

TECNOLOGÍA ELÉCTRICA. UNIDAD DIDÁCTICA 7

CONCEPTOS BÁSICOS A RETENER Y PROBLEMAS RESUELTOS

1.- APARAMENTA ELÉCTRICA DE BAJA TENSIÓN

Un circuito eléctrico se puede maniobrar en las siguientes condiciones:

- Vacío: es decir, sin cargas conectadas. En este caso la corriente es nula y la tensión del circuito es la nominal
- Funcionamiento normal: con cargas conectadas, la corriente que circula por el circuito al abrir o cerrar es igual o menor que la nominal (corriente máxima que puede circular por un circuito de forma permanente sin que se produzcan calentamientos excesivos)
- Funcionamiento anormal: al efectuar la maniobra, la corriente que se conecta es superior a la nominal debido al comportamiento defectuoso de alguna carga o a averías. Estas corrientes anormales pueden ser:
 - Sobrecargas: corrientes con un valor algo superior a la nominal (del orden de 3 o 4 veces)
 - Cortocircuitos: corrientes de valor muy superior a la nominal

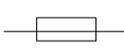
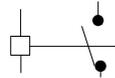
Los aparatos de maniobra de circuitos protegen al circuito de estos funcionamientos anormales mediante su conexión y desconexión. Son aparatos que se diseñan para trabajar con los valores nominales de tensión e intensidad del circuito. Los más usuales son los siguientes:

- **Interruptor (o interruptor en carga):** Permite establecer (conectar), soportar e interrumpir corrientes nominales e incluso sobrecargas. Puede soportar durante algún tiempo corrientes anormales como las de cortocircuito pero no puede cortarlas.
- **Seccionador:** no está diseñado para cortar corrientes, por lo tanto su apertura se efectúa siempre que por el circuito no circule corriente. Se instala junto con otros aparatos de corte y su función principal es la de seguridad haciendo visible la apertura de circuitos sin servicio
- **Interruptor-seccionador:** en posición de apertura cumple las especificaciones del seccionador
- **Interruptor automático:** es capaz de interrumpir elevadas corrientes de cortocircuito. Su función principal es la protección de las instalaciones frente a sobrecargas y cortocircuitos
- **Contactador:** su principal característica es permitir un elevado número de maniobras con corrientes del orden de la nominal, no tiene capacidad para cortar corrientes de valor muy superior a la nominal. Principalmente se utiliza en automatizaciones industriales, usándose generalmente como elemento de maniobra de los motores. No permite el accionamiento manual.
- **Fusible:** permite la desconexión de los circuitos cuando están recorridos por una intensidad superior a la nominal. Deben ir siempre acompañados de un elemento de conexión. Frecuentemente se emplean combinados con un interruptor formando un solo dispositivo con denominaciones comerciales diversas.

2.- CARACTERÍSTICAS ASIGNADAS APLICABLES A LA APARAMENTA

Las definiciones básicas de las principales magnitudes que permiten caracterizar a los aparatos eléctricos según la normativa y que nos permiten comparar sus características comerciales son las siguientes:

- **Valor nominal:** es el valor de una magnitud utilizada por el fabricante para designar un aparato. Normalmente se utilizan los valores de intensidad y tensión nominales, que son valores que permiten el funcionamiento normal del aparato.
- **Valor asignado:** valor de una magnitud fijado para un funcionamiento específico del aparato. Es decir, en unas determinadas condiciones definidas por parámetros como temperatura, tensión, factor de potencia, frecuencia de maniobra, vida útil, etc. Por ejemplo, a un interruptor o contactor con valores nominales fijados por el fabricante para unas condiciones tipo (400 V trifásico, 16 A), pueden asignársele valores muy diferentes cuando va a ser utilizado en circuitos con características distintas a las nominales (circuitos muy inductivos, capacitivos, otras tensiones, ambientes especiales de temperatura, humedad, etc)
- **Poder de corte:** es el valor de la intensidad que un aparato es capaz de interrumpir bajo una tensión dada y en las condiciones previstas de empleo y funcionamiento. Para poder comparar aparatos por su poder de corte se deben referir a las mismas condiciones de ensayo normalizadas. Los valores normales de los poderes de corte de los aparatos eléctricos están comprendidos entre 1,5 y 100 kA. En baja tensión el poder de corte se expresa en kA, y representa el valor eficaz de la componente simétrica de la corriente de cortocircuito prevista en el punto donde se instale el aparato.
- **Poder de cierre:** es el valor de la intensidad que un aparato es capaz de establecer en un circuito. Las condiciones previstas de empleo y funcionamiento se refieren al tipo de circuito que se va a conectar y a la intensidad nominal, tensión del circuito, corriente de cortocircuito máxima que se puede presentar, factor de potencia del circuito, etc.
-

	Interruptor automático 	Interruptor en carga 	Fusible 	Contactor 	Seccionador 
Poder de corte (I_{cc})	SI	NO	SI	NO	NO
Apertura en carga (I_n)	SI	SI	NO	SI	NO
Elevado nº de maniobras	NO	NO	NO	SI	NO
Accionamiento eléctrico	SI	SI	NO	SI	NO
Accionamiento por relés	SI	NO	NO	SI	NO
Aislamiento visible	NO	NO	NO	NO	SI

Resumen de las características de aparamenta. Fuente: Tecnología eléctrica. Ed. Síntesis

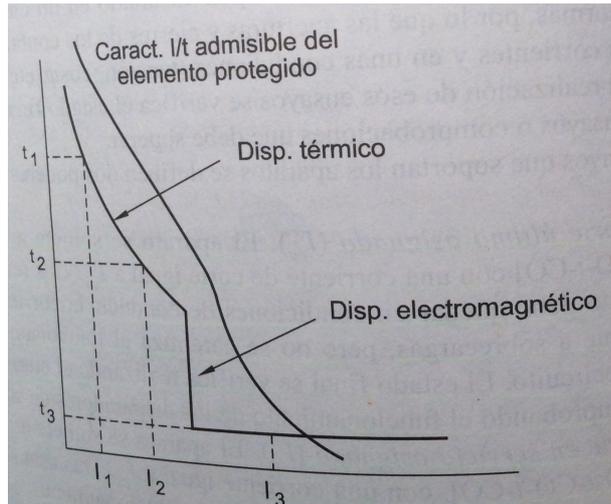
3.- PROTECCIÓN MEDIANTE INTERRUPTORES AUTOMÁTICOS

Las características que definen a un interruptor automático se pueden consultar en las normas UNE-EN 60898 y UNE-EN 60947-2, y están resumidas en el apartado 11.4.1 del Manual de la asignatura.

En este resumen de conceptos básicos se analizarán las curvas características del dispositivo y los criterios que hay que seguir en su selección.

Curva característica de disparo

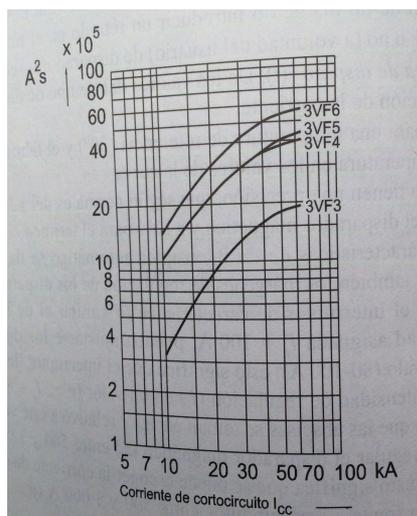
Generalmente los interruptores automáticos disponen de dos tipos de disparadores: directos o indirectos de tiempo inverso (*térmico*) y de retardo independiente (*electromagnético*). Estos disparadores pueden ser fijos o ajustables, permitiendo en este caso fijar el valor de la intensidad de actuación dentro de un margen o introducir un retardo en el tiempo de disparo (ejemplo figura 11.10 del Manual). Las curvas características de disparo del interruptor automático proporcionan los valores de tiempo de disparo de los disparadores (eje y) en función de la corriente (eje x).



Curva característica de disparo del interruptor automático
 Fuente: Tecnología eléctrica. Ed. Síntesis

Curva I^2t

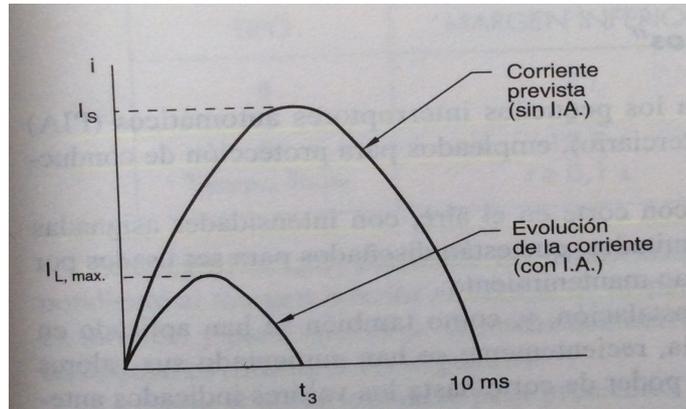
Representan la energía disipada durante el cortocircuito en una resistencia de 1 Ohmio y dan una idea de la energía que el interruptor automático deja pasar durante el cortocircuito y que se disipa en parte de la instalación protegida, lo que permite calcular la temperatura que alcanzarán los cables aguas abajo del interruptor.



Curva característica I^2t del interruptor automático
 Fuente: Tecnología eléctrica. Ed. Síntesis

Curva característica de limitación de corriente

Proporciona el valor máximo de la corriente limitada ($I_{L,max}$) en función del valor eficaz de la componente simétrica de la corriente de cortocircuito I''_k



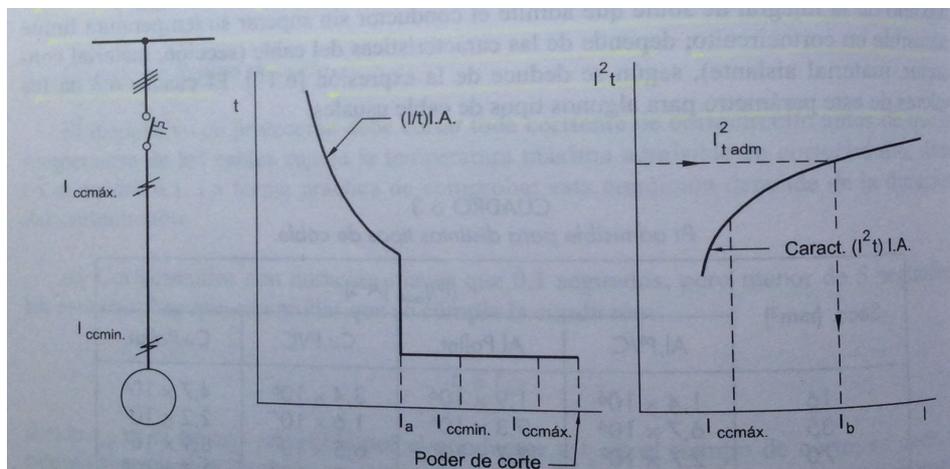
Curva característica de limitación de corriente del interruptor automático
Fuente: Tecnología eléctrica. Ed. Síntesis

3.1.- Protección frente a cortocircuitos mediante interruptores automáticos (IA)

Las condiciones que debe cumplir el interruptor automático para que la línea esté protegida frente a cortocircuitos son:

- a) Poder de corte del IA > $I_{cc,max}$ (corriente de cortocircuito prevista en el origen de la línea)
- b) $I_{cc,min}$ (corriente de cortocircuito prevista en el extremo de la línea) > I_a (intensidad de regulación del disparador electromagnético)
- c) $I_{cc,max} < I_b$ (intensidad admisible del conductor determinada sobre la curva I^2t del IA)

En la siguiente figura se pueden ver gráficamente estas condiciones:

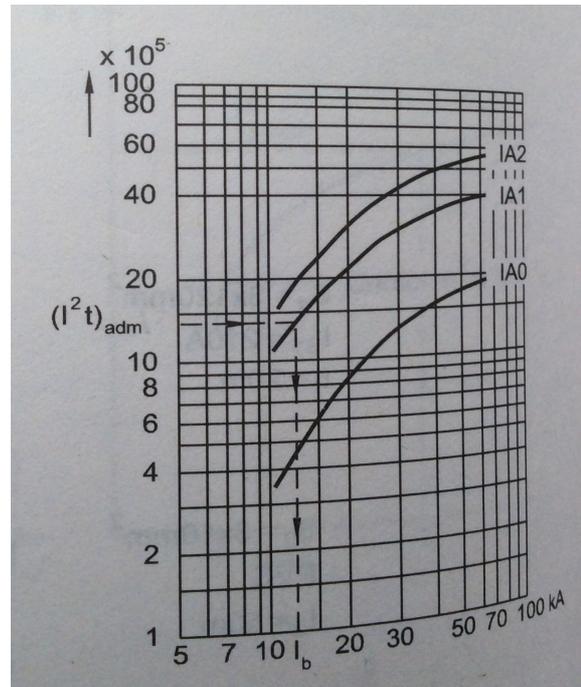
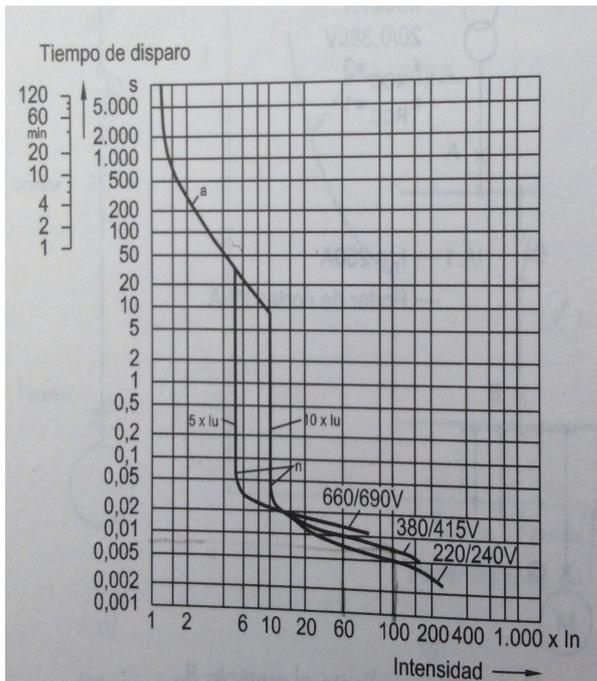
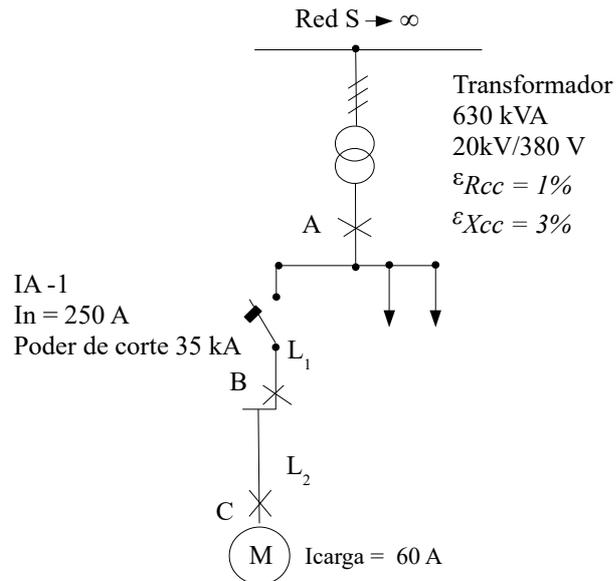


Protección frente a cortocircuitos mediante interruptor automático
Fuente: Tecnología eléctrica. Ed. Síntesis

Ejemplo

Analizar la protección contra cortocircuitos de la línea L2 (conductor de Cu aislado con PVC, $I^2t_{adm} = 1,3 \cdot 10^6 \text{ A}^2\text{s}$, sección 10 mm^2) mediante el interruptor automático IA-1 instalado en el origen de la línea L1 suponiendo que se ha realizado el cálculo de las corrientes de cortocircuito con los siguientes resultados:

	Trafo	L_1	L_2
$R_i \text{ (m}\Omega\text{)}$	2,29	3	89
$X_i \text{ (m}\Omega\text{)}$	6,87	1,4	3,5
$\Sigma R_k \text{ (m}\Omega\text{)}$	2,97	5,97	94,97
$\Sigma X_k \text{ (m}\Omega\text{)}$	6,87	8,27	11,77
$Z_k \text{ (m}\Omega\text{)}$	7,24	10,19	95,7
$I_k \text{ (kA)}$	30,28	21,56	2,29



Curvas características del interruptor automático seleccionado

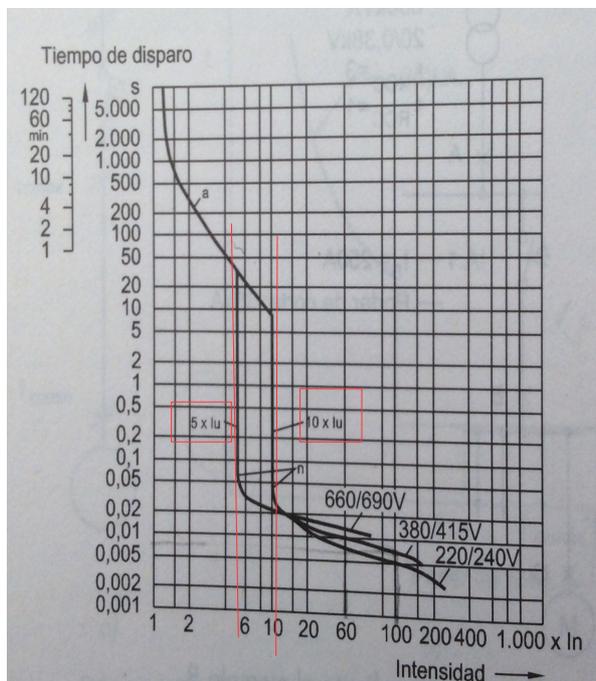
Comprobamos que se cumplen los tres criterios de protección:

a) Poder de corte del IA $> I_{cc, max}$

En este caso la corriente de cortocircuito en el origen de la línea es la del punto A, correspondiente a 30,28 kA, luego

35 kA $>$ 30,28 kA y se cumple el primer criterio

b) $I_{cc, min} > I_a$ donde la corriente de cortocircuito en el final de la línea es I_k en el punto C = 2,29 kA y para determinar I_a hay que analizar la curva de disparo:



En este caso el disparador electromagnético es ajustable entre $5 \cdot I_n$ y $10 \cdot I_n$ (líneas rojas):

$$5 \cdot I_n = 5 \cdot 250 = 1250 \text{ A}$$

$$10 \cdot I_n = 10 \cdot 250 = 2500 \text{ A}$$

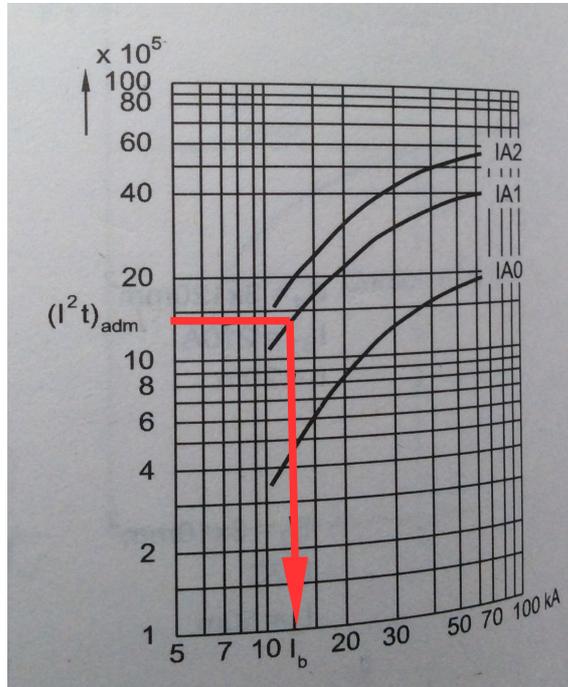
se puede ajustar el disparador de modo que tome un valor de intensidad de regulación comprendido en el rango de 1,25-2,5 kA. Se considera un ajuste a 2,1 kA, cumpliendo el segundo criterio.

$$I_{cc, min} > I_a \quad 2,29 \text{ kA} > 2,1 \text{ kA}$$

c) $I_{cc, max} < I_b$

Hay que analizar la intensidad admisible del conductor sobre la curva I^2t del interruptor automático. Se conoce el valor de esta intensidad para el conductor de la línea L2 a analizar:

$$I^2 t_{adm} = 1,3 \cdot 10^6 \text{ A}^2 \text{ s}$$



El valor de I_b obtenido en la gráfica entrando con el dato de $1,3 \cdot 10^6 \text{ A}^2 \text{ s}$ es de 13 kA luego no se cumple el criterio c) ya que $I_{cc, max}$ para la línea L2 es la corriente de cortocircuito en el punto B es decir, 21,56 kA que es superior a los 13 kA de I_b .

4.- PROTECCIÓN MEDIANTE FUSIBLES

Las características que definen a un fusible se pueden consultar en las normas UNE 21.103 y EN 60.269, y están resumidas en el apartado 11.4.2 del Manual de la asignatura.

En este resumen de conceptos básicos se analizarán las curvas características del dispositivo y los criterios que hay que seguir en su selección.

Curva característica tiempo-corriente

Para analizar estas curvas es necesario conocer los siguientes conceptos:

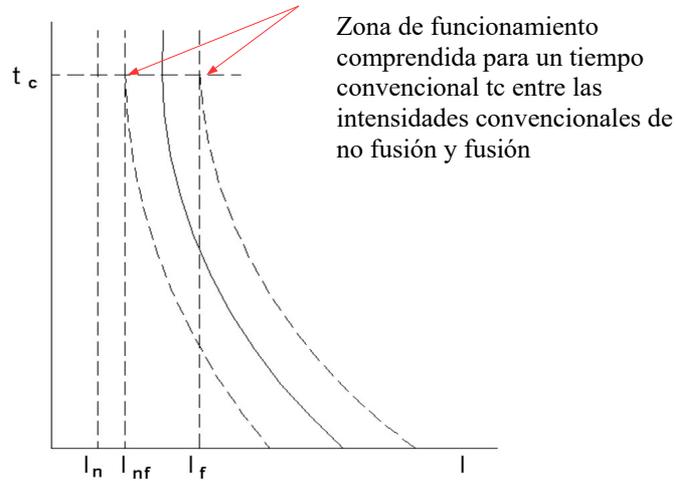
- *tiempo de funcionamiento del fusible*: es el tiempo que transcurre desde que empieza a circular la corriente $I(t)$ que provoca la fusión del fusible hasta que se extingue esta corriente. Se divide en dos partes:

- *tiempo de prearco o de fusión* (t_f) es el tiempo que transcurre hasta que se inicia el arco eléctrico (fenómeno que se produce cuando el valor del campo eléctrico en un medio aislante que separa dos partes conductoras con distintos niveles de tensión, supera en algún punto la rigidez dieléctrica del aislante, ionizando este medio y generándose un arco eléctrico)

- *tiempo de arco* (t_a): es el tiempo que transcurre desde el inicio del arco eléctrico hasta su extinción

- *intensidad convencional de no fusión* (I_{nf}): valor de la corriente que el cartucho del fusible puede soportar sin fundir en un tiempo dado

- intensidad convencional de fusión (I_f): valor de la corriente que provoca la fusión en un tiempo dado



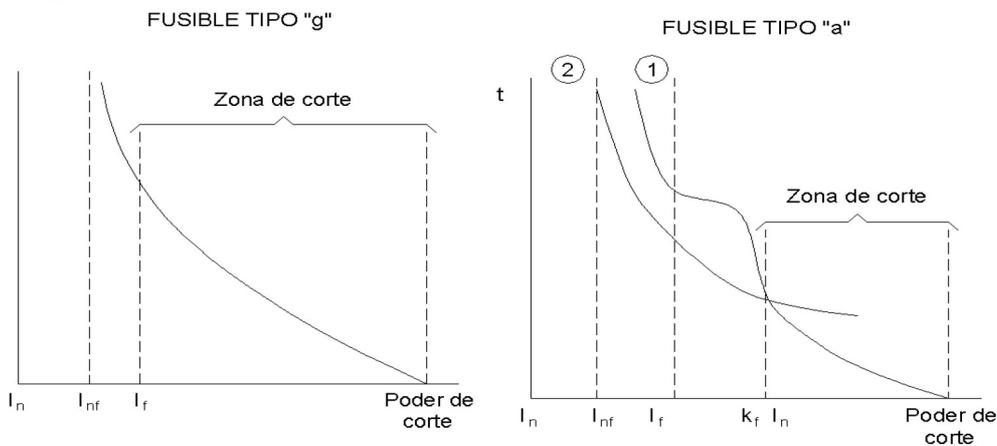
Curva característica tiempo-corriente de un fusible

Curva I^2t

La característica I^2t de los fusibles representa la energía que pasa a través de él y, como en los interruptores automáticos, se representa mediante una curva. Sin embargo, se suele asignar un valor I^2t constante para cada calibre de fusible, que se corresponde con la integral de la curva $I-t$ para el poder de corte asignado y que representa la condición más desfavorable, cubriendo todas las condiciones posibles de cortocircuito siempre que el tiempo de actuación no exceda los 5 segundos.

Nomenclatura de los fusibles

Los fusibles se designan mediante dos letras, la primera indica el rango de corrientes o zona de corte que el fusible es capaz de cortar definiéndose dos tipos: **tipo g** (uso general) y **tipo a** (de acompañamiento). La segunda de las letras indica el tipo de elemento a proteger cable (G), motor (M), semiconductor (R), etc.



Tipos de fusibles según su poder de corte

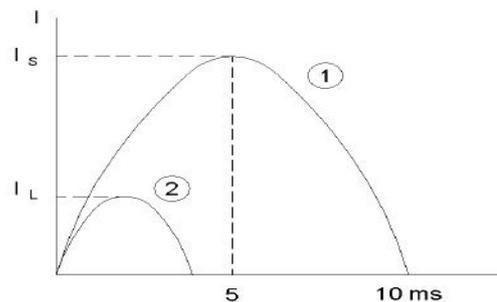
El fusible tipo g puede cortar todas las corrientes por encima de su corriente convencional de fusión hasta

el valor correspondiente a su poder de corte.

El fusible tipo a puede cortar valores superiores a $K \cdot I_n$ hasta el poder de corte, siendo K una constante que toma valores en torno a 3-4.

Fusibles limitadores

Son aquellos que, para una determinada zona de corrientes, funcionan limitando la corriente a un valor sensiblemente inferior a la de cresta prevista. Es decir, cuando se presentan valores altos de corrientes de cortocircuito el fusible funde antes de que la corriente prevista de cortocircuito alcance su pico por primera vez, siendo el tiempo de funcionamiento inferior a 10 ms.



Evolución de la corriente en un fusible limitador

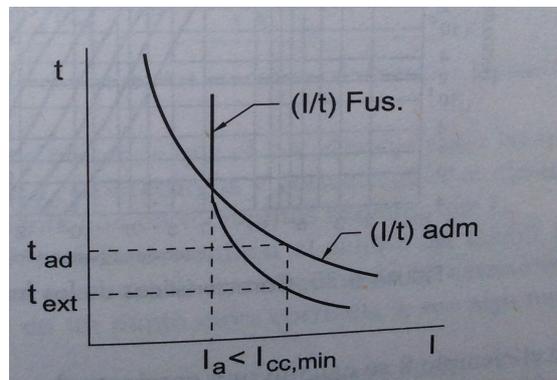
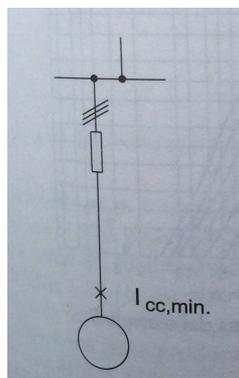
4.1.- Protección frente a cortocircuitos mediante fusibles

En las líneas protegidas mediante fusibles, la protección frente a cortocircuitos de la línea está garantizada si se cumplen las siguientes condiciones:

a) Poder de corte del fusible $> I_{cc, max}$

b) $I_{cc, min} > I_a$ (corriente para la que se produce la intersección de las características admisibles I-t del conductor e I-t del funcionamiento del fusible)

La primera condición se cumple prácticamente siempre ya que el poder de corte de los fusibles empleados en instalaciones industriales suele ser como mínimo de 100 kA.



Protección frente a cortocircuitos mediante fusible
Fuente: Tecnología eléctrica. Ed. Síntesis

Criterio del tiempo de corte

Como se ha visto tanto en el caso de los interruptores automáticos como en el de los fusibles, el dispositivo de protección debe cortar toda corriente de cortocircuito antes de que la temperatura de los cables supere la temperatura máxima admisible. Esto se puede comprobar analizando la duración del cortocircuito. Se distinguen dos casos:

a) $0,1 \text{ s} < \text{duración cortocircuito} < 5 \text{ segundos}$

En ese caso se debe cumplir la condición $t_{ad} \leq t_c$, es decir que el tiempo admisible del conductor sea menor que el tiempo de corte, donde el tiempo admisible del conductor se puede calcular mediante la siguiente expresión:

$$t_{ad} = [K*(S/I)]^2$$

donde S es la sección del cable en mm^2 , I el valor eficaz de la corriente de cortocircuito en A y K una constante que depende del material conductor y tipo de aislante:

Material conductor/aislamiento	K
Cobre/PVC	115
Cobre/materiales termoestables	135
Aluminio/PVC	74
Aluminio/materiales termoestables	87

y el tiempo de corte se obtiene entrando en las curvas I-t del dispositivo con la intensidad de cortocircuito considerada

b) $\text{duración cortocircuito} < 0,1 \text{ segundos}$

En este caso la corriente asimétrica de cortocircuito no se puede despreciar y la condición que se debe cumplir es:

$$(I^2t)_{disp} \leq (I^2t)_{adm} = [K*S]^2$$

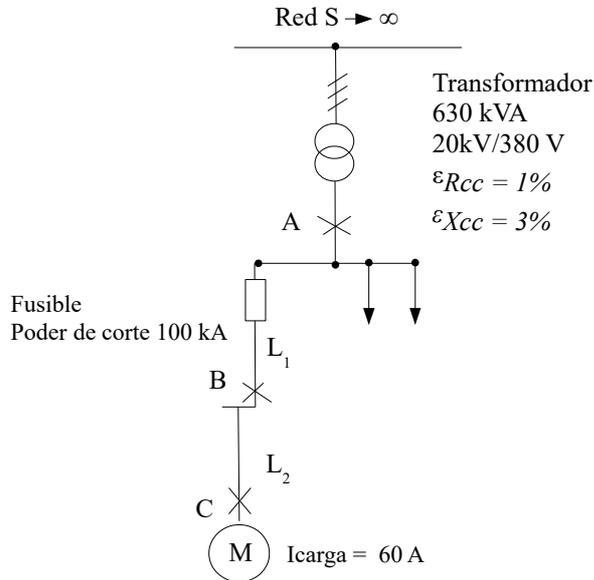
donde

$(I^2t)_{disp}$ se obtiene entrando en la curva I^2t del dispositivo con el valor de la intensidad inicial simétrica de la corriente de cortocircuito

$(I^2t)_{adm}$ depende de las características del cable

Ejemplo

Calculamos la protección de la línea L2 mediante un fusible en el caso del ejemplo anterior suponiendo un poder de corte del fusible de 100 kA.



Hay que cumplir las siguientes condiciones:

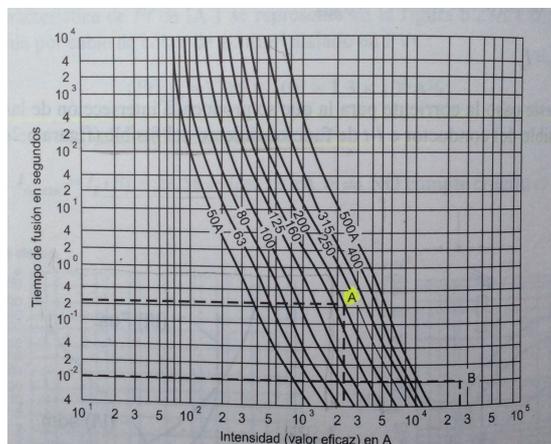
a) Poder de corte del fusible $> I_{cc, max}$ en este caso $100 \text{ kA} > 30,28 \text{ kA}$ luego cumple

b) $I_{cc, min} > I_a$ con $I_{cc, min} = 2,29 \text{ kA}$

Calculamos I_a , para el tipo de cable de L2 (Cu con aislamiento de PVC, 10 mm^2) el tiempo admisible durante el que puede circular corriente sin dañar el cable es:

$$t_{ad} = [K \cdot (S/I)]^2 = [115 \cdot (10/2290)]^2 = 0,25 \text{ s}$$

Seleccionado unas curvas características de fusibles como las que se muestran en la siguiente figura podemos situar el punto (2290 A, 0,25 segundos) (punto A)



luego son válidos todos los calibres de fusibles cuya característica I-t pasa por debajo de ese punto y tienen un calibre mayor que la intensidad de empleo de la línea (60 A) es decir, los fusibles de $I_n = 200, 160, 125, 100, 80$ y 63 A.

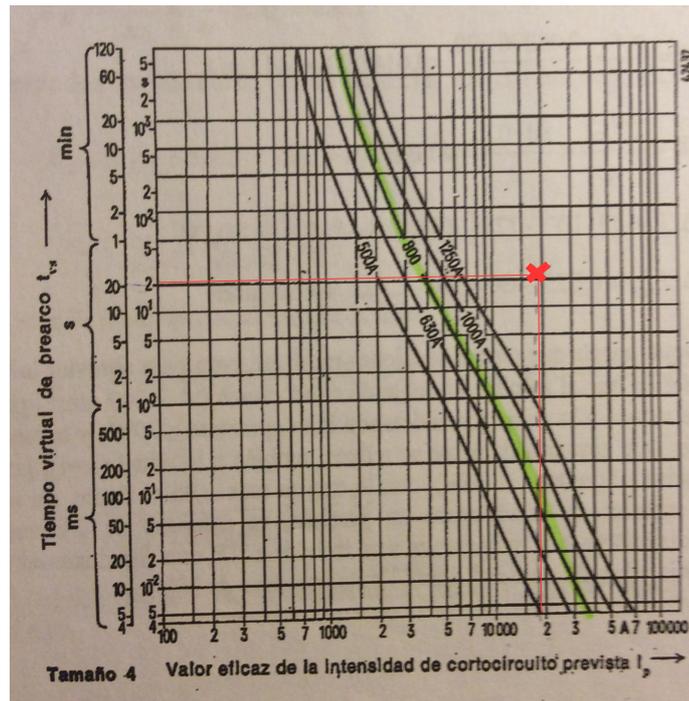
5.- PROBLEMAS RESUELTOS

P1.- Una línea trifásica de 200 metros de longitud y sección $4 \times 240 \text{ mm}^2$ de sección parte de un transformador de 1600 kVA, 20kV/400V ($\varepsilon_{CC} = 6\%$, $\varepsilon_{RCC} = 0$) para alimentar el cuadro general de un edificio industrial que consume 400 kW con un factor de potencia de 0,8.

La línea está formada por conductores unipolares de aluminio asilado en polietileno reticulado con tensión nominal de aislamiento 1 kV. Se considera que la temperatura máxima que pueden alcanzar los conductores es de 70°C siendo la resistividad del aluminio en este caso de $0,03396 \Omega\text{mm}^2/\text{m}$.

Al principio de la línea se coloca un fusible por fase de 800 A (poder de corte 100 kA), cuya curva de fusión es la de la figura. Indicar si es el dispositivo adecuado para la protección contra cortocircuitos.

Nota: potencia de cortocircuito de la red de 20 kV, 350 MVA. Despreciar la resistencia de la red.



En primer lugar calculamos las corrientes de cortocircuito de la instalación a partir de las impedancias en cada punto del circuito:

Transformador:

$$R_{cc} = (\varepsilon_{RCC} / 100) * (U_n^2 / S_n) = 0 \text{ m}\Omega$$

$$X_{cc} = (\varepsilon X_{CC} / 100) * (U_n^2 / S_n) = 6 / 100 * (400^2 / 1600) = 6 \text{ m}\Omega = Z_{cc}$$

Línea del secundario:

$$Z_L = 1,1 * (U_n^2 / 1000 * S''_k) = 1,1 * (400^2 / 1000 * 350) = 0,5 \text{ m}\Omega$$

$$R_L = 0 \text{ luego } X_L = Z_L$$

Línea:

$$R = 1000 * \rho * l / (n * S) = 1000 * 0,03396 * 200 / (4 * 240) = 7,1 \text{ m}\Omega$$

$$X = x'_i * l / 1000 = (80 / 4) * (200 / 1000) = 4 \text{ m}\Omega$$

La corriente de cortocircuito al inicio de la línea, $I_{cc, max}$, será la obtenida para la impedancia del transformador más la de la línea de distribución, es decir:

$$Z_k = 6 + 0,5 = 6,5 \text{ m}\Omega$$

$$I''_k = U_{n2} / (\sqrt{3} * Z_k) = 400 / (\sqrt{3} * 6,5) = 35,6 \text{ kA} = I_{cc, max}$$

La corriente de cortocircuito al final de la línea, $I_{cc, min}$, será la obtenida considerando también la impedancia de línea

$$X_k = 6 + 0,5 + 4 = 10,5 \text{ m}\Omega$$

$$R_k = 7,1 \text{ m}\Omega$$

$$Z_k = 12,7 \text{ m}\Omega$$

$$I''_k = U_{n2} / (\sqrt{3} * Z_k) = 400 / (\sqrt{3} * 12,7) = 18,2 \text{ kA} = I_{cc, min}$$

Comprobamos que cumple las condiciones de protección las siguientes condiciones:

a) Poder de corte del fusible $> I_{cc, max}$ en este caso $100 \text{ kA} > 35,6 \text{ kA}$ luego cumple

b) $I_{cc, min} > I_a$ con $I_{cc, min} = 18,2 \text{ kA}$

el tiempo admisible durante el que puede circular corriente sin dañar el cable es:

$$t_{ad} = [K * (S/I)]^2 = [87 * (4 * 240 / 18200)]^2 = 21 \text{ segundos,}$$

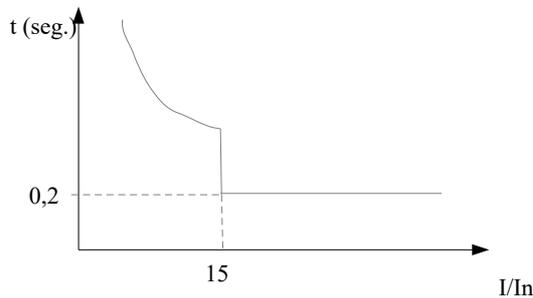
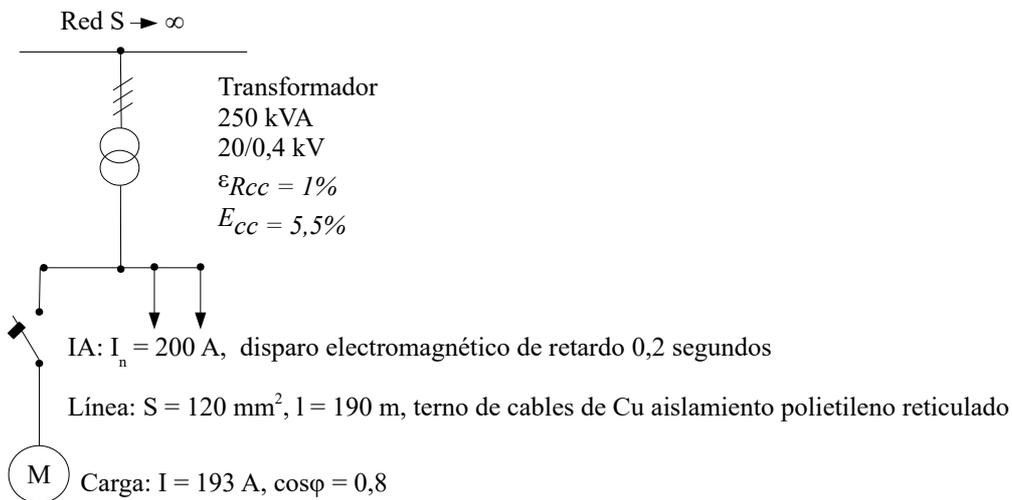
donde se toma el valor de K de la tabla de la pag 10

Entrando en la curva del fusible con 21 segundos y 18200 A obtenemos el punto marcado en rojo en la figura y como la curva del calibre de 800 A está por debajo $I_a < I_{cc, min}$ y cumple. Además la intensidad de línea es

$$P = \sqrt{3} * U * I * \cos\varphi \quad I = 400000 / (\sqrt{3} * 400 * 0,8) = 722 \text{ A luego el calibre 800 es adecuado porque es}$$

mayor que la intensidad de la línea.

P2.- Calcular el poder de corte mínimo del interruptor automático de la siguiente instalación para que esté protegida adecuadamente frente a sobre intensidades:



Calculamos la corriente de cortocircuito en bornes del transformador

$$R_{cc} = (\epsilon_{Rcc} / 100) * (U_n^2 / S_n) = 1 / 100 * (400^2 / 250) = 6,4 \text{ m}\Omega$$

$$X_{cc} = (\epsilon_{Xcc} / 100) * (U_n^2 / S_n) = 5,4 / 100 * (400^2 / 250) = 34,6 \text{ m}\Omega$$

$$\text{con } \epsilon_{Xcc} = \sqrt{5,5^2 - 1^2} = 5,4 \text{ m}\Omega$$

$$Z_{cc} = 35,2 \text{ m}\Omega$$

La corriente de cortocircuito al inicio de la línea, $I_{cc, max}$, será:

$$I''_k = U_{n2} / (\sqrt{3} * Z_k) = 400 / (\sqrt{3} * 35,2) = 6,56 \text{ kA} = I_{cc, max}$$

luego el poder de corte deberá ser mayor de 6,56 kA

Comprobamos el resto de condiciones de protección del interruptor automático:

$$1) I_{cc, \min} > I_a$$

$$R = 1000 * \rho * l / (n * S) = 1000 * (1/57) * 190 / (120) = 27,7 \text{ m}\Omega \text{ donde } 1/57 \text{ es la resistividad del Cu}$$

$$X = x' * l / 1000 = (80) * (190 / 1000) = 15,2 \text{ m}\Omega$$

$$X_k = 34,6 + 15,2 = 49,8 \text{ m}\Omega$$

$$R_k = 6,4 + 27,7 = 34,1 \text{ m}\Omega$$

$$Z_k = 60,3 \text{ m}\Omega$$

$$I''_k = U_{n2} / (\sqrt{3} * Z_k) = 400 / (\sqrt{3} * 60,3) = 3,83 \text{ kA} = I_{cc, \min}$$

y la corriente de actuación según la curva característica es:

$$I_a = 15 * I_n = 15 * 200 = 3000 \text{ A luego } 3,83 > 3 \text{ kA y cumple}$$

$$2) I_{cc, \max} < I_b$$

como en el interruptor automático

$$(I^2 t)_{adm} = I_b^2 t_r = [K * S]^2 \text{ y conocemos todos los datos salvo } I_b$$

$$I_b = (135 * 120) / \sqrt{0,2} = 36,22 \text{ kA que es superior a } 6,56 \text{ kA por lo que también cumple este último criterio}$$