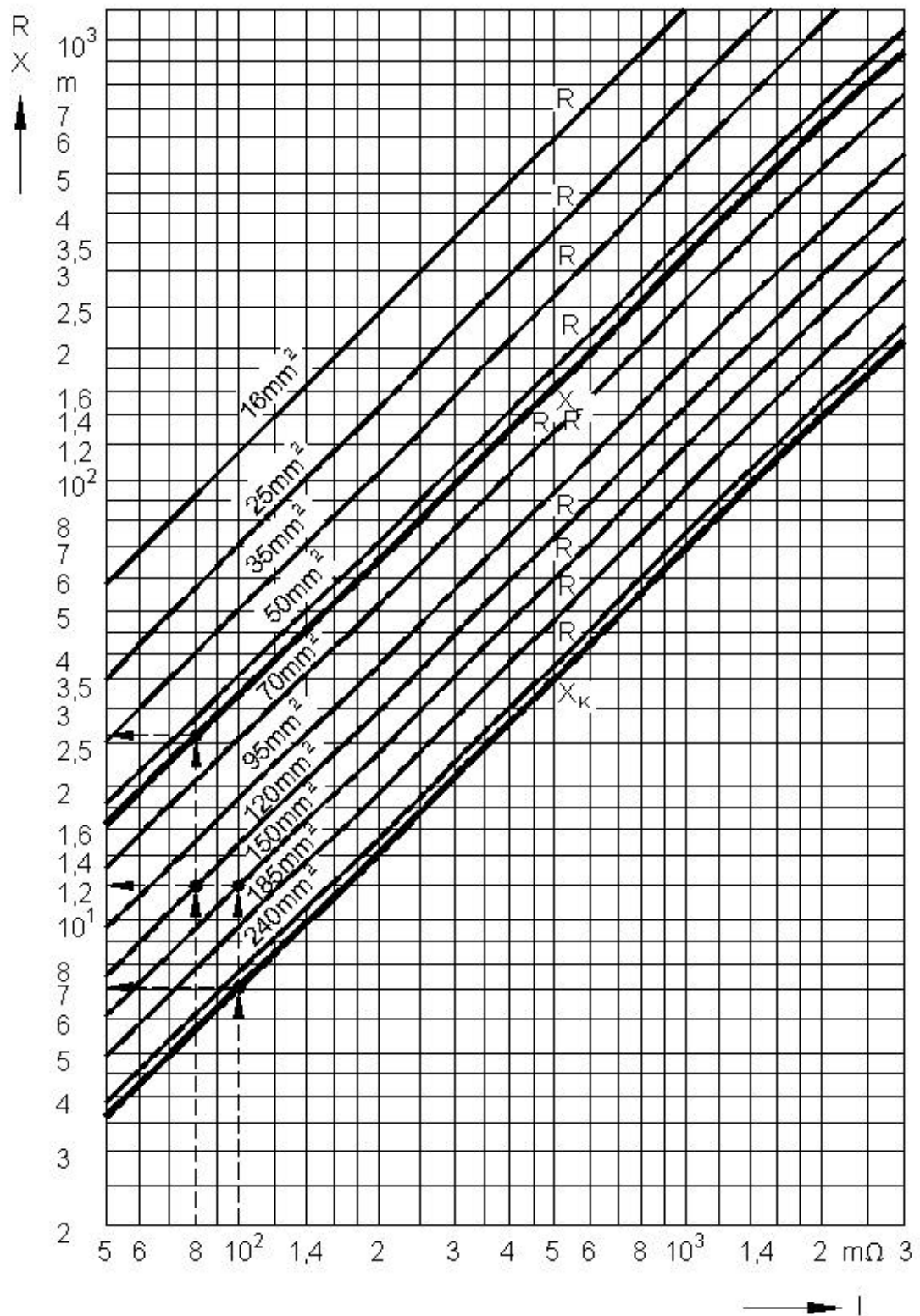
- Normalmente se desprecia la impedancia de los embarrados.
- Se considera S_k'' ? ? (Z_{LMT} despreciable frente a las impedancias de los cables).
- R_i , X_i se estiman a partir de datos del fabricante de los cables, ábacos y tablas en la bibliografía.
- Valores orientativos:

$$R_i = \frac{1.000 \quad ? \quad l_i}{n_i \quad S_i} \quad (m?) \quad ? \quad \left(\frac{m}{mm^2} \right) \quad ? \quad \begin{matrix} ?1/58 & Cu \\ ?1/35 & Al \\ ?1/7 & Fe \end{matrix}$$

no tiene en cuenta el efecto pelicular

$$x_i = \frac{x'_i}{n} \quad \left(\frac{m?}{m} \right) \quad x'_i \quad \left(\frac{m?}{km} \right) \quad ? \quad \begin{matrix} ? \text{ conductor aéreo} & 330 \\ ? \text{ barras distribución} & 130 \\ ? \text{ cables multipolar es} & 80 \end{matrix}$$

n: N° de conductores en paralelo por fase



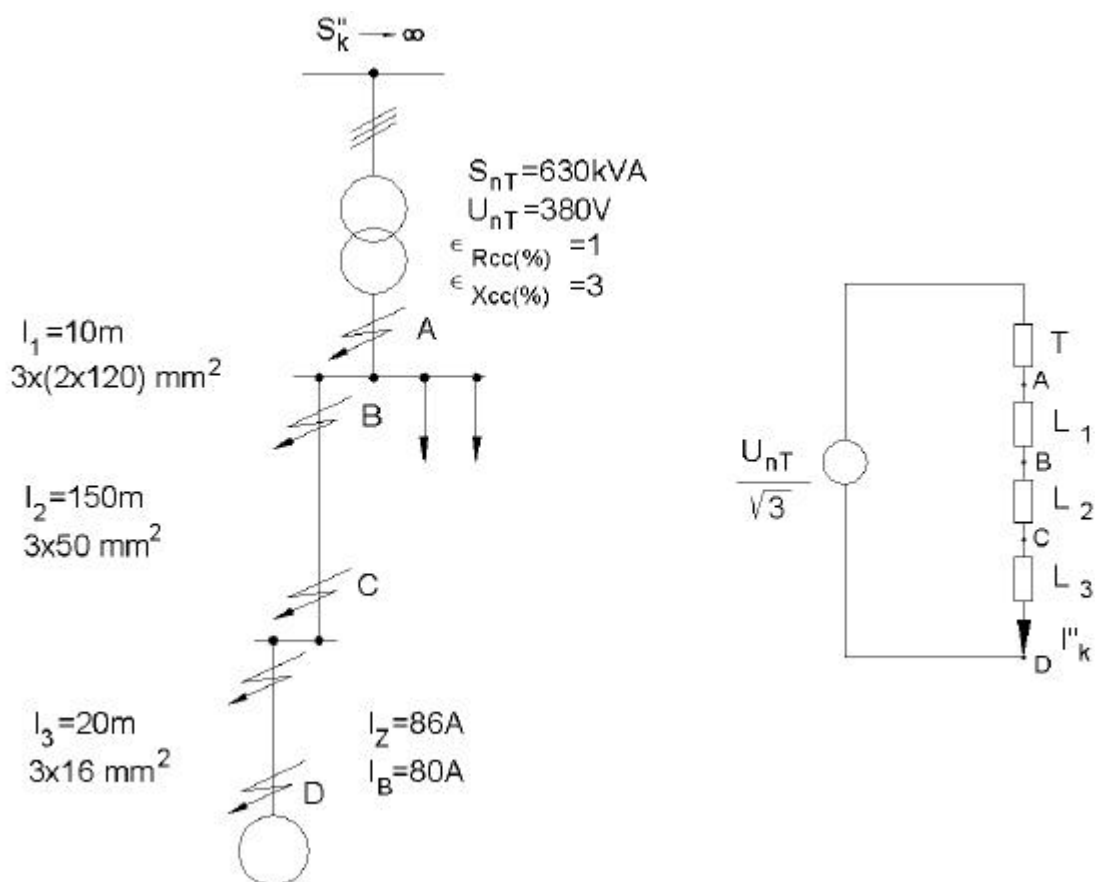
R Resistencia efectiva

X_F Reactancia de líneas aéreas (conductores desnudos)

X_K Reactancia de cables

(Cuando se emplean conductores de aluminio, los valores de la resistencia efectiva, tomados del diagrama deben multiplicarse por 1,7)

Ejemplo 7: Cálculo de las corrientes de cortocircuito en los puntos A, B, C y D de la siguiente instalación.



	Ri	Xi	? Ri	? Xi	? $Z_{k,i}$	I''_k	R/x	?	$I_s \text{ (KA)}$
A	(m?)	(m?)	(m?)	(m?)	(m?)	(kA)			
B	2,29	6,87	2,29	6,87	7,24	30,38	0.33	1.4	60
C	1,5/2	0,7/2	3,04	7,22	7,83	28,08	0.42	1.3	51.6
D	57	11	60,04	18,22	62,74	3,51	3.3	1	3.51
	24	1,4	84,04	19,62	86,30	2,55	4.3	1	2.55

■ Atenuación de I''_K a lo largo de cables de distinta sección

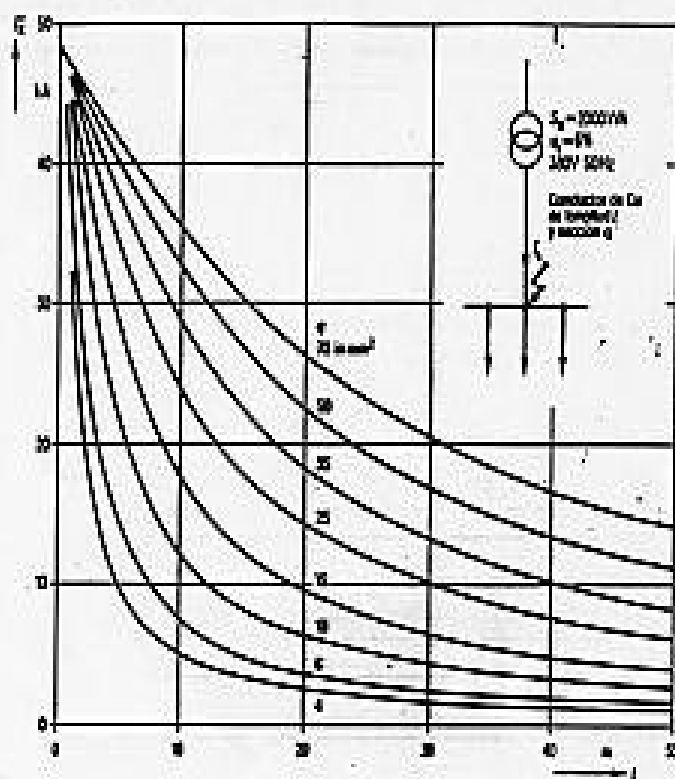


Fig. 2.15
Corriente de cortocircuito I''_K en dependencia de la longitud l y la sección q de los conductores (ejemplo)

■ Atenuación de la I''_K en una instalación típica

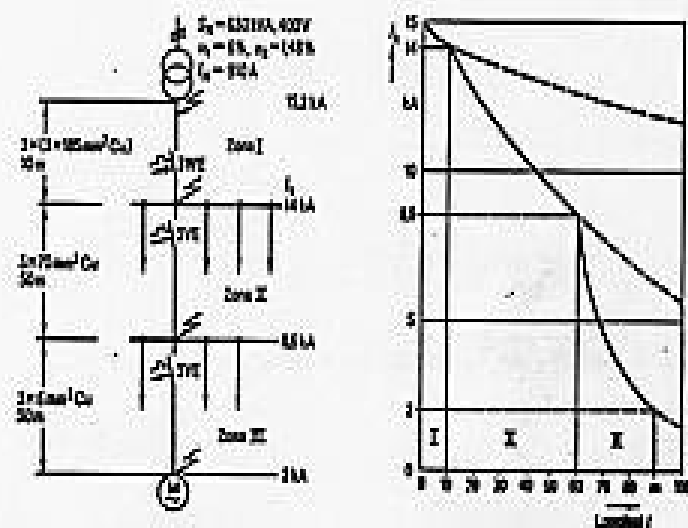


Fig. 2.16
Atenuación de la corriente de cortocircuito por los cables y conductores de la distribución

CALENTAMIENTO DE UN CONDUCTOR EN C.C.

Ecuación del calentamiento adiabático ($t < 5 \text{ seg.}$)

$$i^2 R dt = C_e \rho V dT$$

ρ : densidad

V: volumen

C.C. que produce
el calentamiento
máximo admisible

$$\int_0^t i^2 dt = \int_{T_{\text{rég}}}^{T_{\text{ad}}} \frac{C_e \rho l S}{\rho l S} dT = K^2 S^2$$

T_{ad} : 160°C PVC

220°C XLPE

$$\int_0^t i^2 dt = K^2 S^2$$

K : tipo de conductor (ρ, ρ)
tipo de aislamiento ($T_{\text{rég}}, T_{\text{ad}}$)

Valores de K

	PVC	XLPE
Cu	115	135
Al	74	87

• Cortocircuitos largos ($t > 0.1 \text{ s}$)

Calentamiento producido por componente continua <<

$$i_{cc} = \sqrt{2} I_k \sin \omega t \Rightarrow \int_0^t i^2 dt = I_k^2 t = K^2 S^2$$

$$t = \left(K \frac{S}{I} \right)^2 = t_{\text{ad}}$$

• Cortocircuitos cortos ($t < 0.1 \text{ s}$) i_{cc} no senoidal

$$\int_0^t i^2 dt = \int_0^t \int_0^t i^2 dt = \int_{\text{adm}} K^2 S^2$$

$\rightarrow I^2 t$ que deja pasar la protección

DATO DADO
FABRICANTE

SELECCIÓN DE LOS DISPOSITIVOS DE PROTECCIÓN FRENTE A C.C.

Sistema de protección frente a c.c. Regla general (UNE 20-460)

En toda instalación eléctrica deben preverse dispositivos de protección que garanticen que toda corriente de c.c. será interrumpida antes de que sus defectos térmicos y mecánicos puedan resultar peligrosos para los conductores y conexiones.

Condiciones que deben cumplir los dispositivos de protección contra cortocircuitos

PODER DE CORTE DIS. $\geq I''_K (I_K)$ en el punto donde está instalado

TIEMPO DE CORTE DISP. $t_c \leq t_{adm}$ ($T_c \xrightarrow{t_{adm}} T_{adm}$)
para cualquier c.c. originado en el cto que protege el disp.

• Cortocircuitos largos ($t > 0.1$ s)

$$t_{ad} = \left(K \sqrt{\frac{S}{I}} \right)^2$$

t_{ad} : Tiempo admisible en segundos.

I: Valor eficaz de la corriente de c.c. prevista en A.

S: Sección del cable en mm².

K: Constante que depende del material conductor y del tipo de aislante.

• Cortocircuitos cortos ($t < 0.1$ s)

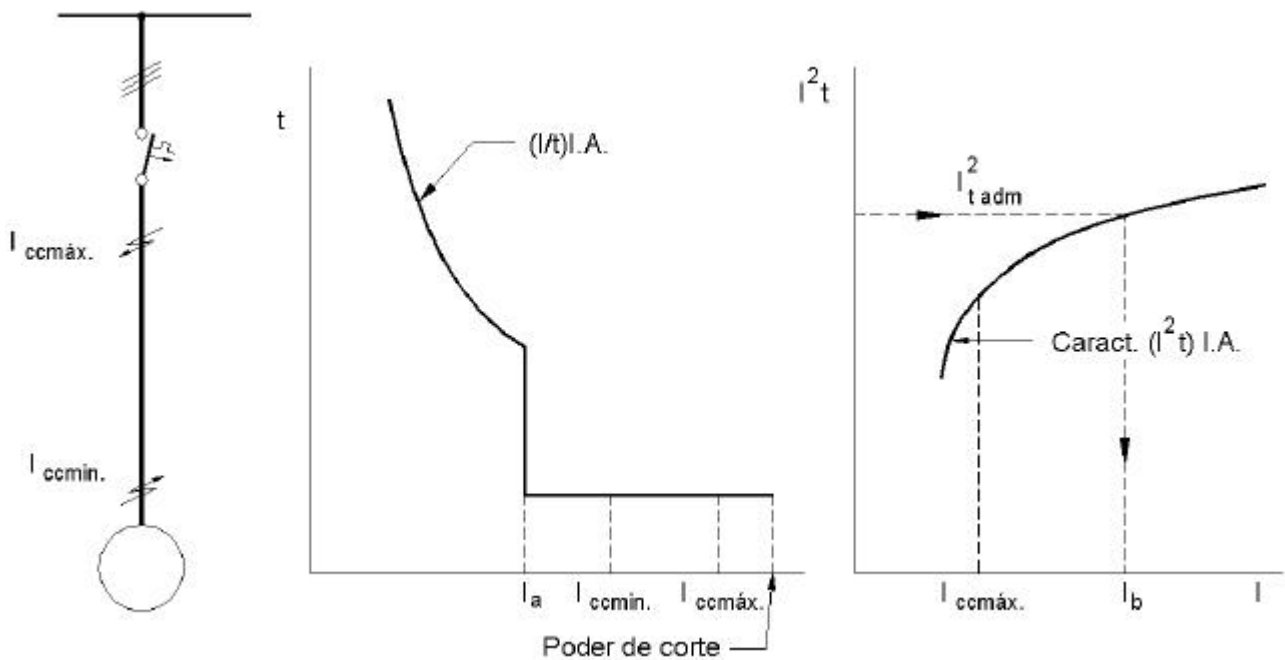
$$(I^2 t)_{Disp} \leq (I^2 t)_{adm} \leq (K^2 S)^2$$

$(I^2 t)_{Disp}$: Característica dada por el fabricante.

I^2t admisible para distintos tipos de cable.

Secc. (mm ²)	$(I^2t)_{adm}$			
	Al, PVC	Al, Poliet.	Cu, PVC	Cu, Poliet.
16	$1,4 \times 10^6$	$1,9 \times 10^6$	$3,4 \times 10^6$	$4,7 \times 10^6$
35	$6,7 \times 10^6$	$9,3 \times 10^6$	$1,6 \times 10^7$	$2,2 \times 10^7$
70	$2,7 \times 10^7$	$3,7 \times 10^7$	$6,5 \times 10^7$	$8,9 \times 10^7$
95	$4,9 \times 10^7$	$6,8 \times 10^7$	$1,2 \times 10^8$	$1,6 \times 10^8$
120	$7,9 \times 10^7$	$1,1 \times 10^8$	$1,9 \times 10^8$	$2,6 \times 10^8$
240	$3,2 \times 10^8$	$4,4 \times 10^8$	$7,6 \times 10^8$	$1,0 \times 10^9$

PROTECCIÓN MEDIANTE INTERRUPTOR AUTOMÁTICO



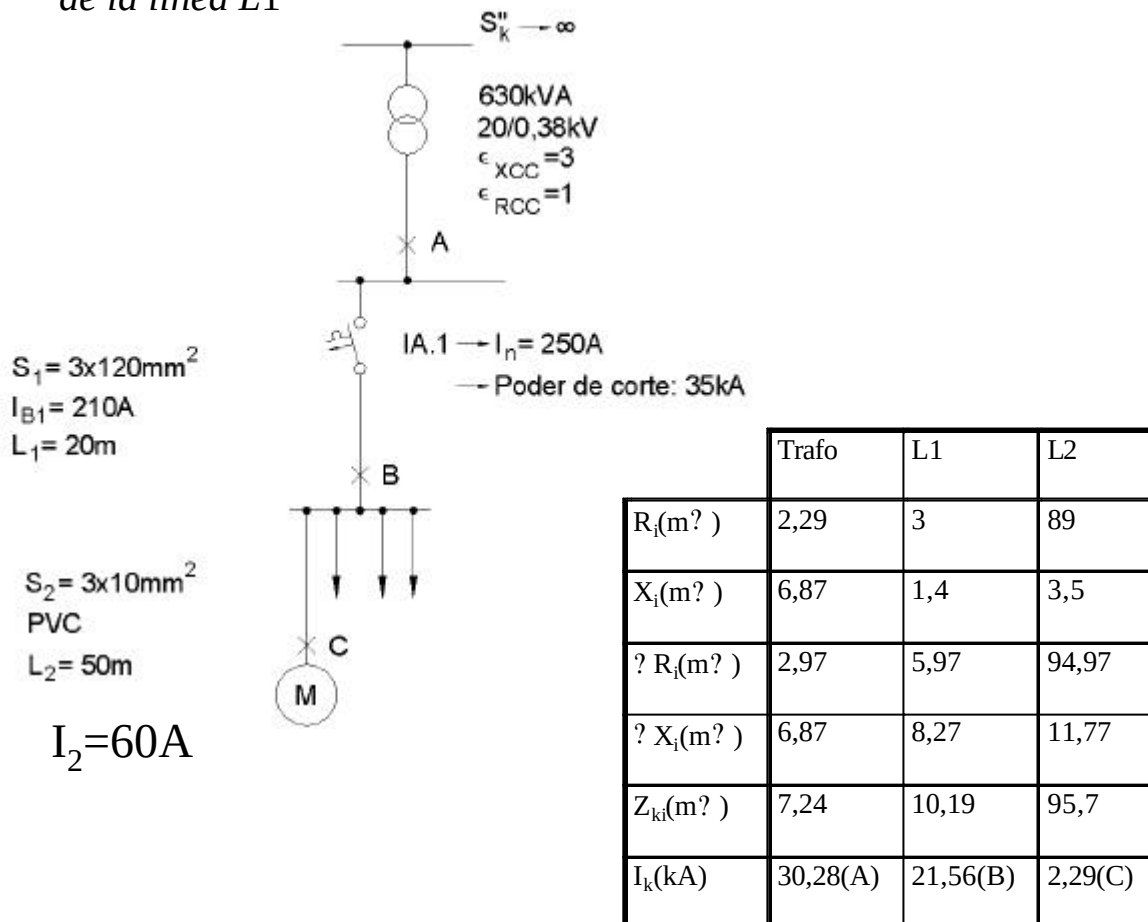
Condiciones que debe cumplir el I.A. para que la línea este efectivamente protegida

a) Poder de Corte del I.A. $> I_{cc,m\acute{a}x.}$ (prevista) $? I_k \text{ m\acute{a}x}$

b) $I_{cc,m\acute{i}n} > I_a$ I_a es la intensidad de regulación del disparador electromagnético, puede ser ajustable o no

c) $I_{cc,m\acute{a}x} < I_b$
 $\downarrow$
 $I_k \text{ max}$ la energía ($I^2 t$) que deja pasar el I.A. para el c.c. máximo ha de ser menor que la admisible por el cable).

Ejemplo 8: Análisis de la protección contra cortocircuitos de la línea L2 (conductor de Cu, aislada con PVC) mediante el I.A.1, instalado en el origen de la línea L1



a) Poder de corte de I.A.1 = 35 kA > $I_k(A)$? cumple criterio a)

b) El disparador electromagnético es ajustable entre $5I_n = 1.250$ A y $10I_n = 2.500$ A. Ajustando I_a ? 2,1 kA

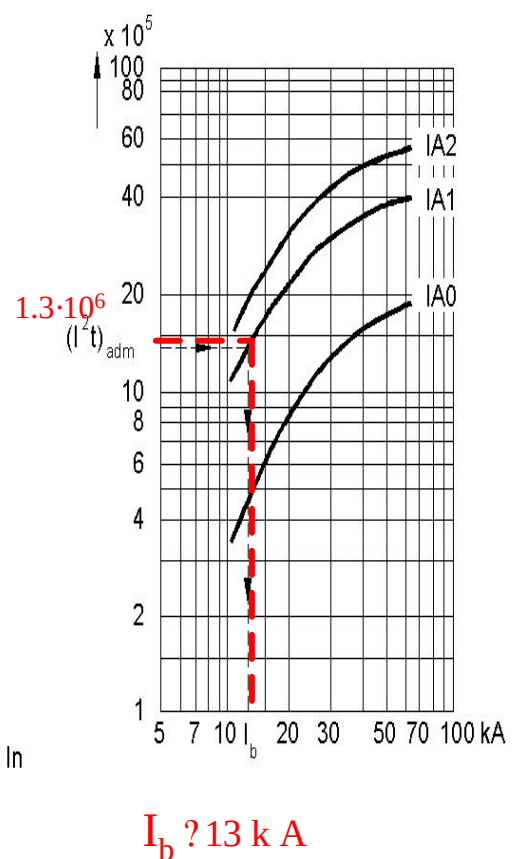
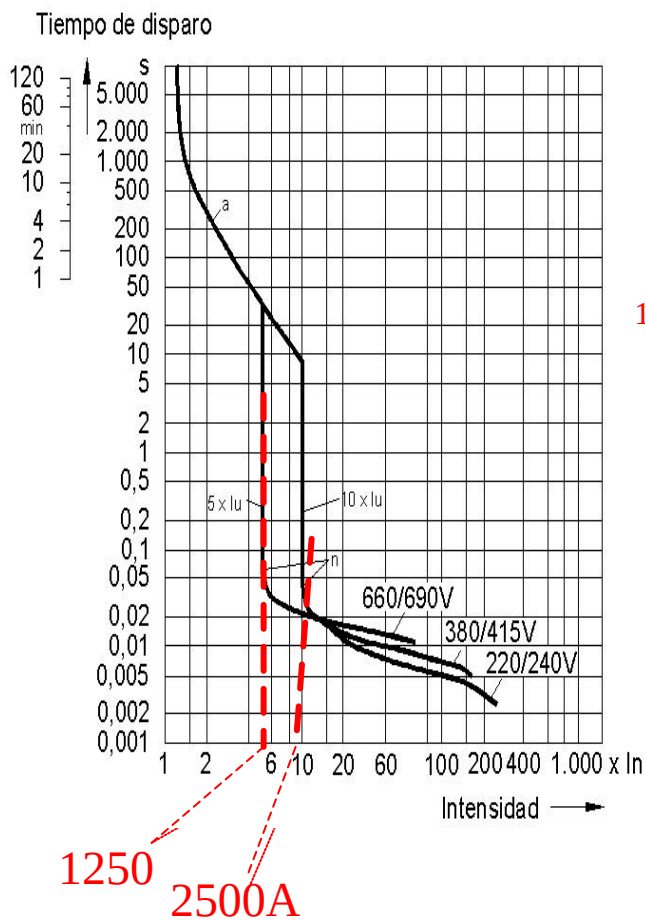
$I_{cc,mín} = I_k(C) = 2,29 > I_a = 2,1$ kA ? cumple criterio b)

c) La línea L2 está constituida por cable de cobre de 10 mm² aislado en PVC:

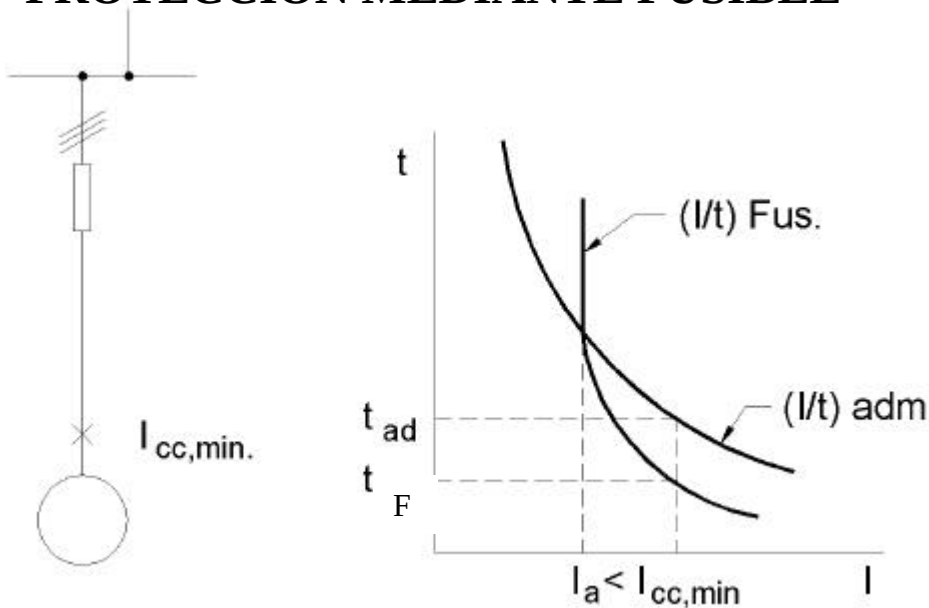
$$(I^2t)_{adm} = (115 \times 10)^2 = 1,3 \times 10^6 \text{ A}^2\text{s}.$$

Entrando con este valor en la característica de I^2t :

$$I_{cc,m\acute{a}x} = I_k(B) = 21,56 > I_b ? 13 \text{ kA} > ? \quad \text{NO cumple criterio c)}$$



PROTECCIÓN MEDIANTE FUSIBLE



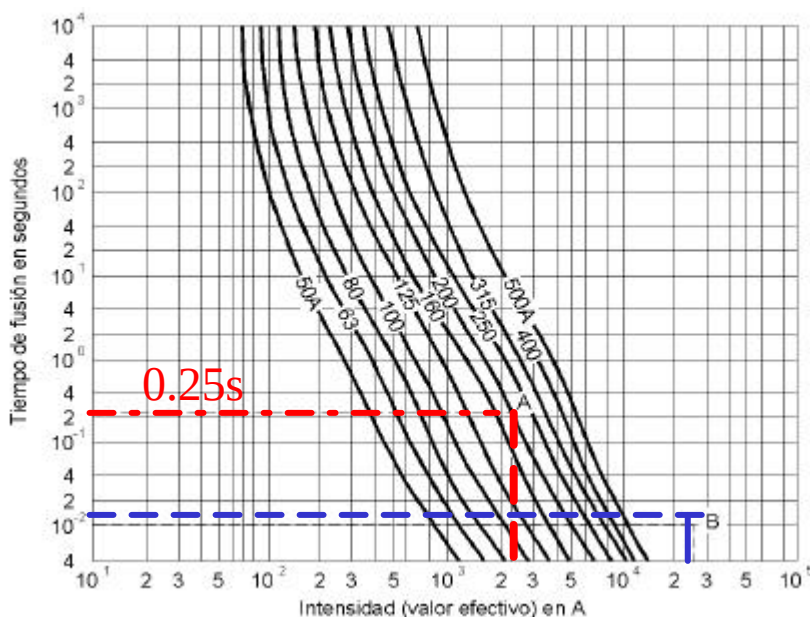
Línea efectivamente protegida:

a) Poder de Corte del Fusible $> I_{cc, \text{máx}}$

b) $I_{cc, \text{mín}} > I_a$ o $t_{ad} < t_F$

(la caract. I/t del FUSIBLE está por debajo de la caract. $(I/t)_{adm}$ del cable).

Ejemplo 9: Protección frente a cortocircuitos mediante fusibles cuyas características $I-t$ se dan en la figura 6.25 (Poder de corte = 100 kA) de la línea L2 del ejemplo 8.



a) $100 > 30.28 \text{ KA}$

b) $I_{cc, \text{mín}} = 2.229 \text{ KA}$

$$t_{ad} = \frac{10^2}{2290} = 0.0437 \text{ s}$$

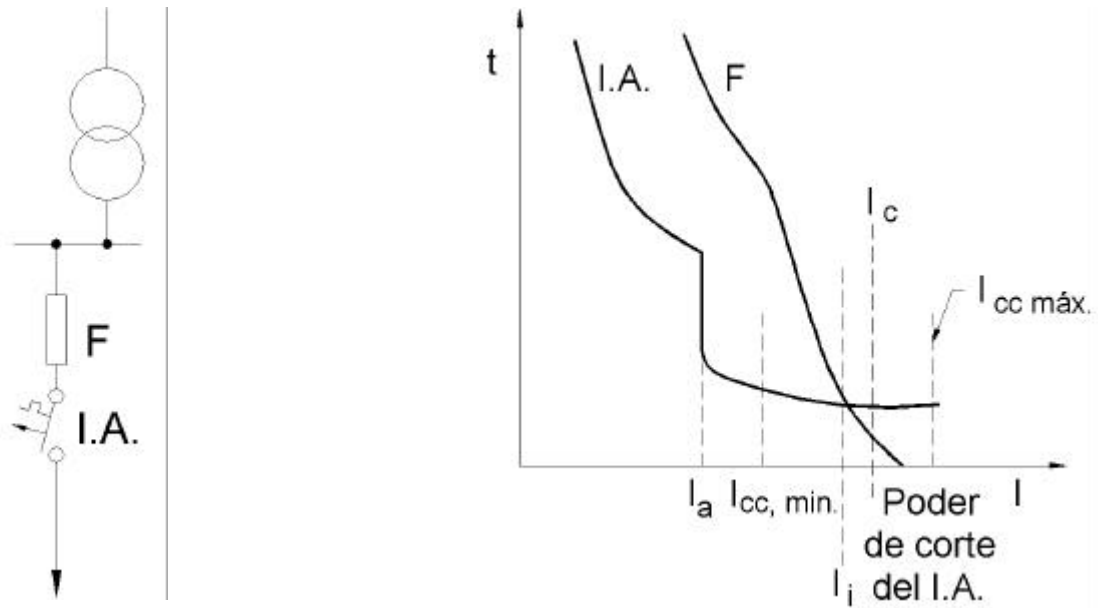
$t_{ad} < 0.25 \text{ seg}$

Fusibles válidos I_n :

200, 160, 125, 100, 80 y 63 A

$$I_2 = 60 \text{ A}$$

COMBINACIÓN FUSIBLE-INTERRUPTOR AUTOMÁTICO



- Permite utilizar I.A. de bajo poder de corte (baratos) en puntos con elevadas intensidades de c.c.
- El I.A. debe actuar frente a sobrecargas.
- El fusible debe proteger contra cortocircuitos.
- Si I_c es la corriente a la que se cortan las carac. se debe cumplir:

$$I_c < \text{Poder corte I.A.}$$

- Interesa que I_c sea próximo al poder de corte, para que el I.A. despeje el mayor número posible de c.c. ($I_a < I_{cc} < I_c$).

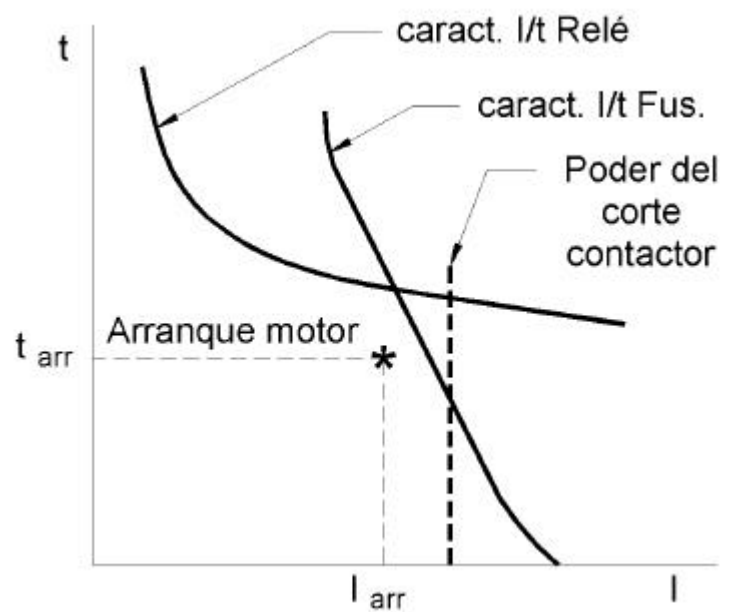
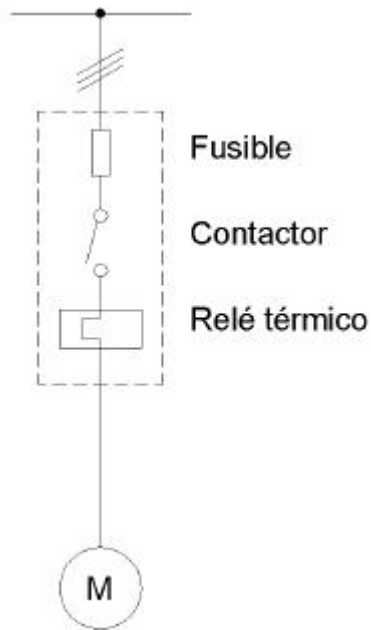
Ejemplo 10: Selección del fusible adecuado para instalar en la línea L1 del ejemplo 8, suponiendo ahora que el poder de corte del interruptor I.A.1 es $I_c = 25 \text{ kA}$.

$$I_{cc} = I_c = 25 \text{ kA} \quad ? \quad I_c/I_n = 25.000/250 = 100 \quad ? \quad t_c = 10 \text{ ms}$$

Fusibles válidos: ($I = 25.000 \text{ A}$, $t < 0,01 \text{ s}$) ? Calibres: 250, 315, 400, 500 A

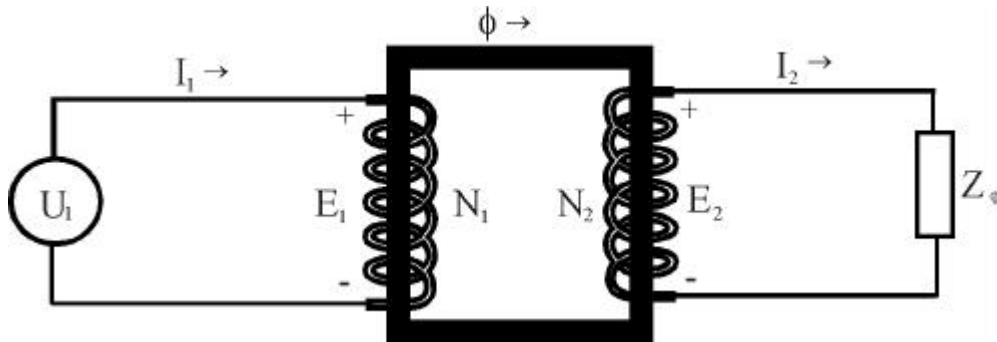
se seleccionaría el de mayor calibre ($I_n = 500 \text{ A}$) ya que es el que fundirá menos veces.

COMBINACIÓN CONTACTOR-RELÉ TÉRMICO-FUSIBLE



- Protección líneas que alimentan consumos con maniobras frecuentes.
- Contactor + relé térmico: Protección frente a sobrecargas.
- Fusible: Protección frente a c.c. y sobrecorrientes mayores que el poder de corte del contactor.
- Las características deben cortarse para una corriente algo menor que el poder de corte del contactor.
- El punto de arranque del motor (I_{arr} , t_{arr}), está por debajo de la característica del fusible.

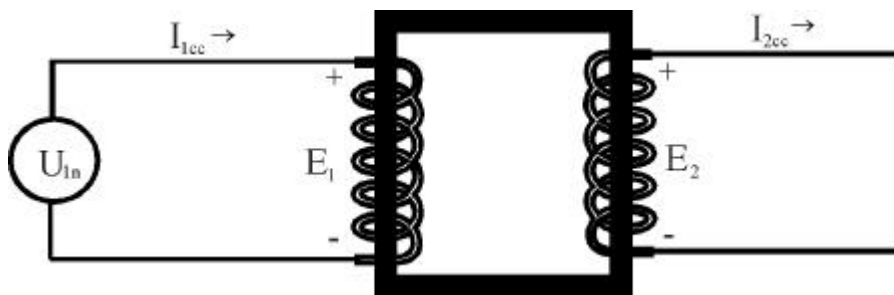
TRANSFORMADOR MONOFÁSICO IDEAL



$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{E_1}{E_2} = \frac{N_1}{N_2} = r_t$$

$$\sqrt{3} \mathcal{U}_1 I_1 = \sqrt{3} \mathcal{U}_2 I_2 \quad ? \quad \frac{I_1}{I_2} = \frac{U_2}{U_1} = \frac{1}{r_t}$$

CORTOCIRCUITO EN BORNES DEL TRANSFORMADOR MONOFÁSICO REAL



Impedancia de cortocircuito vista desde el primario

$$\dot{\bar{Z}}_{1cc} = \frac{\dot{U}_1}{\dot{I}_{1cc}} = R_{1cc} + jX_{1cc}$$

R_{1cc} : Resistencia de c.c. 1º

X_{1cc} : Reactancia de c.c. 1º

Corriente de cortocircuito en el secundario

$$\dot{I}_{2cc} = r_t \dot{I}_{1cc} = r_t \frac{\dot{U}_1}{\dot{Z}_{1cc}} = r_t \frac{r_t \dot{U}_2}{\dot{Z}_{1cc}} = \frac{\dot{U}_2}{\frac{\dot{Z}_{1cc}}{r_t^2}} = \frac{\dot{U}_2}{\dot{Z}_{2cc}}$$

Z_{2cc} : Impedancia de c.c. 2º

Resistencia y Reactancia de cortocircuito referidas al 2º: R_{2cc} y X_{2cc}

$$\dot{\bar{Z}}_{2cc} = \frac{\dot{\bar{Z}}_{1cc}}{r_t^2} \quad R_{2cc} = \frac{R_{1cc}}{r_t^2} \quad X_{2cc} = \frac{X_{1cc}}{r_t^2}$$

CAIDA DE TENSION EN CORTOCIRCUITO

Caída de tensión en cortocircuito referida al primario (U_{1cc})

valor eficaz de la tensión que hay que aplicar al devanado primario para que circule por él la intensidad nominal, estando el secundario en cortocircuito.

Caída de tensión en cortocircuito referida al secundario (U_{2cc}) (análoga al 1º)

$$U_{1cc} = Z_{1cc} I_{1n} = (r_t^2 Z_{2cc}) \frac{I_{2cc}}{r_t} = r_t U_{2cc}$$

Caída de tensión porcentual en cortocircuito $\%_{cc}$

$$\%_{cc} = 100 \frac{U_{1cc}}{U_{1n}} = 100 \frac{U_{2cc}}{U_{2n}}$$

$$\%_{cc} = 100 \frac{I_{1n} Z_{1cc}}{U_{1n}} = 100 \frac{\frac{S_n}{U_{1n}} Z_{1cc}}{U_{1n}} = 100 Z_{1cc} \frac{S_n}{U_{1n}^2} = 100 Z_{2cc} \frac{S_n}{U_{2n}^2}$$

Componentes de la caída de tensión en cortocircuito

$$\dot{U}_{cc} = R_{cc} \dot{I}_n + jX_{cc} \dot{I}_n = \dot{U}_{Rcc} + j\dot{U}_{Xcc}$$

$$\text{Caída de tensión resistiva en c.c.: } \dot{U}_{Rcc} = R_{cc} \dot{I}_n$$

$$\text{Caída de tensión inductiva en c.c.: } \dot{U}_{Xcc} = jX_{cc} \dot{I}_n$$

Caída de tensión resistiva en tanto por cien

$$\%_{R_{cc}} \approx 100 \cdot \frac{U_{R_{cc}}}{U_n}$$

Caída de tensión inductiva en tanto por cien

$$\%_{X_{cc}} \approx 100 \cdot \frac{U_{X_{cc}}}{U_n}$$

$$\%_{R_{cc}} \approx 100 \cdot \frac{I_n R_{cc}}{U_n} \approx 100 \cdot R_{cc} \frac{S_n}{U_n^2}$$

$$\%_{X_{cc}} \approx 100 \cdot \frac{I_n X_{cc}}{U_n} \approx 100 \cdot X_{cc} \frac{S_n}{U_n^2}$$

$$\%_{cc}^2 \approx \%_{R_{cc}}^2 + \%_{X_{cc}}^2$$

Impedancias de cortocircuito

$$Z_{cc} \approx \frac{\%_{cc}}{100} \frac{U_n^2}{S_n} \text{ (}\Omega\text{)}$$

$$R_{cc} \approx \frac{\%_{R_{cc}}}{100} \frac{U_n^2}{S_n} \text{ (}\Omega\text{)}$$

$$X_{cc} \approx \frac{\%_{X_{cc}}}{100} \frac{U_n^2}{S_n} \text{ (}\Omega\text{)}$$

Z_{cc} , R_{cc} y X_{cc} están referidos al primario o al secundario dependiendo de que la tensión U_n utilizada sea la primaria o la secundaria.

TRANSFORMADORES TRIFÁSICOS

Impedancias transformadores trifásicos (Z_{cc} , R_{cc} , X_{cc})

valores por fase de un transformador estrella-estrella equivalente, obtenidos mediante el ensayo de cortocircuito.

Corrientes y tensiones (U_n , I_n , U_{cc} , I_{cc})

son valores de línea.

Potencia aparente del transformador S_n

El estudio del cortocircuito trifásico $\left\{ \begin{array}{l} ? \\ \end{array} \right\}$ $\left\{ \begin{array}{l} \text{Estudio del cortocircuito en bornes} \\ \text{del transformador monofásico fase-} \\ \text{neutro equivalente, alimentado con} \\ \text{una tensión de valor eficaz } \frac{U_{1n}}{\sqrt{3}} \end{array} \right\}$

Impedancias de cortocircuito

$$Z_{cc} \approx \frac{Z_{cc}(\%)}{100} \frac{U_n^2}{S_n} (?)$$

$$R_{cc} \approx \frac{R_{cc}(\%)}{100} \frac{U_n^2}{S_n} (?)$$

$$X_{cc} \approx \frac{X_{cc}(\%)}{100} \frac{U_n^2}{S_n} (?)$$

Corrientes de cortocircuito

$$I_{1cc} \approx \frac{U_{1n}}{\sqrt{3} Z_{1cc}}$$

$$I_{2cc} \approx \frac{U_{2n}}{\sqrt{3} Z_{2cc}}$$

$$I_{2cc} \approx 100 \frac{I_{2n}}{Z_{cc}(\%)}$$

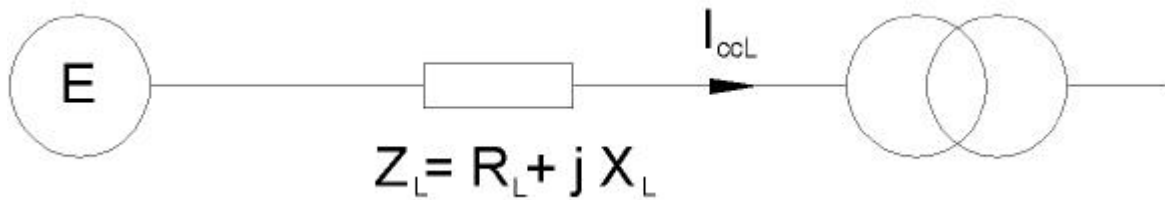
$$I_{1cc} \approx 100 \frac{I_{1n}}{Z_{cc}(\%)}$$

$$I_{2cc} \approx \frac{U_{2n}}{\sqrt{3} Z_{2cc}} \approx \frac{U_{2n}}{\sqrt{3} \frac{Z_{cc}(\%)}{100} \frac{U_n^2}{S_n}} \approx 100 \frac{S_n}{\sqrt{3} Z_{cc}(\%) U_{2n}} \approx 100 \frac{\sqrt{3} U_{2n} I_{2n}}{\sqrt{3} Z_{cc}(\%) U_{2n}} \approx 100 \frac{I_{2n}}{Z_{cc}(\%)}$$

ESTIMACIÓN DE LA IMPEDANCIA DE LA RED

Potencia de cortocircuito

$$S_K \approx \sqrt{3} U_{nL} I_{ccL}$$



$$E \approx 1,1 U_{nL}$$

$$I_{ccL} \approx \frac{1,1 U_{nL}}{\sqrt{3} Z_L} \approx \frac{S_K}{\sqrt{3} U_{nL}}$$

Impedancia equivalente de la red

$$Z_L \approx 1,1 \frac{U_{nL}^2}{S_K}$$

$$X_L \approx 0,995 Z_L$$

$$R_L \approx 0,1 X_L$$