

TEMA 6

COORDINACIÓN DE LOS DISPOSITIVOS DE PROTECCIÓN

El dispositivo de protección no solamente debe ser capaz de interrumpir una corriente de falla antes de que pueda dañar a los elementos del circuito que está protegiendo, sino que, además, debe actuar en forma coordinada con los demás dispositivos protectores, tanto aguas arriba como hacia abajo, independientemente si estos dispositivos basan su actuación en la corriente por las líneas, intensidad a tierra, tensión, presión, sentido de la potencia, etc..

La coordinación selectiva o selectividad podría definirse como: "Es la habilidad de un dispositivo protector de interrumpir la alimentación de un circuito fallado, sin alterar o interferir los restantes circuitos sanos, dejando fuera de servicio la menor porción posible del sistema de distribución".

El grado de selectividad necesario depende de la aplicación; por ejemplo para sistemas de elevada potencia se requiere una exacta selectividad, ya que las consecuencias de una falta de coordinación son críticas, por otra parte para un sistema industrial normal de baja o media tensión las pérdidas materiales pueden ser importantes, en cambio en usos domiciliarios no se exige gran precisión, pues un "apagón" por falta de selectividad es tolerable ya que los perjuicios son de relativamente poca cuantía.

La operación coordinada de los dispositivos de protección facilita en gran medida la ubicación de la falla, acortando el tiempo de reposición del servicio, ya que si el sistema actuó correctamente sabemos que la falla se encuentra entre los dispositivos que operaron y los que no lo hicieron.

6.1- Coordinación selectiva entre fusibles

Un fusible no solo debe interrumpir la corriente de falla protegiendo al equipo o elemento para cuya tarea fue instalado, además debe coordinarse con los otros dispositivos protectores, en este caso fusibles.

En un circuito como el de la Figura 6.1, si tiene lugar una falla en la rama F, debe actuar solo el fusible de F.

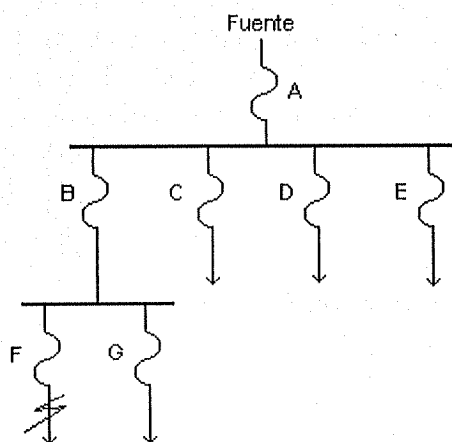


Figura 6.1

Los fusibles B y A del lado de la alimentación deben permanecer inalterados, ya que si no

ocurre así y opera el fusible B deja sin alimentación al ramal sano de G, y peor aun si funde el fusible A, pues saca de servicio a todo el sistema.

Tratándose de fusibles del mismo tipo, una relación 2:1 entre las corrientes nominales del fusible mayor (del lado de la fuente) y del menor (del lado de la carga), en general suministra un muy buen grado de selectividad. Si la relación es mayor que 2:1 seguro que hay selectividad (para fusibles normales).

Si no es posible colocar los fusibles con esa relación y se requiere un grado elevado de coordinación, será necesario conocer todas las características, no solo de los fusibles, sino también del circuito al que protegen. La disposición del circuito juega un rol muy importante en la selectividad, de manera que es muy beneficioso antes de estructurar el circuito, ver que grado de selectividad se requiere, para ordenarlo en base a estas exigencias.

Las propiedades más importantes del fusible son:

- constancia de las características para todos los fusibles del mismo tipo, lo que se logra mediante un alto control del proceso de fabricación.

- no deterioro con el uso normal lo que significa que debe mantener sus características (dentro del margen de tolerancia) durante los años de servicio, o sea a lo largo de su vida útil. Esta propiedad es fundamental ya que el fusible no presenta la posibilidad de calibración o regulación como ocurre con los relés o interruptores automáticos.

6.1.1- Características del fusible que afectan la selectividad

Como ya ha sido estudiado, si una elevada corriente circula por el fusible, éste genera calor, lo que incrementa su temperatura hasta que alcanza el valor de fusión, momento a partir del cual las características de operación del fusible son alteradas. A continuación el elemento fusible se vaporiza, finalizando el periodo de prearco y dando comienzo el de arco, continuando la circulación de la corriente de falla hasta que la resistencia del metal vaporizado alcanza un valor tal que la tensión aplicada a los bornes del mismo no es capaz de mantener la circulación, extinguiéndose.

Cuando se tiene dos fusibles en serie, este mismo análisis puede ser efectuado ahora desde el punto de vista de la selectividad. Se supone que ambos fusibles son de distinta corriente nominal y que por los mismos circula la misma corriente de falla; la elevación de la temperatura de cada uno de ellos será distinta y como la resistencia es función de la temperatura también serán diferentes sus dr/dt . La razón de cambio de resistencia del fusible menor es mayor que la del fusible mayor. En el período de prearco el cambio de resistencia es menos brusco que en el de arco. Es posible, entonces, observar que la resistencia del fusible no afecta mayormente la selectividad como lo hace en realidad la velocidad del cambio de resistencia.

El calor generado según la expresión de Joule es:

$$Q = \int r i^2 dt \quad (6.1)$$

que como ya se dijo la ecuación puede reducirse a:

$$Q_{pm} = \int i^2 dt \quad (6.2)$$

la cual puede escribirse como I^2t .

Este análisis tiene validez para el estudio de la selectividad en tiempos relativamente cortos (menores que 10 ms para fusibles de tipo industrial y de hasta 1 ms para elementos especiales usados en la protección de semiconductores por ejemplo), tales que el proceso puede considerarse adiabático y por lo tanto el I^2t de prearco ser tomado como constante. Dicho de otra manera, la energía necesaria para fundir el elemento fusible es constante si se considera que no hay disipación de calor. De aquí es fácilmente deducible que "dos fusibles conectados en serie serán selectivos cuando el I^2t de prearco del fusible mayor sea mayor que el I^2t total (prearco + arco) del fusible menor".

Lo anteriormente expuesto significa que el fusible menor interrumpirá totalmente la corriente de falla antes de que el fusible mayor alcance el punto de irreversibilidad.

Considerando que el punto de irreversibilidad se presenta cuando el elemento fusible alcanza la temperatura de fusión en alguna de sus partes.

Se debe recordar que el I^2t de arco no es constante, por lo que es normal que el fabricante suministre el correspondiente a la corriente crítica (corriente para la cual el fusible absorbe la máxima energía de arco posible). Por ende, si se verifica la selectividad para estas condiciones, se cumplirá para las restantes que son de menor exigencia.

Si la corriente de falla es tal que provoca la operación en más de 10 ms, la disipación del fusible deja de ser despreciable, por lo que cesa de tener validez la consideración de que el valor de I^2t de prearco es constante (es mayor a medida que la corriente disminuye). Por lo tanto lo correcto será recurrir a las curvas $I_p = f(t_v)$ o directamente a las curvas $I = f(t)$.

Si las curvas para distintos valores de corrientes nominales no presentan cruzamientos ni superposiciones de franjas de tolerancia (una vez aplicado un factor de seguridad usualmente inferior a 1,3), se podrá decir que cada fusible es selectivo con el de mayor corriente nominal.

Por lo tanto se concluye que para un estudio de selectividad se debe disponer de las gráficas:

$$I^2t = f(I_n) \quad (6.3)$$

para las peores condiciones, e:

$$I = f(t) \quad (6.4)$$

Se verificará la selectividad si y solo si:

$$a- I^2t_{p.a. \text{ fus. mayor}} > I^2t_{\text{total fus. menor}} \quad (6.5)$$

b- Las curvas de $I = f(t)$ no se deben cruzar, ni superponer sus bandas de tolerancia.

Algunos fabricantes suministran tablas de selectividad en función de la tensión de

alimentación o en función de la corriente de falla.

Otros fabricantes dan la relación $I_{n \text{ mayor}}/I_{n \text{ menor}}$ mínima para los fusibles de su marca que presentan selectividad.

6.1.2- Otras formas de estudiar la selectividad entre fusibles mediante la utilización de la información dada por el fabricante

Aquí se tratarán las tres formas más usadas por los fabricantes para indicar la selectividad entre los fusibles de su fabricación. La información no es aplicable para estudiar la coordinación de estos elementos con fusibles de otras marcas o tipos, de tal manera que el usuario queda cautivo de ese fabricante.

1- En base a las tensiones del sistema

Se trata de información como la mostrada en la Tabla 6.1. En ella se ingresa con las corrientes nominales del fusible protegido (del lado de la carga) y del fusible protector (del lado de la fuente), en el punto de intersección de las rectas trazadas por los puntos correspondientes a estas corrientes nominales se encuentra un símbolo. Con este símbolo se entra a la tabla de significados que acompaña a la anterior, determinando así un valor de tensión nominal del sistema para el cual ambos fusibles son selectivos.

Tabla 6.1: Coordinación en base a la tensión de trabajo

		FUSIBLE MENOR							
		10	16	20	25	35	50	63	80
FUSIBLE MAYOR	16	•							
	20	•	*						
	25	•	•	*					
	35	•	•	•	*				
	50	•	•	•	*				
	63	•	•	•	•	*			
	80	•	•	•	•	•	*		
	100	•	•	•	•	•	•	*	

	No selectivo
*	Selectivo hasta 380 V
•	Selectivo hasta 600 V

2- En base a las corrientes de cortocircuito

Se emplea una carta similar a la mostrada en la Tabla 6.2. La forma de entrar es análoga al método explicado en el punto anterior, o sea, con los valores nominales de corriente de los fusibles denominados protegidos y protectores. En el punto de intersección de las correspondientes rectas trazadas por las corrientes nominales, se determina un monto de corriente de cortocircuito, la cual es la máxima para la cual ambos fusibles actuarán

selectivamente. Si la intensidad de falla máxima en el lugar de instalación del fusible **protegido** es inferior al valor obtenido en la tabla, ambos fusibles serán selectivos para todas las corrientes posibles. Si la máxima en el lugar supera a la indicada en la tabla, la coordinación tendrá lugar para cualquier corriente inferior a la de la tabla, no ocurriendo lo mismo para las que la superen. En tal caso se deberá tomar una solución de compromiso, aceptar esta situación o colocar un fusible protector mayor o uno protegido menor, no se debe olvidar que a medida que la corriente de falla es mayor la posibilidad de que se presente es mas remota.

Tabla 6.2: Coordinación en base a las corrientes de cortocircuito

		FUSIBLE MAYOR						
FUSIBLE MENOR		10	15	20	25	30	40	45
	3	980	1300	1630	2100	2600	3250	4200
	5	980	1300	1630	2100	2600	3250	4200
	7		980	1600	2100	2600	3250	4200
	10			780	1650	2600	3250	4200
	15				1000	1900	3250	4200
	20					1200	2250	4000
	25						1400	3000

Esta carta se determina superponiendo las curvas de tiempo mínimo de operación y de tiempo máximo o de despeje total de falla, los puntos de intersección dan las corrientes que se colocan en la referida tabla. Para este trabajo se debe tener en cuenta la asimetría o sea el estudio es válido para los tiempos superiores a los 16 ms. por lo ya mencionado. En este método no se tienen en cuenta las tensiones, pues se considera que los fusibles trabajan a la tensión de diseño o inferior y además normalmente es aplicado a fusibles no limitadores de corriente.

En cambio en el método anterior se hablaba de tensiones aplicadas, ya que al ser limitadores de corriente, la energía de arco (durante la extinción definitiva antes del pasaje por cero natural) está fuertemente influenciada por la tensión del sistema.

3- En base a la tensión y corriente de cortocircuito

Este método se basa en el empleo de una carta del tipo de la Tabla 6.3. A ella se ingresa con la corriente máxima de cortocircuito en veces la corriente nominal del sistema en el punto de instalación del dispositivo menor, determinando el número que representa a la mínima relación entre la corriente nominal del fusible protector y protegido.

Tabla 6.3: Factores de coordinación

Corriente de cortocircuito expresada en múltiplos de la corriente nominal del fusible protegido	Relación mínima corriente nominal protector / protegido con la siguiente tensión en (V)		
	220	380	500

-	10 In	1,25	1,25	1,25
10 In	30 In	1,25	1,25	1,60
30 In	100 In	1,25	1,60	1,60
100 In	1000 In	1,60	1,60	2,00
1000 In	-	2,00	2,00	2,50

Existe otro método no muy conocido, denominado de los valores preferidos. Este se basa en la hipótesis de que por lo general puede afirmarse que en una serie de fusibles correspondientes a un determinado fabricante, un fusible no actúa selectivamente con el de corriente nominal mayor siguiente de la citada serie. Es más usual que se verifique la selectividad en forma alternada, o sea no coordina con el siguiente, pero si lo hace con el que se encuentra después de este último.

Ello dio origen a la separación de los fusibles de una serie en dos grupos denominados rangos o valores preferidos y los no preferidos. Los de valores preferidos coordinan entre si, o sea cada uno con el siguiente, ocurriendo lo mismo con los del grupo no preferido. No coordinan los de valores nominales consecutivos de distintos grupos. Esto puede visualizarse en algunas gráficas de $I = f(t)$ donde se dan las dos líneas, o sea, curva promedio mas tolerancia y curva promedio menos tolerancia, suministrando dos hojas distintas, una para los preferidos y otra para los no preferidos, en donde se pone de manifiesto que no existen zonas de superposición entre las bandas de operación.

Además, usualmente los rangos preferidos corresponden a los valores nominales de corriente citados en las normas del país, de ahí el nombre.

6.1.3- Otros factores que afectan la selectividad

a) Carga desigual

En la Figura 6.2 se indica un caso extremo. Si la corriente de falla es muy rigurosa, prácticamente no influye la temperatura del fusible, en cambio para sobrecargas (corrientes de falla no muy elevadas) la curva característica $I = f(t)$ resulta modificada por precarga, pudiendo en algún caso impedir el cumplimiento de la selectividad.

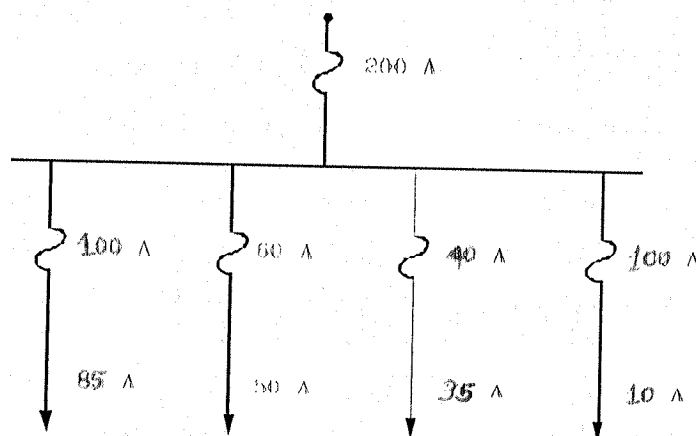


Figura 6.2

b) Ordenamiento del sistema

En la Figura 6.3 puede verse que el fusible de 300 A y el de 400 A en determinados casos no serán selectivos, ante lo cual debe recurrirse a modificar el circuito, trasladando la carga de 260 A. a la nueva posición marcada con línea de trazos.

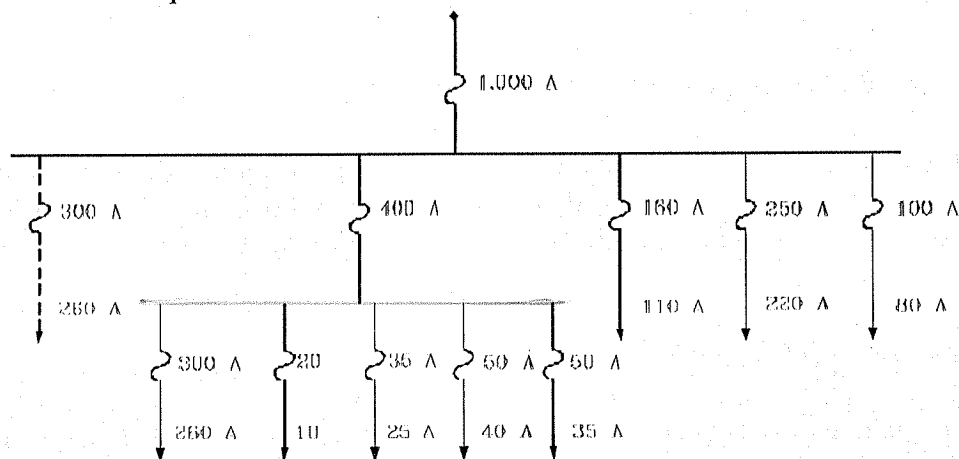


Figura 6.3

c) Modificación de las condiciones de funcionamiento

Esto se debe a diferencias entre las condiciones de trabajo y aquellas con las que se determinaron las curvas características, como por ejemplo: temperatura ambiente, calor recibido desde el exterior, cambio del porta fusible, precarga, instalación en gabinete con refrigeración restringida o facilitada, etc.

6.1.4- Exigencias de la selectividad

El grado de exactitud requerido depende de la aplicación del circuito. Hay tres casos típicos:

a) Vital

Aplicable a servicios públicos, equipos de auxilio, hospitales, subterráneos, iluminación de industrias (con riesgo para el operario), minas, etc.

En este tipo es donde se sacrifica la economía con el objeto de salvaguardar la vida de seres humanos.

b) Importante

Casos de industrias, donde la energía eléctrica puede considerarse materia prima, una falta de selectividad produce inconvenientes y grandes pérdidas económicas. Esto se presenta donde resulta demasiado caro modificar el circuito prefiriéndose en tal caso sacrificar parte de la selectividad.

c) No importante

Aquí prácticamente se deja de lado la selectividad por otras premisas como por ejemplo:

- las exigencias de protección de un equipo impiden el cumplimiento de la selectividad.
- interruptores que se protegen de corrientes que superan su capacidad de ruptura.
- circuitos de uso muy esporádico.
- redes de emergencia.
- etc.

6.1.5- Selectividad entre fusibles de distinto tipo

Esta es la situación que se presenta frecuentemente en el campo de aplicación de los fusibles de media tensión, donde se debe estudiar la coordinación entre dispositivos del tipo limitador y no limitador (expulsión) a continuación veremos los distintos casos que pueden presentarse.

1- Coordinación fusible expulsión - fusible expulsión

Se efectúa teniendo en cuenta las condiciones explicadas anteriormente, en lo que se refiere a la superposición y bandas de tolerancia de las curvas $I = f(t)$. Los fusibles de expulsión tipo "K" y "T" son los más utilizados en nuestro País.

Estos fusibles no poseen valor (constante) de energía específica, pues como se mencionó previamente, para cortar definitivamente la corriente, esperan el pasaje normal por cero, de manera que a medida que crece la corriente presunta el valor:

$$\int i^2 dt, \quad (6.6)$$

será mayor

Además los dos fusible interrumpirán en el mismo pasaje por cero, o sea no serían selectivos. Por lo tanto si la corriente de falla posible en el lugar es mayor que la que provoca la fusión en 10 ms no se puede garantizar selectividad, debiendo recurrir a otro tipo de fusible para solucionar el inconveniente.

2- Coordinación fusible limitador - fusible limitador

En este caso es válido el uso de los valores de I^2t y de las curvas $I = f(t)$ como ya fue explicado.

3- Coordinación fusible expulsión - fusible limitador

Aquí es necesario efectuar el estudio por separado, según esté el de expulsión del lado de la carga o del lado de la fuente.

a) Fusible de expulsión del lado de la carga.

En este caso se deben comparar solamente las curvas de $I = f(t)$. Pues para corrientes que provoquen la fusión del de expulsión en tiempos menores que 10 ms, el limitador mantendrá su valor I^2t constante, en cambio el de expulsión permitirá cada vez mayores energías específicas, o sea siempre operará el limitador antes que el de expulsión y por lo

tanto no actuarán selectivamente.

b) Fusible de expulsión del lado de la fuente

El fusible de expulsión extingue el paso de la corriente en el pasaje por cero natural, este cero natural puede tardar como máximo 16 ms (para 50 Hz) en presentarse. Por lo tanto la curva característica $I = f(t)$ máxima al cortarse con ese valor, se transforma en una horizontal que continúa paralela al eje de corriente, hasta su capacidad de ruptura. En conclusión para este caso es suficiente con comparar la curva $I = f(t)$ pues si la corriente es mayor que la que hace operar al de expulsión en 10 ms siempre responderá antes el limitador, obteniéndose una adecuada selectividad. Este no es un caso común.

6.2 Coordinación fusible - reconnector

(Respuesta del fusible frente a cargas repetitivas)

Previamente se recordará la idea de que es un reconnector. Se trata de un dispositivo que ante fallas responde operando de la siguiente manera: primeramente desconecta en un intervalo de tiempo que depende del valor de la corriente de falla, luego permanece abierto un cierto tiempo fijo predeterminado (independiente de la intensidad de falla), a continuación vuelve a conectar durante un tiempo dependiente de la corriente, y así sucesivamente en cuatro oportunidades según un ciclo de trabajo establecido. Generalmente se trata de un ciclo de trabajo compuesto por: dos operaciones rápidas, dos lentas, luego de las cuales permanece abierto; puede tratarse de una rápida y tres lentas, etc. En la Figura 6.4. se muestra una ciclo típico de trabajo.

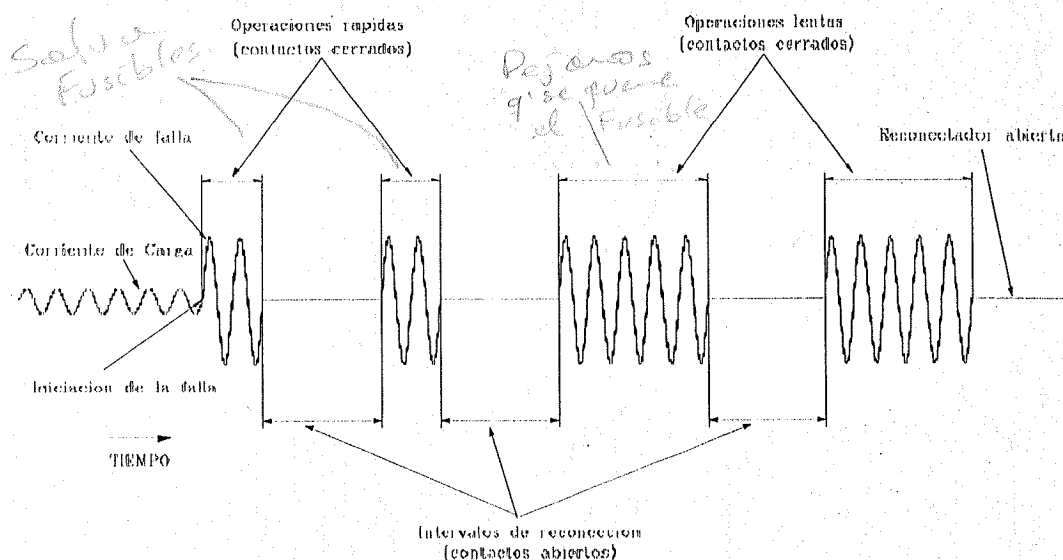


Figura 6.4

Los reectores van en serie con fusibles, por lo que se hace necesario coordinarlos, dependiendo de esta coordinación el éxito del funcionamiento conjunto de ambos dispositivos. Estudios realizados por el EPRI muestran que los fusibles son los elementos que más actúan en los sistemas radiales, aproximadamente el 87 % de las faltas fueron

interrumpidos por ellos, juntamente con una elevada operación de los reconectores sin cumplir con el ciclo completo. Lo que significa que las fallas permanentes son limitadas en su área de influencia por la combinación reconector fusible. El estudio de coordinación se comienza con el establecimiento de las exigencias o el cumplimiento de determinadas condiciones, como por ejemplo: (condiciones máximas)

- * El fusible debe ser capaz de soportar tres ciclos de operaciones, luego de las cuales debe operar, antes de que el reconector desconecte definitivamente. (para un fusible del lado de la carga del reconector)

- * El fusible debe permanecer inalterado para el ciclo completo de operaciones del reconector, incluso sin que resulten afectadas las características de respuesta (para un fusible del lado de la fuente del reconector)

Por lo planteado se observa que primeramente se deben establecer las condiciones de respuesta requeridas.

Para realizar esta análisis en forma correcta se debe disponer de la siguiente información:

- * Del reconector: curva característica $I = f(t)$ para todos los tipos de operación tales como lenta, rápida, extra - rápida y las que posea; las cuales se dan en gráficos como el mostrado en la Figura 6.5. Además, se deben conocer los tiempos de desconexión para cada una de las operaciones indicadas. (estos tiempos de desconexión son fijos, no dependen de la corriente de falla I_p)

- * Del fusible: curva característica $I_p = f(t_f)$ o sino la $I = f(t)$

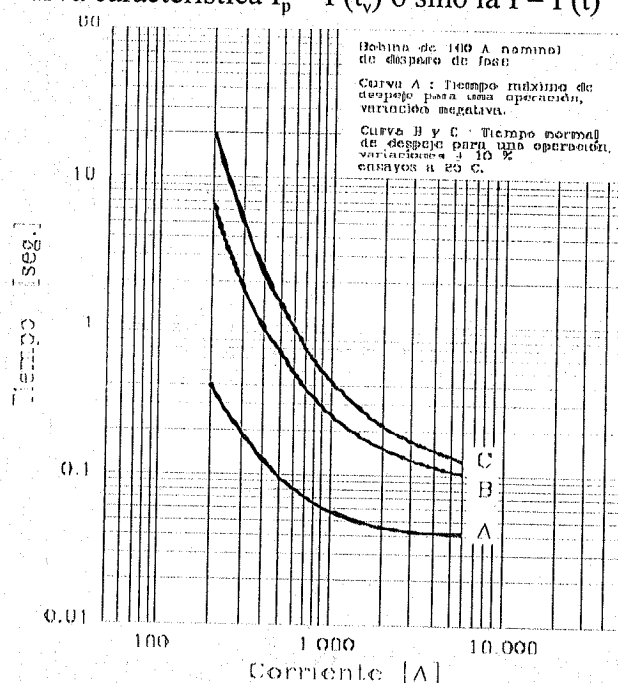


Figura 6.5

6.2.1- Métodos utilizados para la coordinación

6.2.1.1- Método simplificado A

Para saber si los ciclos de conexión y de desconexión elevarán la temperatura del fusible hasta llegar al punto de fusión, debe conocerse su curva de calentamiento y enfriamiento. El comportamiento puede determinarse gráficamente simulando las curva de elevación y descenso de temperatura a partir de los datos brindados por la curva característica $I = f(t)$. En general los fusibles pueden ser considerados como cuerpos cuyo calentamiento y enfriamiento responden a las siguientes expresiones exponenciales:

para el calentamiento:

$$T = T_f \left(1 - e^{-t/\theta} \right) \quad (6.7)$$

para el enfriamiento

$$T = T_f \left(e^{-t/\theta} \right) \quad (6.8)$$

Donde θ es la constante de tiempo expresada en segundos, que es distinta para cada fusible, la cual puede calcularse con suficiente exactitud con la ecuación:

$$\theta = 0,1 \cdot S^2 \quad (6.9)$$

Siendo S la relación de velocidades, que se define como: "La relación entre la corriente de fusión para un tiempo de 0,1 seg., y la corriente de fusión para 300, 600 o 1000 s. según de que tipo de fusible se trate".

Las Normas NEMA establecen:	para 100 A. y menores	300 s.
	para mayores de 100 A.	600 s,
	para tipo C	1000 s.

La Norma IRAM 2245 solo fija límite inferior de la curva $I = f(t)$ en 10 ms, no especificando valores en lo que respecta al tiempo máximo.

Esta constante de tiempo nos permite graficar el camino seguido por la temperatura del elemento fusible, en valores porcentuales de un nivel hipotético de temperatura en régimen permanente, alcanzado cuando el elemento fusible no se abre a la temperatura de fusión, sino que continúa siendo una resistencia de valor constante; para ello deben conocerse la secuencia y duración de los ciclos de operación del reconectador.

El próximo paso es determinar a que temperatura el fusible alcanza la fusión y con la corriente de falla calculada se encuentra el tiempo de fusión el que se transforma en múltiplo de la constante de tiempo, con el que se entra en abscisas, levantando una paralela al eje de coordenadas hasta cortar a la curva de calentamiento, ese punto da la temperatura relativa de fusión en por ciento. De igual manera se determina el tiempo total de operación y la temperatura en %.

Si la marcha de la curva de la temperatura del elemento fusible alcanza a tocar a la

temperatura de fusión ya determinada en el paso anterior, en el fusible se produce la interrupción.

Si se desea que el fusible no opere ni sea afectado, la curva de la marcha de la temperatura debe estar por debajo de la temperatura de fusión corregida por un coeficiente de seguridad de 1,33 ($1/0,75$) o sea, no debe alcanzarse el 0,75 de la temperatura de fusión.

Si se desea obtener mayor exactitud se puede representar la misma gráfica en coordenadas logarítmicas, con lo cual la curva de enfriamiento se transforma en una recta. La Figura 6.6 indica el procedimiento a seguir

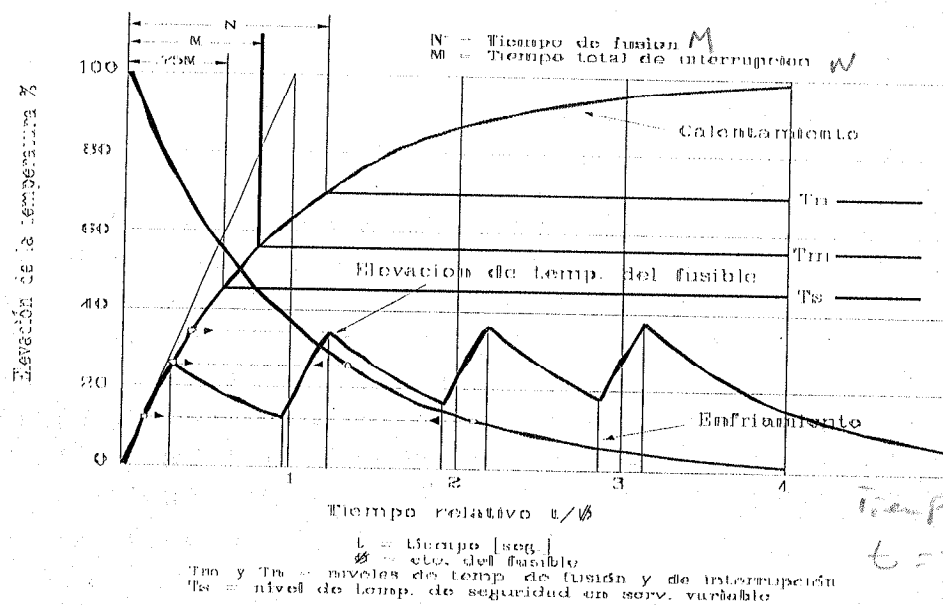


Figura 6.6

Para facilitar este trabajo el fabricante suministra una gráfica en papel transparente, donde además, se da una breve explicación del método, juntamente con una tabla, la cual deberá llenarse con las características nominales del fusible y del reconectador. En esta gráfica el eje de coordenadas verticales es logarítmico, por lo que la curva de enfriamiento se transforma en una recta.

A continuación se enumeran los pasos a seguir para efectuar el análisis de selectividad en el orden correcto:

- A partir de la curva característica $I = f(t)$ del fusible se determina la relación de velocidades S y se calcula la constante de tiempo θ , con lo que se gradúa el eje de abscisas.
- Con el valor de la corriente de falla, entrando a la curva característica del fusible, se determinan los tres niveles de temperatura, correspondientes a: fusión, 0,75 de fusión e interrupción completa.
- De la curva característica $I = f(t)$ del reconectador se obtiene el tiempo de respuesta para la corriente de falla dada, tiempo que corresponde al primer período de calentamiento. De similar manera se determinan los tiempos de funcionamiento y desconexión de la carga cíclica en estudio.

d) Con los valores nominales del reconectador, como ser: intervalo de desconexión, tiempo de reapertura, etc. se construye la curva del camino o marcha de la elevación y descenso de la temperatura del fusible. Ídem con carga cíclica.

e) Si es necesario que el fusible no opere, su temperatura no debe alcanzar al 0,75 de la de fusión. Si en cambio se desea que funda abriendo la corriente de falla, se debe llegar al 100 % de la temperatura de fusión. La abscisa del punto de corte, una vez transformada en tiempo absoluto, nos indica el momento de la operación.

- Justificación del método

El calor generado dentro del fusible, es disipado por conducción, convección y radiación. Todo el proceso depende de la temperatura de la fuente de calor, en una forma muy compleja. Por lo tanto si se debe tratar a los ciclos de enfriamiento y calentamiento del fusible de manera mas o menos rutinaria, debe expresarse el complejo proceso de transferencia de calor en una manera simple, lógicamente que los resultados solo serán aproximados. Esta manera sencilla está representada por la suposición que la pérdida de calor es proporcional a la elevación de temperatura T sobre la del ambiente.

Además, la resistencia óhmica de la fuente de calor, la cual varía con la temperatura, debe representarse a través de un valor medio R el que se mantiene fijo para cualquier temperatura. Bajo tales suposiciones, la elevación de la temperatura de un fusible cuando está representado por una corriente constante, durante un tiempo t , está dada por:

$$T = T_f \left(1 - e^{-t/\theta} \right) \quad (6.10)$$

Donde θ es la constante de tiempo térmica del fusible y T_f la temperatura final alcanzada, suponiendo que el proceso de calentamiento no es interrumpido por la fusión, pasando la temperatura de fusión manteniendo constante su valor de resistencia R . En realidad el fusible no actúa de esta forma, pero esta condición hipotética constituye un concepto de mucha utilidad para este análisis.

A la temperatura final de régimen T_f ya sea real o teórica, se alcanza un equilibrio entre el calor que entra y el perdido. Este concepto se expresa mediante la relación:

$$I^2 R = T_f K \quad (6.11)$$

Donde K es la constante de disipación de calor o la pérdida de calor en vatios por grado centígrado ($W/^\circ C$).

Se mantiene la misma relación para el caso en el cual la corriente es I_m , la cuál produce la fusión luego de un tiempo muy largo del orden de los 300 s o más; en tal caso T_f es idéntico a la temperatura de fusión T_m .

La ecuación anterior se transforma en:

$$I_m^2 R = T_m K \quad (6.12)$$

Esto da la corriente para la cual la curva de fusión se transforma en paralela al eje de tiempos.

En el otro extremo de la curva corriente - tiempo, o sea para tiempos muy cortos, solo una pequeña parte del calor que ingresa es disipado; prácticamente se lo emplea en su totalidad para elevar la temperatura del fusible hasta el punto de fusión. Esto se expresa con la siguiente ecuación:

$$I^2 R t = C_h T_m \quad (6.13)$$

donde C_h es el valor medio de la capacidad térmica del fusible en $W s/^{\circ}C$. El producto $C_h T_m$ es el trabajo total necesario para producir la fusión. La ecuación anterior es aplicable a la parte inferior de la curva corriente-tiempo donde se tiene una recta de pendiente 2:1 y de valor constante.

Para muchos tipos de fusibles (en una aplicación particular debe comprobarse si esto se cumple) la parte recta con pendiente 2:1 de la curva de fusión se presenta para tiempos de hasta 0,1 s.

Si se escribe la ecuación anterior para estos tiempos:

$$I_{0,1}^2 \cdot R \cdot 0,1 = C_h \cdot T_m \quad (6.14)$$

La corriente de fusión para 300, 600 o 1000 s, según el tipo de fusible, es prácticamente la corriente mínima de fusión, designada con I_m en las expresiones anteriores; por lo tanto si reemplazamos el valor de T_m de una de las anteriores en esta última se tiene:

$$C_h / K = 0,1 \cdot \left(\frac{I_{0,1}}{I_m} \right)^2 \quad (6.15)$$

El término $I_{0,1}/I_m$ se conoce como relación de velocidades de fusión (S). La relación C_h/K representa la constante de tiempo térmica θ del fusible, por lo que se verá a continuación. Para ello recurriremos a una analogía eléctrica en este proceso térmico. El circuito eléctrico correspondiente es el mostrado en la Figura 6.7.

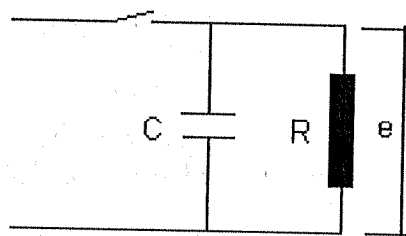


Figura 6.7

En el circuito anterior, la tensión en el condensador es equivalente a la elevación de

temperatura del elemento fusible; la corriente derivada por la rama en paralelo, constituida por la resistencia equivale a la pérdida de calor en el fusible. La corriente constante que ingresa al circuito representa el valor constante de calor que entra, o sea, I equivale a $I^2 R$. La corriente por la rama en paralelo es E/R que equivale a la pérdida de calor TK . La capacidad del capacitor representa a la capacidad térmica, o sea C equivale a C_h . En consecuencia la constante de tiempo RC es equivalente a Ch/K , que en nuestro caso es la constante térmica (θ) del fusible.

Por lo tanto:

$$\theta = 0,1 S^2$$

(6.16)

Tal expresión es la clave para efectuar la coordinación entre fusibles y reconectores. Los resultados obtenidos son solo aproximados, pero se utiliza este método ya que no existe ninguna otra forma para la evaluación de la respuesta del fusible frente a cargas cíclicas o repetitivas.

6.2.1.2- Método simplificado B

Este método es mucho más simple de aplicar que el anterior, pero solo da como resultado el máximo valor de corriente para el cual se garantiza la selectividad. El método consiste en multiplicar los tiempos de las curvas rápidas y retardadas del reconector por factores de corrección. Tales factores se determinan en base a tablas, como la que se transcribe bajo la denominación de Tabla 6.4, en la que se entra con el número de operaciones del reconector y el tiempo de reconexión.

Tabla 6.4: Factores de multiplicación

Tiempo de reconexión en ciclos	una operación rápida		dos operaciones rápidas	
	promedio	máximo	promedio	máximo
25 - 30	1,3	1,2	2,0	1,80
60	1,3	1,2	1,5	1,35
90	1,3	1,2	1,5	1,35
120	1,3	1,2	1,5	1,35

La curva corregida del reconector, se traza en una gráfica conjuntamente con las de tiempo máximo y mínimo de los fusibles; el punto de intersección entre ellas nos indicará los valores de corriente mínima y máxima, según el caso que se esté estudiando, para los cuales se presentará selectividad entre el fusible y el reconector.

6.3 Coordinación reconector - seccionalizador

6.3.1- Principios de coordinación

En la aplicación de seccionadores se deben seguir los siguientes principios básicos de coordinación:

- La corriente mínima de actuación del seccionalizador debe ser al menos el 80 % del nivel mínimo de disparo del dispositivo del lado de la fuente. En caso de seccionadores electrónicos, el valor puede ser el 100 %.

En caso de unidades hidráulicas se emplea la misma serie nominal de bobinas, la corriente mínima de actuación es 1,6 veces el valor nominal de la bobina, para tener así coordinación

adecuada con el disparo mínimo del reconectador.

- Si el seccionalizador no dispone disparo de tierra, su coordinación se hace con el disparo de fase del reconectador. Si se coordina con el disparo de tierra del reconectador, el seccionalizador puede originar disparo erróneo.
- El seccionalizador debe regularse para quedar abierto con una operación menos que el reconectador de respaldo. En caso de poseer varios seccionalizadores en serie, deben disponerse con una, dos o tres operaciones menos que el reconectador.
- Los tiempos de operación y muertos del reconectador se deben coordinar con el tiempo de retención del seccionalizador. O sea, la suma de ellos, excepto el primer tiempo de operación, debe ser mas corta que el tiempo de memoria del seccionalizador. Si esto no ocurre, el seccionalizador olvidará parcialmente la cuenta, por lo cual el reconectador efectuará la última operación pasando ambos dispositivos a "abierto".
- Los seccionalizadores trifásicos solo pueden usarse con reconectores trifásicos que abren las tres fases simultáneamente, ya que una operación no simultánea puede ocasionar el intento de interrumpir corriente de falla por parte del seccionalizador, para lo que no ha sido diseñado.

6.3.2- Coordinación reconectador - seccionalizador con control hidráulico

El caso típico es el de un reconectador con cuatro operaciones, independientemente cuantas de ellas son rápidas y cuantas lentas, respaldando un seccionalizador con menos conteos que cuatro. Al menos luego de la tercera, el seccionalizador abrirá en el tiempo muerto del reconectador, posteriormente este cerrará sin falla, permaneciendo en el circuito la porción sana. Si hay mas en serie, se disminuye el número de conteo de uno en uno. De acuerdo a lo mencionado en el ítem anterior, un reconectador con bobina de 50 A, funcionará adecuadamente con un seccionalizador con bobina también de 50 A, ya que las mínimas de disparo serán respectivamente 100 A y 80 A.

Los seccionalizadores hidráulicos no permiten cambiar los tiempos de memoria, ya que están fijados por el circuito hidráulico y la viscosidad del aceite. Tal viscosidad depende de la temperatura del aceite, que es función del ambiente y del estado de carga.

La siguiente tabla muestra el valor del tiempo de memoria como función de la temperatura del aceite.

Tabla 6.5: Tiempo de memoria en función de la temperatura

Temperatura del aceite (° C)	Tiempo de memoria (seg.)
0	132
10	75
20	45
30	32
40	25
50	20
60	15

El estado de precarga produce una elevación de temperatura del aceite, como se muestra en la tabla:

Tabla 6.6: Aumento de temperatura del aceite en función de la precarga

Corriente de precarga (% In bobina)	Elevación de temperatura (° C)
25	2
50	7
75	15

Se denomina tiempo acumulado total al tiempo transcurrido desde el instante de interrupción de la primer operación hasta el momento en el cual el seccionizador debe abrir. Por ejemplo si tenemos un reconectador con cuatro operaciones, llamamos TF al tiempo con corriente de falla y TM al tiempo muerto, por lo tanto si el seccionizador debe abrir al contar tres, el tiempo acumulado será:

$$TM_1 + TF_2 + TM_2 + TF_3 \quad (6.17)$$

Si el seccionador debe bloquear luego de contar dos, el tiempo acumulado es $TM_1 + TF_2$. Por lo tanto, las condiciones que deben cumplirse para garantizar la coordinación, son:

a- El tiempo acumulado con corriente de falla no debe superar al 70 % del tiempo acumulado permitido.

En caso de dos conteos, TF_2 no puede superar al 70 % de $TM_1 + TF_2$, en caso de tres conteos $TF_2 + TF_3$ no debe superar al 70 % de $TM_1 + TF_2 + TM_2 + TF_3$.

b- El tiempo acumulado total no debe superar al valor obtenido de las tablas anteriores, para la temperatura ambiente y el estado de precarga del caso.

Por ejemplo, tenemos un reconectador de una operación rápida y tres lentas, con seccionador para tres conteos, ambiente a 30 °C y precarga del 50%. De la tabla 6.6, 50 % precarga significa elevación de 7°, de la primera tabla para 30 + 7 °C se obtiene un tiempo total acumulado de 28 seg. Como las dos operaciones, segunda y tercera son iguales, lentas, el tiempo de cada una de ellas no debe superar el 35 % de 28 seg., o sea el tiempo de operación en la curva lenta no puede superar a los 9,8 seg. La segunda regla nos dice $TM_1 + TF_2 + TM_2 + TF_3$ no puede superar a 28 seg, o sea descontando los 20 seg. de las operaciones nos quedan 8 seg. para los dos tiempos muertos, si son iguales podemos tener 2 seg. cada uno o 2 y 5 seg. respectivamente.

6.3.3- Coordinación reconectador - seccionizador con control electrónico

Los niveles de actuación se seleccionan análogamente al caso anterior, o sea el nivel del seccionizador debe ser 80 % del nivel del reconectador. Por ejemplo si el reconectador dispara con 280 A, el seccionizador debe comenzar a contar con 224 A (80 % de 280A).

Los niveles de tiempo de memoria en los electrónicos son opcionales, en 30, 45 o 90 seg. Por ejemplo si tenemos un caso con tiempos muertos de 5 y 15 seg., con corriente que provocan las dos operaciones retardadas en 6 seg., el tiempo total será $5+6+15+6 = 32$ s, deberá elegirse un tiempo de 45 s.

El tiempo requerido por el seccionizador para restablecerse, o sea para fijar su valor de arranque de conteo nuevamente en 0, es función de las operaciones y del tiempo de memoria, como se muestra en la tabla:

Tabla 6.7: Tiempos de restablecimiento

Tiempo de Memoria (seg.)	Tiempo de restablecimiento (min.)	
	Una operación	Dos operaciones
30	5	7 ½
45	7 1/2	11 ¼
60	15	22 ½

Para los valores del ejemplo anterior, al ser de 45 seg., requerirá 11 ¼ minutos para restablecerse. Si se presenta una falla entre los 45 seg. y los 11 ¼ minutos, el conteo será incierto.

Accesorios:

- Restablecimiento rápido: disminuye el tiempo de restablecimiento a 60 segundos, valor que es compatible con los homólogos de los reconectores, pues en un día problemático 22 minutos puede pensarse como demasiado largo.
- Supresión de voltaje: evita el conteo por operaciones de equipos de recierre aguas abajo, ya que si hay falta de corriente con tensión, no lo considera.
- Supresión por corriente de conexión: eleva el múltiplo de la corriente de carga para no contar, a 2, 4, 6, 8 o bloquea la cuenta cuando hay tensión aplicada.
- Sistema de corriente a tierra: posee una detección de corriente a tierra que debe coordinarse con el equivalente del reconector de respaldo, empleando el mismo criterio de sensibilidad del 80 % de la correspondiente al reconector.

6.3.4- Coordinación reconector - seccionalizador - fusible

Este trabajo de coordinación se hace simplemente aplicando las reglas ya conocidas. Debe tenerse en cuenta una sola consideración, muy importante, que es cuando el fusible interrumpe, el seccionalizador cuenta una vez mas, produciendo una actuación errónea. Tal es el caso cuando el reconector está regulado para dos operaciones rápidas y dos lentas, ya que el fusible opera en la primer lenta, contando tres el seccionalizador y abriendo. La solución para este caso radica en el cambio de la secuencia del reconector por una rápida y tres lentas, quemando el fusible en la primera lenta. Otra posible solución es mediante el agregado del accesorio de supresión de voltaje.

Bibliografía:

- 1- IPSEP, 1er. Curso Latinoamericano de Posgrado sobre fusibles eléctricos y sus aplicaciones; UNRC, Río Cuarto, Córdoba, 1992.
- 2- McGraw-Edison, Selección uso y mantenimiento de reconectores automáticos de circuito
- 3- McGraw - Edison Company; Distribution System Protection Manual, Pennsylvania, 1977.