

6.5 Coordinación de los dispositivos:

6.5.1- Coordinación fusible - interruptor automático o con comando a relé

El interruptor, ya sea del tipo automático (con los mecanismos electromagnéticos y térmicos incorporados) o con relés externos, posee curvas de respuesta compuestas de dos o tres porciones, una denominada térmica o de tiempo inverso, cuyo rango de operación va desde sobrecargas del 15 % hasta 6 a 8 veces el valor nominal, dependiendo del tipo y aplicación del equipo, con pendiente muy inferior a la del fusible de valores nominales equivalentes. Pasando a una porción vertical de la característica, que se presenta para el tiempo en el que reacciona el mecanismo o dispositivo electromagnético, cuyos tiempos mínimos de operación se encuentran entre los 15 a 20 ms, debido a la inercia mecánica de los elementos involucrados y además por tratarse de interruptores que esperan el pasaje por cero para la interrupción. En la década del 70 aparecieron los interruptores denominados de alta capacidad de ruptura, los cuales por un sistema de cierre de contactos debilitado, lograban que las fuerzas electrodinámicas del cortocircuito provocaran la separación de los contactos, iniciando el proceso de apertura en tiempos muy cortos, logrando forzar el cero de corriente, controlando de tal manera la energía específica de arco. Estos dispositivos están solo disponibles para sistemas de baja tensión, voltajes no superiores a 600 V y corrientes de hasta unos 1000 A, poseyendo una curva característica corriente tiempo con un nuevo escalón, el tercero, ubicado en el valor de corriente para el cual se inicia el fenómeno de limitación, continuando de ahí en mas como una línea con pendiente constante, o sea I^2t limitado. Además, de igual modo que ocurría para los fusibles se disponen de curvas de corriente limitada y de energía específica, cuyas formas son muy similares a las del dispositivo citado. Ver Figura 6.18.

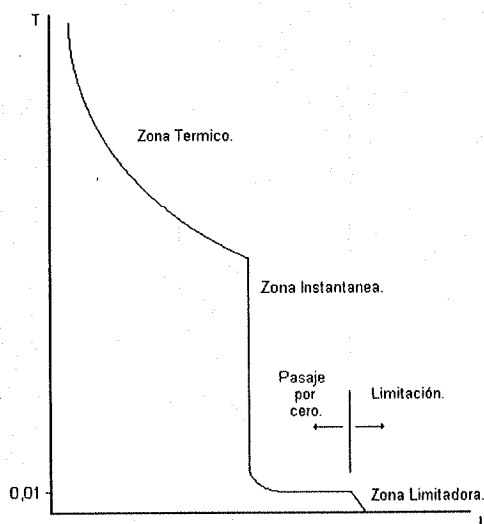


Figura 6.18

La incorporación de nuevos accesorios a los interruptores básicos, complica su estudio, debiendo analizar en que manera el trabajo de coordinación es afectado, siendo el agregado más importante para este análisis el del relé de tierra o diferencial, cuyas corrientes de actuación son muy bajas, operando en forma instantánea o sea sin retardo alguno.

El estudio de la coordinación entre estos dos elementos es muy similar al ya analizado para fusibles entre sí, teniendo en cuenta las particularidades citadas en el párrafo anterior.

La posición relativa entre los dispositivos presenta las siguientes dos posibilidades:

a- Fusible aguas abajo del interruptor

En la zona de corrientes que producen la operación térmica del interruptor (corrientes inferiores a las que inician la operación instantánea o electromagnética), será suficiente con comparar las curvas características de tiempo total mas tolerancia del fusible con la homóloga menos tolerancia del interruptor, si no hay zonas superpuestas, los dispositivos son selectivos para tales sobrecargas. Debe recordarse que la operación térmica del interruptor puede estar muy influenciada por la precarga (estado de carga previa a la falla), por lo cual la curva menos la tolerancia debe incluir esta modificación de la respuesta.

Si la corriente es suficiente para producir la operación instantánea o sin retardo del interruptor, debe dejarse un lapso de tiempo de por lo menos 100 ms entre la curva máxima mas tolerancia del fusible y la mínima del interruptor.

En caso que el interruptor sea del tipo limitador, la tercer parte o escalón de la curva se compara de la forma usual, existiendo selectividad si no hay partes superpuestas.

En esta aplicación el punto más crítico es el codo de la característica del interruptor, en el momento a partir del cual el retardo es fijo o pasa a limitación. Figura 6.19.

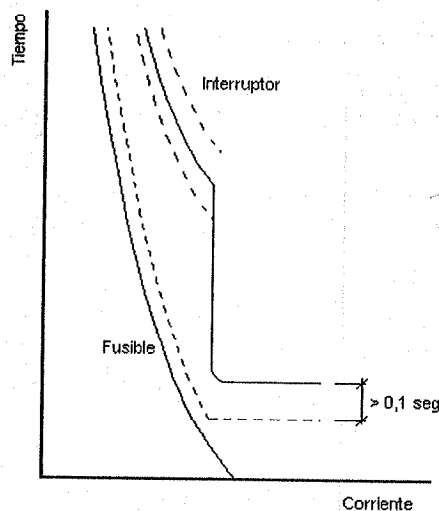


Figura 6.19

b- Fusible aguas arriba del interruptor

Las curvas se comparan de la forma indicada previamente, teniendo nuevamente en cuenta el estado de precarga del interruptor. En este caso el punto crítico se encuentra en la zona de cruce de la porción térmica e instantánea del interruptor, que debe mantener con el fusible una tolerancia de al menos 70 ms. Ver Figura 6.20.

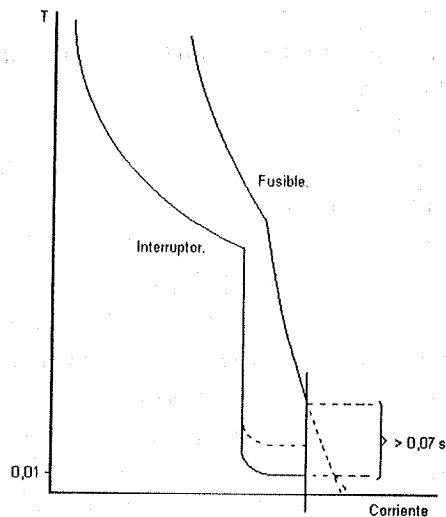


Figura 6.20

Si el interruptor no posee limitación y el fusible es ACR, para valores altos de cortocircuito, del orden de 30 a 50 veces la nominal de interruptor el fusible actuará antes que el interruptor, debido a su propiedad de mantener el valor de I^2t constante, dejando de actuar en forma selectiva a partir del punto de cruce. Esta particularidad de la combinación fusible interruptor es en ciertos casos explotada a fin de lograr una protección más económica y ocupando menor espacio, principalmente en instalaciones con elevada corriente de falla. Tal aplicación consiste en el empleo de un interruptor de reducida capacidad de ruptura, respaldado por un fusible del tipo limitador, el cual actuará antes que el interruptor cuando la corriente de falla supere la capacidad de ruptura de este último, permitiendo que el interruptor corte todas las corrientes que se encuentran dentro de su capacidad de interrupción. Tal combinación es muy económica, ya que debido a la incidencia reducida de corrientes de cortocircuito elevadas, se deberán reemplazar solo unos pocos fusibles durante la vida útil del interruptor, evitando la operación del fusible frente a las corrientes frecuentes de sobrecarga y cortocircuito no riguroso. El estudio de coordinación se efectúa en forma similar a lo ya indicado, con la especial precaución de que el fusible se haga cargo del trabajo de corte para corrientes menores o iguales a la capacidad de ruptura del interruptor, lo que se logra con el corte de las curvas características para estos valores. Ver Figura 6.21.

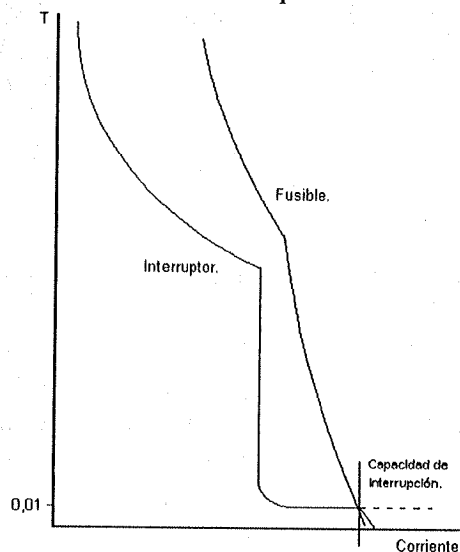


Figura 6.21

Si el interruptor es del tipo limitador, el estudio de coordinación es normal, debiendo tener especial cuidado en los dos codos de las curvas del interruptor, cruce de inversa con instantánea y corte de la instantánea por la línea de control de energía específica.

6.5.2- Coordinación interruptor - interruptor

Luego del análisis efectuado en el punto anterior, es poco lo nuevo que se puede agregar, excepto la diferencia en el estudio para casos de operación instantánea.

Aquí se presentan dos posibilidades, que se logre la selectividad porque el interruptor mayor no detecte la corriente y el menor la interrumpa o que ambos la detecten pero el mayor posea retardo no dependiente de la corriente.

En el primer caso deberá determinarse la corriente de cortocircuito máxima en el lugar de instalación del equipo menor, si ésta no supera la corriente de actuación instantánea del mayor, se verifica la selectividad; si se puede presentar una superior, cuando esto ocurra operarán ambos fuera de coordinación. Este caso es común en tableros de comando, donde las distancias entre el interruptor mayor y el menor son muy cortas, teniendo prácticamente la misma corriente de corto máxima en ambos puntos.

Si este inconveniente puede presentarse, la solución radica en emplear interruptores con retardo independiente de la corriente, por lo que ambos detectan la corriente, esperando el mayor un tiempo para la apertura definitiva del menor. Los tiempos de retardo requeridos para garantizar la coordinación son del orden de 150 ms para equipos electromagnéticos y 70 ms para los dispositivos electrónicos. El trabajo se muestra en la Figura 6.22.

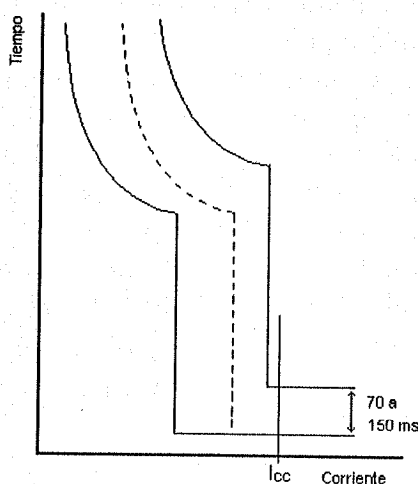


Figura 6.22

Bibliografía:

- 1- Siemens, Manual de baja tensión, Siemens SA, Buenos Aires, 1988.

6.6 - Coordinación fusible - descargador de sobretensión

A pesar de tratarse de dispositivos de protección contra fenómenos totalmente distintos, deben coordinarse entre sí ya que la operación de uno somete a situaciones anormales al otro y viceversa. El estudio depende de las posiciones relativas entre ellos, en lo que refiere a aguas arriba o aguas abajo.

6.6.1- Fusible del lado de la carga del descargador:

Este inconveniente se presenta solamente cuando el fusible empleado es del tipo limitador de corriente o de alta capacidad de ruptura, ya que al operar frente a rigurosas corrientes de falla genera una sobretensión dentro de los 50 a 500 μ s después de la fusión, denominada tensión de arco, cuya cresta está dada por la siguiente expresión:

$$e = L \quad di / dt \quad (6.28)$$

donde e = valor de cresta de la tensión de arco

L = inductancia del circuito

di/dt = velocidad de cambio de la corriente en función del tiempo

Los fusibles del tipo de expulsión o de baja capacidad de interrupción en general, no presentan este problema, ya que interrumpen en un pasaje por cero natural de la corriente, o sea que la variación de corriente con el tiempo es muy pequeña o nula, no apareciendo la sobretensión explicada previamente.

Esta ecuación muestra que a mayor velocidad de interrupción, más alto es el pico generado. También es muy importante la velocidad con la que crece esa tensión, la cual depende fundamentalmente del tipo de elemento fusible. Si se trata de elemento de sección uniforme, al interrumpir corrientes altas se generan arcos a lo largo del elemento, cuyo número es directamente proporcional a la corriente de falla, debiendo además tener en cuenta que la tensión por arco es una constante, función del material de relleno y del material del elemento. Por lo tanto la velocidad de crecimiento es proporcional a la corriente, alcanzando la cresta en tiempos del orden de 50 μ s.

Para controlar esta sobretensión y su velocidad de crecimiento se emplean elementos fusibles de sección no uniforme, por ejemplo en forma de lámina con estricciones o reducciones de sección con lo que se fija el número total de arcos, se eleva el tiempo de crecimiento a 500 μ s y se baja el pico a 3 o 4 veces la tensión nominal, haciéndolo independiente de la corriente de falla. Mediante un diseño cuidadoso de la forma de la lámina se logra independizar esta sobretensión de la intensidad de falla, quedando solo como función de la tensión del sistema donde se encuentra instalado, ya que debe oponerse a la tensión de red con una tensión mayor para lograr así el efecto de limitación. Esta explicación habilita el empleo de fusibles de tensión nominal dada en sistemas con voltaje nominal inferior, sin que esta elección conduzca a sobretensiones excesivas, siempre y cuando podamos asegurar que no estamos frente a elementos fusibles de sección uniforme.

La Figura 23 muestra la forma clásica de curva característica dada por el fabricante, a fin de determinar la sobretensión alcanzada en función de la tensión nominal del sistema donde se instala el dispositivo.

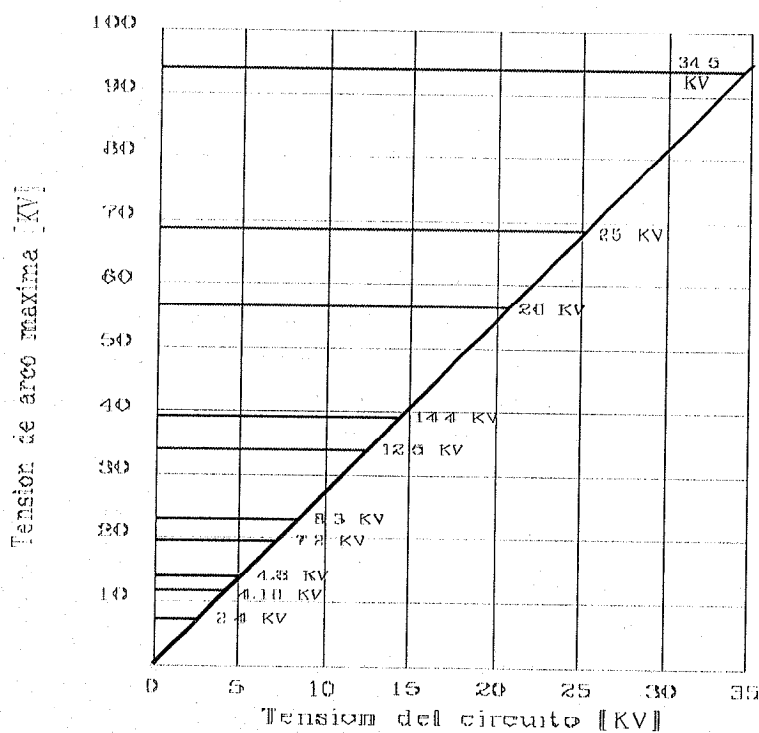


Figura 6.23

Esta tensión queda aplicada al descargador, provocando su cebado, compartiendo con él la corriente de falla del sistema, la cual se reparte aproximadamente en un 60 % por el descargador y el resto por el fusible. Esta sobretensión es de duración muy superior a la de diseño del descargador, que está preparado para tiempos de unos pocos μs , obligando al pararrayos a manejar energías del orden de 5 veces la máxima del ensayo de aprobación de tipo. Esto usualmente conduce a la destrucción del descargador, que fracasa en la interrupción, colocando esa fase a tierra.

El estudio de coordinación se basa en dos criterios:

- Controlar la sobretensión para evitar el cebado
- Controlar la energía, permitiendo el cebado y evitando el deterioro.

Para corrientes nominales altas del fusible, se controla la tensión con el uso de elemento de sección no uniforme.

Cuando las corrientes nominales del fusible son bajas, menores a 25 A, es muy difícil poder emplear láminas no uniformes, fundamentalmente por problemas de fragilidad, debiendo en tal caso usar hilo. La Figura 6.24 muestra la manera en que el fabricante informa con respecto a la sobretensión generada por fusibles de sección uniforme.

En esa situación controlamos energía, la cual está dada por la siguiente ecuación:

$$En = \frac{1}{2} L i_o^2 \quad (6.29)$$

Control que se logra por medio del mantenimiento de la corriente de cresta i_o tan baja como sea posible.

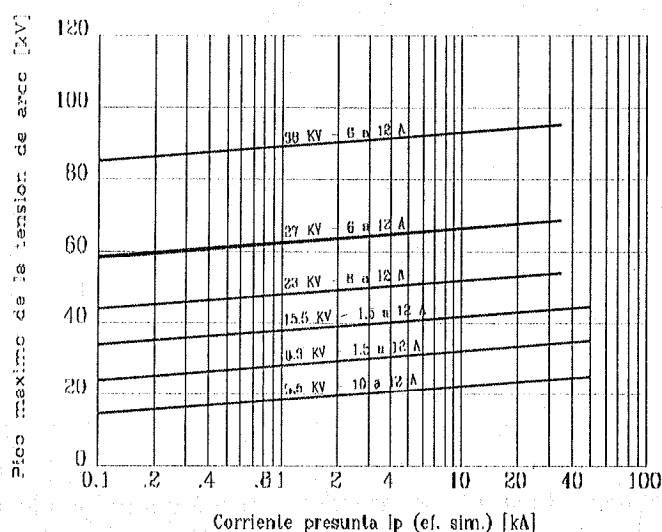


Figura 6.24

A fin de obtener un parámetro de aplicación común al descargador y fusible, se ha definido un nuevo elemento para el descargador, que es la denominado Tensión mínima de cebado para onda de impulso de conexión, con sus siglas en Inglés SS/SO (Switching surge sparkover), el cual se compara directamente con la tensión de pico del fusible, si esta última lo supera, el descargador se cebará y podrá ser deteriorado.

Para facilitar la decisión del diseñador del sistema, los fabricantes de fusibles dan tablas de selección donde se indica para cada tipo de conexión del sistema, la tensión nominal y de arco del fusible, con la nominal y SS/SO del descargador, que pueden trabajar en forma satisfactoria.

Tabla 6.9: Coordinación fusible limitador con descargador de sobretensión

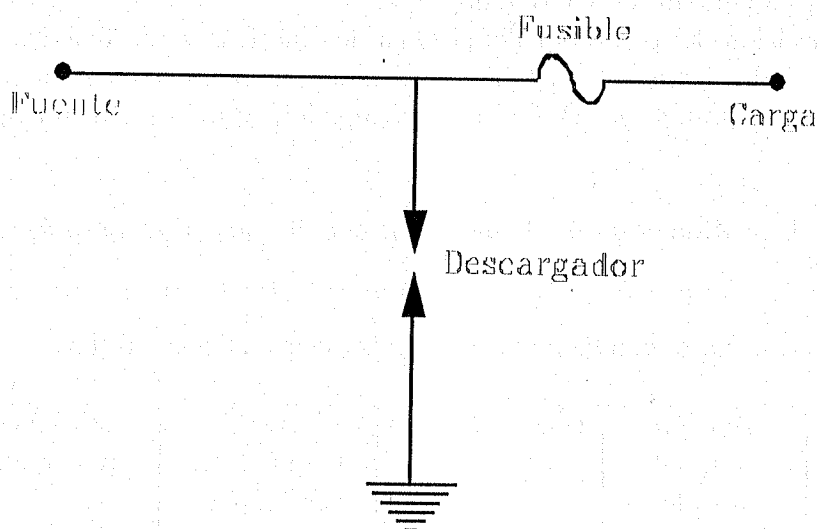
Sistema con cuatro conductores, en estrella puesta a tierra múltiple				
Tensión nominal del sistema (de fase)	Tensión nominal fusible	Tensión de arco máxima del fusible	Tensión nominal del descargador	SS/SO del descargador
kV	kV	kV	kV	kV
2,4	8,3	9	3	17
4,8	8,3	13,5	6	19
7,2	8,3	18,5	9/10	30
7,62	8,3	19,5	10	30
7,97	8,3	20,3	10	30
12	15,5	31	18	54
13,2	15,5	33	18	54
14,4	15,5	35	20	54

Tensión a la cual se cebará con una onda de Tensión del tipo de los generados por el fusible.

19,9	22,0	50	27	-
Sistema con tres conductores				
2,4	8,3	9	3	17
4,16	8,3	12,5	6	19
4,8	8,3	14,0	6	19
13,8	15,5	34	15	49

6.6.2- Fusible del lado de la fuente del descargador:

Este estudio debe hacerse para cualquier tipo de fusible, ya sea ACR o de expulsión. Aquí el problema difiere fundamentalmente del anterior, ya que en caso de que incida una descarga atmosférica sobre la línea, el descargador se ceba conduciendo la descarga a tierra, cuya corriente, mas la subsiguiente hasta el próximo pasaje por cero de la tensión, mas la de conexión del transformador atraviesan el fusible, pudiendo fundirlo total o parcialmente. En caso de que la fusión no sea total, no se produce manifestación externa alguna y el operador del sistema no reconoce la presencia del problema hasta que el daño es mayor. Si el fusible es de expulsión, lo que ocurre es la interrupción definitiva, en cambio si se trata de uno del tipo ACR, este envejecimiento conduce al fusible a operar en la zona prohibida explicada previamente. Ver Figura 6.25.



Este esquema es para fusible ACR limitado

Figura 6.25

Para el análisis de tal circunstancia se dispone de dos métodos:

- Mediante el uso de tablas que indican la corriente de descarga atmosférica con onda $8 \times 20 \mu s$ (mas la subsiguiente hasta la extinción en el descargador) que soporta cada calibre de fusible.

Esta información se complementa con los porcentajes de descarga que superan determinado valor de corriente de descarga.

De tal manera que la elección del fusible se basa en la aceptación o no de un valor de probabilidad de fusible operado por descarga atmosférica.

Tabla 6.10: Onda de descarga atmosférica soportada por fusibles ACR

Corriente de descarga A	Corriente nominal del fusible		
	8,3 kV	15,5 kV	22 kV
4300	-	-	25
5500	30	30	30
6100	40	-	40
6900	-	40	-
7600	50	-	-
9500	-	50	50
11000	65	-	-
12200	-	-	80
12600	-	65	-
13900	80	-	-
15200	-	-	65
17400	100	-	-
18300	-	80	-
19100	-	-	100
21800	125	-	-
25200	-	125	-
25800	112	100	-
27800	150	-	-
30500	-	-	125
34700	200	-	-
36700	-	150	-
51600	225	200	-

Tabla n° 6.11: Incidencia de descargas atmosféricas

Porcentaje de descargas caídas	Corrientes mayores a: (A)
50	1200
20	3000
5	9000
1	21000

- Usando la gráfica que suministra el porcentaje anual de número de fusibles quemados en función de la corriente nominal para un nivel isocerámico de 30, variando tal porcentaje en forma lineal con el nivel. Ver Figura 6.26.

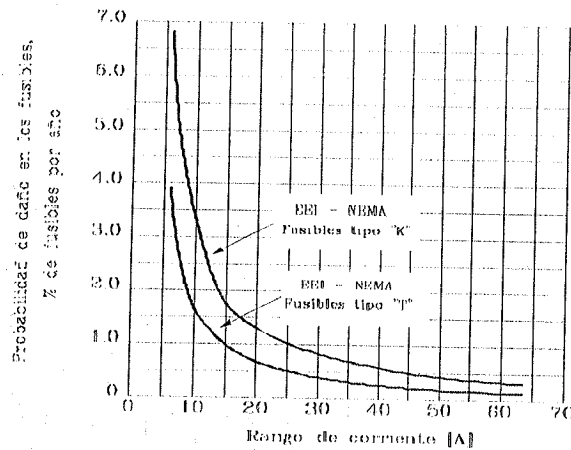


Figura 6.26

6.6.3- Conclusión:

Del estudio realizado, se concluye que si el descargador es de baja corriente de cortocircuito no debe ser ubicado del lado de la fuente del fusible limitador, salvo que se tenga la certeza que no será cebado por la tensión generada o si es cebado que su energía se encuentra dentro de los valores manejables por el descargador.

En caso de encontrarnos en zonas con nivel isocerámico alto, el fusible de cualquier tipo se trate, debe colocarse del lado de la carga del descargador: en caso de que esto no sea posible por la sobretensión, se coloca del lado de la fuente verificando que el fusible soporte la descarga mas la subsiguiente y la de carga o conexión del equipo protegido.

6.7- Coordinación fusible - seccionador bajo carga

Como ya fue explicado, los fusibles de alta capacidad de ruptura poseen una capacidad de ruptura muy alta, interrumpiendo la falla en tiempos sumamente cortos, controlando la energía específica, pero su punto débil se encuentra en el corte de corrientes bajas, la denominada corriente I_3 , cuyo valor nos permite subdividirlos en Respaldo, Propósito General o Campo Completo. Para la aplicación que estamos estudiando, en caso de contar con corrientes de cortocircuito muy elevadas, existe una combinación muy interesante desde el punto de vista técnico y económico, que consiste en fusibles coordinados con seccionadores bajo carga, de tal manera que el seccionador interrumpe las corrientes prohibidas para el fusible y este último corta las corrientes para las cuales el seccionador no posee capacidad de interrupción.

El elemento clave de la coordinación es el percutor del fusible, quien es el encargado de provocar la apertura del seccionador. Tal percutor tiene normalizadas sus características de trabajo mecánico, o sea la curva capacidad de desarrollo de fuerza en función de la distancia, existiendo dos tipos, denominados servicio Normal y servicio Pesado, que deben desarrollar fuerzas de 20 y 40 con una longitud inicial y final de 40, valores extraídos de la IEC 282-1, montos expresados gráficamente como se muestra en la Figura 6.27.

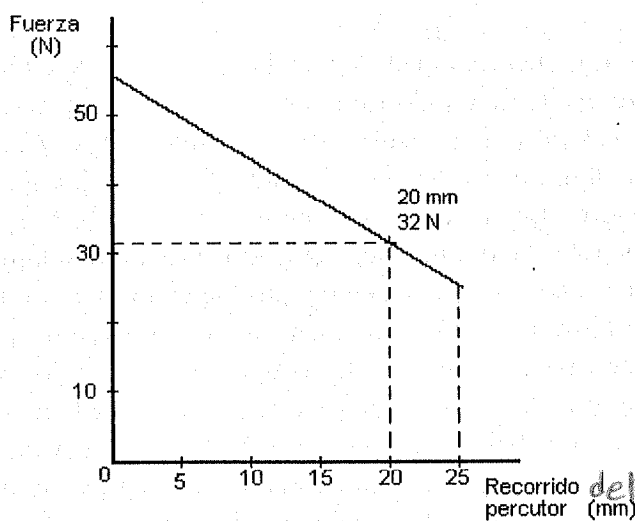


Figura 6.27

Existen dos tipos de percutores, explosivos y con carga de resorte, el primero de ellos se basa en un sistema pistón cilindro con carga de pólvora, siendo el segundo un resorte mantenido en tensión mediante un sistema de palancas y un hilo de acero recorrido por la corriente de falla.

El primer sistema, no usado en nuestro país, tiene el inconveniente de que deben mantenerse las características explosivas a pesar del tiempo y las condiciones ambientales, las cuales son frecuentemente muy desfavorables. En cuanto al segundo, posee muy buena estabilidad en el tiempo, su principal dificultad se presenta en la etapa de diseño no ya de fabricación ni aplicación, que consiste en lograr un paralelo entre el hilo del percutor y el elemento fusible principal, el cual para corrientes de plena carga no debe hacer pasar corriente alguna por el hilo, transfiriendo la mayor parte de ella al

mismo cuando el elemento principal inicia el proceso de arco. La corriente no alcanza a fundir al hilo, cuando se ha llegado a un valor suficiente de temperatura como para que el hilo debilitado no sea capaz de soportar el tiro del resorte, es cortado y el percutor liberado.

Si este percutor se libera demasiado pronto el seccionador puede ser deteriorado por tratar de cortar corrientes superiores a su capacidad, si es liberado demasiado tarde el fusible explotará. El tiempo máximo que un fusible puede soportar el arco es del orden de 200 a 400 ms. El seccionador bien diseñado opera en 50 a 75 ms luego de ser golpeado por el percutor.

Los tiempos tan cortos a que hacemos referencia son los de transferencia de la interrupción del fusible al seccionador, ya que el proceso de prearco en el fusible puede haber tomado varios minutos y en ciertos casos algunas horas. El recurso de diseño empleado para que el fusible pueda detectar e iniciar la fusión con corrientes tan bajas se basa en la subdivisión del elemento fusible principal en un elevado número de laminas delgadas, en algunos casos mas de quince, de tal manera que se produce el proceso de escalación de corriente a medida que se van fundiendo una por una. Explicaremos este principio con un ejemplo muy simple, supongamos tener un fusible de 100 A. nominales compuesto por cinco láminas en paralelo (cada una de ellas con valor nominal de 20 A), sometido a una sobrecarga del 50 % el valor de régimen, o sea 150 A.

En algún momento, dentro quizás de la hora, una de las láminas conducía mayor corriente por razones de desequilibrio constructivo, por lo que se funde, transfiriendo la corriente a las restantes. Las cuatro ahora conducen 150 A que frente a sus 80 A nominales ofrece ahora una sobrecarga del 87,5 %. Corto tiempo después otro elemento funde, transfiriendo a tres para los que representa una sobrecarga del 150 %, al 275 % posteriormente y 675 % finalmente, actuando esta última lámina con generación de sobretensión que reenciende las restantes produciendo una conmutación sucesiva entre ellas. A partir de la sobretensión comienza a actuar el percutor, por lo que si las láminas no pueden cortar la corriente, en un tiempo muy corto lo hará el seccionador. El seccionador denominado bajo carga ya que su capacidad de interrupción no solo se limita a sobrecorrientes bajas, sino que además deben poseer un alto factor de potencia, entre 0,6 y 0,8; dispone para tal tarea de una cámara de extinción o apaga - chispas del tipo de-ion o con apagado por soplado de aire cuya presión es suministrada por un sistema émbolo - pistón impulsado por la energía almacenada en el mecanismo de apertura.

De esta forma se libera al fusible de absorber la elevada energía de arco que se desarrollaría internamente la que podría conducir a la extensión del arco hasta los extremos con perforación de la tapa fusible y transferencia del arco al exterior, el cual continuará quemando hasta que opere un dispositivo aguas arriba.

La verificación del correcto funcionamiento se efectúa comparando los tiempos citados en el párrafo anterior conjuntamente con el siguiente procedimiento gráfico, trabajando sobre la curva corriente tiempo máxima del fusible, donde se le agrega el punto determinado por la corriente máxima de ruptura del seccionador y el tiempo máximo de operación. Este punto se debe encontrar a la derecha y arriba de la curva citada, de manera tal que para cualquier corriente de falla superior a la capacidad del equipo, el fusible opere antes que el seccionador. Ver Figura 6.28.

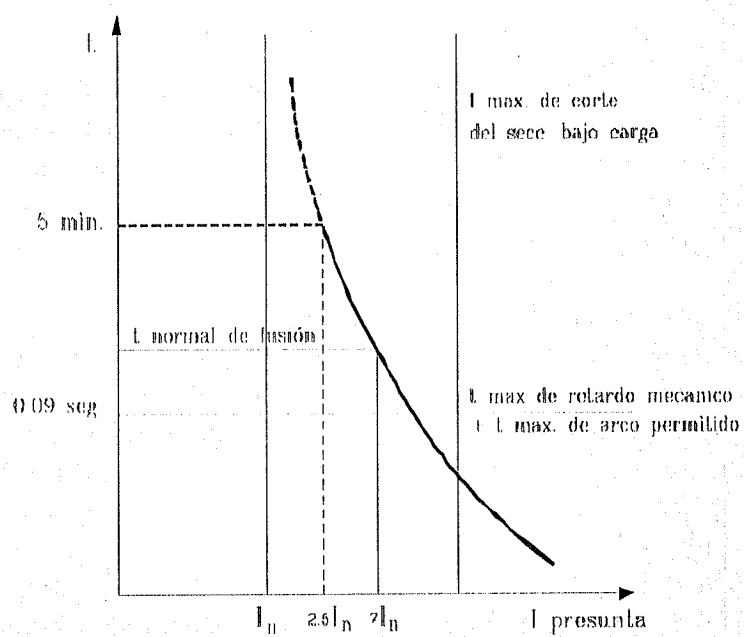


Figura 6.28

6.8- Estudio de selectividad en redes con más de una alimentación y malladas

Todos los estudios sobre coordinación efectuados hasta ahora se basaron en redes radiales o sea con una sola alimentación, existiendo en los sistemas de distribución dos situaciones muy comunes, redes con mas de una alimentación (sin ser malladas, o sea una salida con varias alimentaciones, donde la energía posee una sola dirección) y redes malladas.

6.8.1- Redes con mas de una alimentación:

En estas redes, del estudio de cortocircuito se puede determinar la colaboración de cada uno de los alimentadores a la corriente de falla, de modo tal que es posible afectar a las curvas características de los dispositivos de protección mayores (correspondientes a cada alimentador) de los factores representativos de esta participación en la corriente de falla. Por ejemplo si los alimentadores son dos iguales, por cada uno de ellos circulará la mitad de la falla, o sea sus curvas se deberán desplazar paralelamente a la derecha multiplicándolas por 2. Si uno de ellas conduce el 60 %, el desplazamiento deberá ser de 1,67 y 2,5 el restante, procediendo de igual manera si el número de alimentadores es mayor. Habiendo ya efectuada esta adecuación la comparación se efectúa con la curva del dispositivo menor en la forma ya conocida. Ver Figura 6.29.

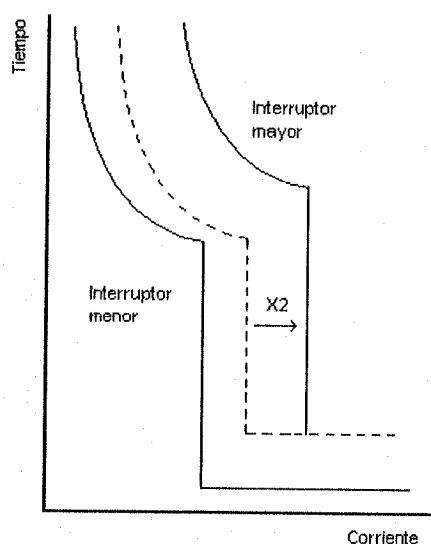


Figura 6.29

Si los alimentadores son dos iguales, podemos tener el caso de que la falla en uno de ellos (antes de la unión en la barra) es alimentada por el otro, como sus corrientes nominales son iguales, no se producirá selectividad entre ellos. Esta situación cambia cuando se tienen mas de dos, ya que dos o más alimentan al fallado, debiendo estudiar la coordinación entre elementos de corrientes nominales iguales cuyas curvas características se desplazan por los factores ya mencionados.

6.8.2- Redes malladas:

Este es el caso de protección de conductores uniendo nudos de una malla. Supongamos dos nudos a y b, conectados por un conductor el que posee un elemento de protección en cada extremo, siendo ambos elementos de igual corriente nominal. A cada nudo llegan varios conductores, todos ellos con un elemento protector en el nudo, y de igual corriente nominal a los anteriores.

En caso de que se presente una falla en el conductor de unión de los nudos, la corriente que suministra cada nudo dependerá de la distancia entre él y la falla, circulando por cada elemento el aporte de las otras líneas al nudo. Si el nudo posee cuatro o más conductores, uno de ellos es alimentado por los tres restantes, por lo que la coordinación entre los tres sanos y el fallado no representa problema alguno.

En cambio si en el nudo disponemos de dos alimentaciones a la falla, cada corriente dependerá de su propia impedancia, siendo necesario considerar los factores de corrección de cada alimentación, existiendo una regla mnemotécnica que indica:

- actuarán selectivamente si la relación entre la corriente mayor y la suma de las dos colaboraciones no supera a 0,8 o en otras palabras la corriente mayor debe ser menor o igual a cuatro veces la menor.

Bibliografía:

1- Siemens SA; Manual de baja tensión; catálogo general 1988, Buenos Aires.

