

TEMA 10

PROTECCIÓN DE CABLES Y CONDUCTORES

1- Introducción

La protección de conductores y/o cables eléctricos es uno de los temas menos tratados en la bibliografía específica, dando la impresión de que el mismo estuviera ya agotado. A pesar de ello, los profesionales involucrados con el tema se encuentran con demasiada frecuencia frente a conductores dañados, por actuación inadecuada de la protección, debida fundamentalmente al desconocimiento de los requisitos a cumplir por la misma.

Además, cada vez se nota más en la bibliografía, la tendencia al aumento de la corriente nominal de los conductores, debido a incrementos de carga con dificultades para el tendido de nuevas líneas por problemas de derecho de paso, ecológicos, elevados precios de la tierra, etc. Por ello la extensión de capacidad se estudia teniendo en cuenta mayores temperaturas de trabajo, nuevos métodos de calculo, explotando la probabilidad de presentarse las condiciones extremas en lo que se refiere a vientos, temperaturas, etc..

Los conductores son elementos clasificados como "de elevada constante de tiempo", cuyo significado real es que poseen considerable capacidad de soportar sobrecargas, permitiendo de tal manera superar condiciones de emergencia del sistema (transferencia de cargas por fallas o tareas de mantenimiento, que son cada vez mas frecuentes por exigencias de calidad). Obviamente que tal capacidad posee un límite que debe ser conocido por el usuario y tenido en cuenta por la protección. Es una práctica normal en otros países la explotación de tal capacidad no solamente en emergencia sino incluso durante las horas pico de carga.

Otra tendencia que día a día se pone mas de manifiesto es la de reemplazar en los sistemas de media tensión a los conductores desnudos por aislados o protegidos (no cables) a fin de disminuir el riesgo de accidente eléctrico; bajando las fallas de tipo transitorio y por ende mejorando la confiabilidad del sistema, relegando de tal manera al conductor desnudo a los circuitos de transmisión.

En primer lugar se debe tener perfectamente claro que el deterioro del conductor, originado en la corriente eléctrica (no por sobrevoltajes de origen atmosférico o de maniobras, ni mecánico, como es el caso de daño por acción de una excavadora, un vehículo demasiado alto, hielo, viento, etc.) se produce exclusivamente por temperaturas elevadas durante tiempos largos. En otras palabras, un conductor posee una vida útil determinada (por ejemplo 20 a 40 años según el tipo), con un estado de carga generalmente llamado nominal, si las condiciones de carga eléctrica son mas elevadas se produce un consumo de vida útil a mayor velocidad y a la inversa se extiende su durabilidad.

Por ello la protección óptima sería aquella que mide temperatura indicando el tiempo de desconexión, pero debido a razones técnico económicas, en la gran mayoría de los casos la protección actúa sobre la base de la relación corriente - tiempo. A pesar de que los dispositivos de alguna manera traducen los valores de corriente a temperatura, esto, sin embargo, no deja de ser una detección indirecta.

La protección se estudia desde dos aspectos, según se trate de falla interna o externa al conductor. En el primer caso, el desperfecto ya existe, debiendo la protección limitar la extensión del daño, desconectándolo lo antes posible, reduciendo así la extensión y el costo del trozo a reemplazar. En cambio si se trata de falla externa, la protección del cable actúa como respaldo a la correspondiente al elemento fallado, debiendo operar antes de que se produzca deterioro en el conductor por ella protegido.

El tratamiento conducente a la selección de la protección se debe comenzar una vez que se conocen perfectamente las características del conductor (dimensionales y temperaturas para régimen nominal, de emergencia y cortocircuito) y las condiciones de instalación (temperatura ambiente, radiación térmica recibida, disipación, carga mecánica, etc.), los cuales no requieren mayor información que la empleada para la determinación de la corriente nominal del mismo.

Existen cada día mas programas de cálculo que permiten determinar la carga de los conductores en función de las condiciones de instalación, indicando en algunos casos la forma de protegerlos, procedimiento que no permite tener en cuenta estados especiales de carga ni suministrar consumos de vida útil. [1]

En este trabajo se analizará exclusivamente las características de la protección de conductores empleando fusibles, ya sean de alta capacidad de ruptura como de expulsión.

Para su estudio se deben dividir a los conductores, en cables y conductores desnudos. Cada uno de estos posee características constructivas diferentes, por lo cual su sollicitación y riesgo de daño son distintos, debiendo analizar su protección por separado. El alcance de este trabajo está referido al primero de ellos.

2- Características de los cables

Las características de los cables actuales han mejorado notablemente en comparación con las que se disponían hace 15 años, no obstante el riesgo de siniestro sigue siendo importante, tampoco están exentos de daño por sobrecalentamiento provocado por sobrecargas y cortocircuitos, debiendo también tener en cuenta los esfuerzos mecánicos a los que están sometidos.

Como se explicó previamente, la protección se efectúa sobre la base del consumo de vida útil, empleando para ello la expresión modificada o simplificada de la Ley de Arrhenius. Tal principio considera que el conductor puede emplearse a su temperatura máxima de trabajo durante toda su vida útil, consumiéndola en forma regular. Además, el incremento de la temperatura en 8 ° C reduce su vida a la mitad y una disminución de temperatura en igual valor duplica la vida del cable.

La ecuación de la ley es la siguiente:

$$C_v = \frac{1}{2^{\left(\frac{\theta_a - \theta_n}{8}\right)}}$$

Donde:

C_v = consumo de vida en p.u.

θ_a = Temperatura alcanzada en °C

θ_n = Temperatura de trabajo o régimen continuo en °C

Las temperaturas admisibles para los tipos más importantes de cables, policloruro de vinilo (PVC), polietileno termoplástico (PE), polietileno reticulado (XLPE) y goma etilen-propilénica (EPR), se muestran en la tabla 1.

Existen otros dos aislantes de uso no muy difundido, los cauchos vulcanizados y los cauchos silicónicos (con cargas de mica, fibra de vidrio y amianto), cuyas temperaturas máximas de trabajo en régimen permanente son: 75 y 200° C respectivamente. Estas temperaturas son para vida útil del cable de 40 años, debiendo verificarse ya que en algunos casos se reduce a valores de 20 a 30 años.

Tabla 1: Temperaturas admisibles

Tipo	Temperatura de operación en régimen continuo	Temperatura de sobrecargas en emergencia, tiempo y frecuencia limitados	Temperatura de cortocircuito
		t < 100Hs./año, t < 500Hs./vida	Tiempo < 5 s
	° C	° C	° C
PVC ≤ 300 mm ²	70 (80)	(100)	160
PVC > 300 mm ²	70 (80)	(100)	140
PE	75	90	150
XLPE	90	130	250
EPR	90 (105)	130 (140)	250

Ref. IRAM 2178

Debe efectuarse una diferenciación en el estudio, cuando se consideran cables de baja y media tensión. Primeramente, en media tensión los cables normalmente poseen pantalla electrostática de cobre. El término blindaje se emplea cuando la pantalla tiene además como propósito proteger al cable de las influencias eléctricas externas, (exigido para tensiones mayores o iguales a 2,3 kV XLPE y 5,2 kV EPR y PVC). Ésta suministra un camino a tierra para la corriente de falla, con su consiguiente limitación de temperatura - tiempo, debiendo tener en cuenta que la mayor parte de las fallas en cables son o comienzan como monofásicas. Los cables de mas de 600 V nominales deberán tener armadura metálica en caso de no poseer pantalla o conductor neutro concéntrico. La pantalla está especificada en las Normas indicando que "deben estar dimensionadas de forma que permitan la circulación de la intensidad de cortocircuito prevista en la instalación". Su valor de resistencia no debe ser mayor a 3,3 ohm/km, debiendo contar con una sección de cobre no menor a 6 mm², cuya resistencia eléctrica es aproximadamente de 3 ohm/km medida a 20 °C, siendo capaz de conducir 15 A. en forma permanente, algunos centenares de amperes durante 3 a 4 s. y de 2000 A. durante 0,2 s.. [2][IRAM 2178, IEC 502/83]

Las pantallas (blindajes) y armaduras pueden ser dañadas por las corrientes a tierra, incluso mas allá del punto de falla, ya que la corriente circula por ellos hasta las puestas a tierra en ambos extremos (de alimentación y de carga). Las características de la armadura de acero y aluminio se especifican en las normas de referencia.

3- Solicitaciones en Cortocircuito

Los cortocircuitos provocan un calentamiento muy intenso en los cables por efecto del calor generado en los conductores. Debido al tiempo corto desde que se establece la falla hasta el momento en que ésta debe ser interrumpida, podemos suponer que todo el calor generado es empleado en elevar la temperatura. Esto significa que no se produce conducción de calor a través del aislamiento ni disipación alguna, consideramos por ello al fenómeno como adiabático, suposición válida hasta tiempos de 5 s.. Se considera que el calor producido por la corriente en uno de los conductores no influencia la temperatura alcanzada por los restantes; en otras palabras los efectos térmicos de las corrientes por mas de un conductor no se adicionan. O sea si se trata de falla a tierra el retorno es por la pantalla, blindaje o armadura, en cambio si es monofásica,

bifásica o trifásica aisladas circula por él o los restantes conductores, suponiendo que los calentamientos no se suman.

La expresión correspondiente al proceso adiabático, es la siguiente:

$$v.C \, d\theta/dt = r \, i^2$$

que se transforma en:

$$C/\rho \, d\theta = (I/s)^2 \, dt$$

cuya solución es:

$$(I/s)^2 \, t = C/(\rho.\alpha) \ln ((\theta_2 + 234)/(\theta_1 + 234))$$

Donde:

I = corriente en A.

s = sección en mm².

t = tiempo en s.

C = calor específico en J/°C mm³.

ρ = resistividad específica ohm / mm.

α = variación de la resistividad con la temperatura en 1/°C.

v = volumen en mm³

θ_1 = temperatura inicial en °C

θ_2 = temperatura máxima permitida en °C

Si consideramos el cable (pantalla o armadura) trabajando a una temperatura θ_1 y conociendo los valores de las constantes del conductor (cobre, aluminio, etc.), podemos calcular el tiempo t necesario para elevar la temperatura a θ_2 , cuando la corriente tiene un valor I, empleando la expresión citada. La ecuación permite tanto la determinación de los tiempos para condiciones de cable (pantalla o armadura) frío (en vacío) como para cualquier estado de carga, incluso sobrecarga.

Por ejemplo para un conductor aislado en XLPE, considerando precarga al 100 %, la expresión dada por el fabricante es:

$$I \, (A) = k \, S^{0.5}$$

Con la sección en mm², el tiempo en s. y la constante k igual a 143 para conductor de cobre, 94 para conductor de aluminio y 128 para pantalla de cobre.

Existe un estudio mas preciso, que considera a las magnitudes citadas, resistividad, conductividad térmica, longitud, densidad y calor específico variables con la temperatura en forma cuadrática, no siendo justificable su complejidad para casos normales. [3]

La temperatura de trabajo bajo condiciones de carga distintas a la corriente nominal del cable, se calcula sobre la base de la siguiente expresión:

$$\theta_x = \theta_a + (\theta_n - \theta_a) (I_x/I_n)^2$$

donde:

θ_x = temperatura incógnita

θ_a = temperatura ambiente

θ_n = temperatura nominal o de trabajo (de la tabla anterior)

I_n = corriente nominal

I_x = nueva intensidad.

En caso de cables directamente enterrados, la temperatura máxima de trabajo no debe superar los 65 °C, para que la temperatura exterior no supere los 60 °C, y así evitar la migración de la humedad del suelo. La consecuencia de la migración es el aumento de la resistividad del terreno, y consiguiente incremento de temperatura del cable, salvo que se posea una muy buena fuente de humedad. La sobrecarga de emergencia está limitada a los 80 °C por igual razón. La duración del cortocircuito es suficientemente reducida para que no se produzca migración, no siendo necesaria la modificación de la temperatura máxima, manteniendo los valores de la tabla previa. Si se colocan las temperaturas correspondientes para trabajo nominal y máxima soportada, juntamente con la sección del conductor, las expresiones de corriente - tiempo, se convierten en valores de energía específica constante, o sea, $I^2 t = \text{cte}$.

Tal valor puede ser trazado en la gráfica corriente tiempo del dispositivo de protección, siendo representado por una recta de pendiente menos dos (-2), cuya validez se extiende solo hasta tiempos de 5 s. como se muestra en la Figura 1. Para la gráfica como ejemplo se consideran dos valores de temperatura de trabajo 80 y 90 °C, y un monto máximo admisible de 250 °C, correspondientes al polietileno reticulado.

También pueden encontrarse gráficos con los ejes en distinto orden, como sección transversal en ordenadas, corriente de corto en abscisas y parametrizado con las rectas de tiempos.

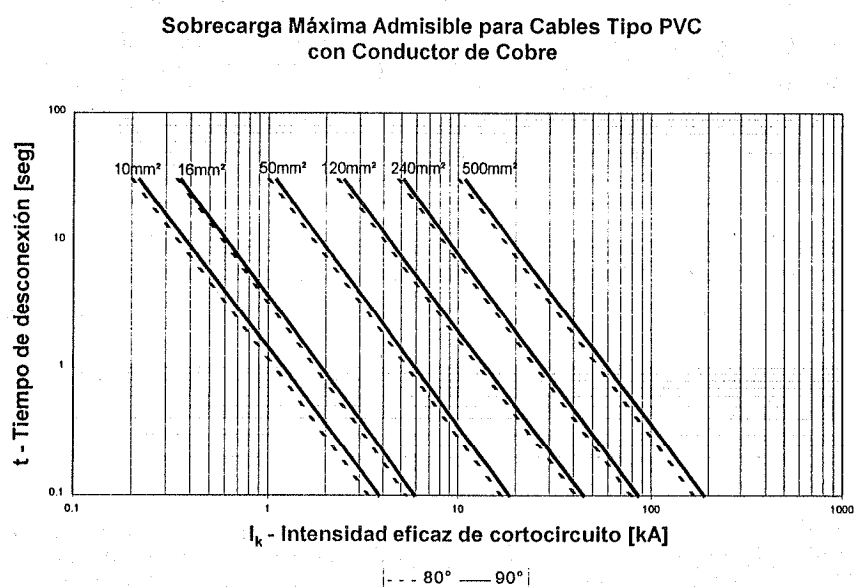


Figura 1

En caso de que se desee determinar la curva corriente tiempo de un cable para condiciones distintas de temperatura inicial y final, se puede recurrir al uso del coeficiente de corrección por temperatura K_t . Este coeficiente se multiplica por la corriente, obteniendo el tiempo a partir de la gráfica en la forma usual, la Figura 2. muestra la forma de esta gráfica de coeficientes de corrección. [4]

Según la corriente de cortocircuito en el lugar de instalación, los tiempos de operación del fusible limitador serán diferentes, debiendo utilizar en las ecuaciones los valores correspondientes al cortocircuito asimétrico subtransitorio cuando la actuación está en el orden de menos de 100 ms., empleando el valor permanente de la corriente si el dispositivo tarda mas que el tiempo dado.

El cortocircuito produce esfuerzos electrodinámicos entre conductores, dados por $F = 0,2/d I_s^2$, donde F está expresada en N/m, d en m e I en A.. Los cables polifásicos están diseñados para soportar tales fuerzas, debiendo verificarse la sujeción de los conductores monofásicos.

4- Protección frente a cortocircuitos:

Con la comparación de los $I^2 t$ soportados por el cable y los dejados pasar por el dispositivo de protección, se garantiza la salvaguardia frente a cortocircuitos, efectuando el estudio sobre el gráfico corriente tiempo. El estudio consiste en buscar que la línea del dispositivo de protección se encuentre por debajo de la recta homóloga del cable, para las corrientes de cortocircuito posibles en el extremo del conductor, por donde se produce la salida de la energía.

En este momento resulta necesario efectuar una discriminación en relación al tipo de fusible utilizado. Si el dispositivo es de alta capacidad de ruptura (limitador), en baja o media tensión, su principio de funcionamiento le permite mantener constante el valor de energía específica que deja pasar. Este párrafo significa que si se verifica la protección para tiempos de 5 s, se cumplirá para tiempos inferiores, independientemente de cuan alta sea la corriente de falla que se presente.

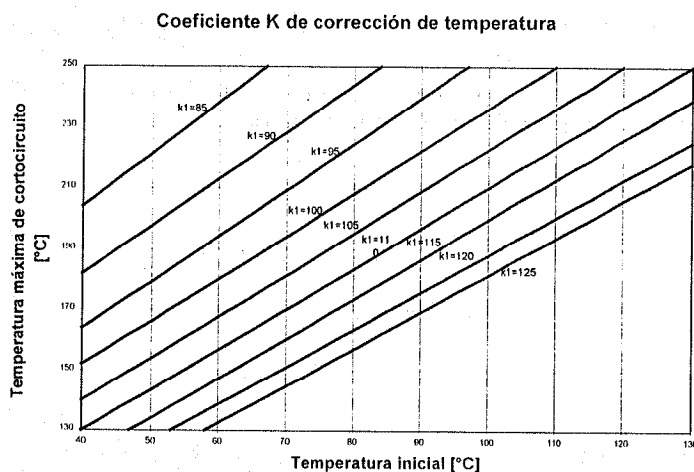


Figura 2.

Por otra parte, si estamos empleando fusibles del tipo expulsión (no limitador), debe verificarse la protección hasta la máxima corriente de cortocircuito en el lugar de instalación. Puesto que el principio de actuación de tales fusibles no les permite mantener la energía constante para menos de 16 ms. (tiempo máximo que puede demorar la aparición del primer cero natural con corriente asimétrica en 50 Hz.). Si la corriente de falla puede superar el valor correspondiente a tal tiempo, debe recurrirse a respaldar el dispositivo con un fusible de alta capacidad de ruptura.

En este estudio puede comprobarse que el dispositivo más rápido es el más favorable en esta aplicación, ya que libera al cable de elevaciones de temperatura que acortarían su vida útil, teniendo como contraparte la limitación en su empleo de la interesante capacidad que tienen los cables de admitir sobrecarga. Si se dispone de los valores de $I^2 t$ de ambos elementos, se debe tener cuidado con la comparación directa basada solamente en los números. El monto correspondiente al cable es válido hasta tiempos tan largos como 5 seg., en cambio los valores de los fusibles ($I^2 t$ dados en catálogo para funcionamiento adiabático del fusible) tienen un límite de validez menor, en el orden de los 100-200 ms según el tipo de fusible. Por lo que se debe obtener el valor de energía específica de 5 s, del fusible, que puede ser muy superior al de tiempos cortos, debido a la considerable disipación de calor en ese intervalo. Siendo más

correcto calcularlo a partir de la gráfica corriente tiempo, y haciendo la operación de elevar al cuadrado la corriente para 5 s., multiplicándola por ese tiempo.

El procedimiento explicado es también válido si empleamos interruptores limitadores, en cambio si se utilizan interruptores que esperan el pasaje por cero para extinguir, su curva característica se vuelve horizontal procediendo a cortar a la recta de $I^2 t$ del cable, como ocurría con el fusible de expulsión.

Por sus distintas pendientes, fusible - cable, se obtiene protección muy buena cuando ambos elementos poseen la misma corriente nominal. No obstante si se incrementa la I_n del fusible se continúa protegiendo pero solo para mayores valores de corriente falla y obviamente se descuida la protección para condiciones de sobrecarga. Hay casos donde el valor nominal del fusible es cuatro veces mayor que la I_n del cable, siendo todavía satisfactoria la protección contra cortocircuitos, dependiendo de la mínima corriente de corto en el lugar, permitiendo explotar mejor la capacidad de sobrecarga del cable, como se muestra en la Figura 3. En la tabla se muestra el resultado de la protección de conductores aislados en PVC considerando solo tiempos de menos de 5 s., donde se ve que a mayor corriente nominal la relación de fusible aumenta.

De la misma manera que se modificó el valor de energía específica del conductor por precarga, debe hacerse sobre el comportamiento del fusible. En tal caso, la energía específica de fusión, requerida para alcanzar a los 1083 °C del cobre o 960 °C de la plata, debe multiplicarse por 0.8 y por 0.75 cuando el fusible se encuentra a plena carga al producirse el cortocircuito. Se emplea el valor del cobre cuando se trata de fusibles de baja tensión, utilizando el correspondiente a la plata en caso de proteger con fusibles ACR de media tensión.

Protección de un cable de 10 mm² aislado con PVC con Fusible Tipo NH "T"

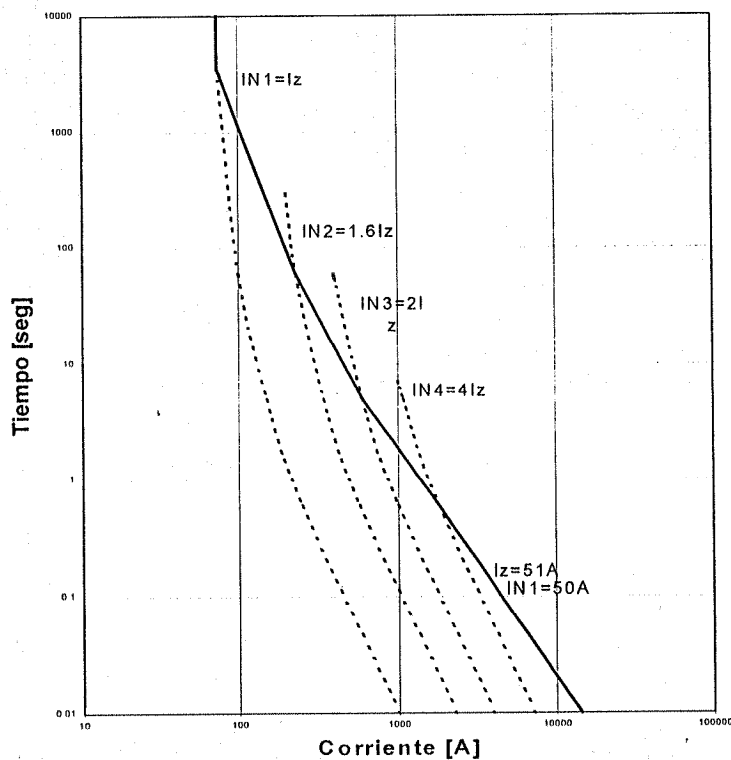


Figura 3.

Tabla 2: Relación de fusible

Sección conductor mm ²	Corriente nominal máxima		Corriente nominal máxima del fusible, tipo gL (A)	Relación de fusible -
	(A) en aire	(A) en conducto		
1.5	20	14	25	1,25/1,79
4	36	29	50	1,39/1,72
10	61	51	100	1,64/1,96
25	106	87	200	1,89/2,30
50	160	125	355	2,22/2,84
70	200	160	500	2,50/3,12
120	280	220	750	2,68/3,41
Handbook of Electrical Installation Practice, Reeves, E.A., Blackwell Sc. Pub., London.				

El estudio de la protección debe efectuarse tanto para el conductor como para la pantalla y/o armadura, si estas pueden estar involucradas en el camino de la corriente de falla.

5- Solicitaciones en Sobrecargas:

Este problema se origina en el exceso de cargas conectadas al conductor, aumento del consumo, aperturas de anillos, transferencia de cargas, etc., produciendo un fenómeno diferente al estudiado previamente. Como se mencionó, la capacidad térmica del cable es importante por lo que se puede permitir esta sobrecarga durante tiempos considerables, para los cuales deja de tener valor la suposición de régimen adiabático. El cálculo es mas complejo, pudiendo hacerse mediante alguna de las herramientas analíticas disponibles, como diferencias finitas, elementos finitos, etc. o empleando las expresiones dadas en las Normas.

La norma ANSI/IEEE n° 242, Cap. 8, especifica una ecuación, que permite determinar la corriente máxima del cable en función del tiempo, para cualquier estado de precarga, aplicable desde ligeras sobrecargas hasta cortocircuitos.

$$\frac{I_E}{I_z} = \sqrt{\frac{(\theta_E - \theta_0)(\theta_z - \theta_0) + \left(\frac{I_0}{I_z}\right)^2 e^{-t/K} (230 + \theta_z)}{1 - e^{-t/K} (230 + \theta_E)}}$$

Donde:

I_E = corriente de carga de emergencia del cable

I_0 = corriente de precarga del cable

I_z = corriente nominal del cable

θ_E = temperatura de carga de emergencia del cable

θ_z = temperatura normal de carga del cable

θ_0 = temperatura ambiente

t = tiempo luego del arranque de la sobrecarga en horas

K = constante de tiempo del cable en horas

ANSI
IEEE
Tan p. max permit. de bajo
reg. de c.c.

El valor 230 es realmente un promedio de 234 correspondiente al cobre y 228 del aluminio.

El valor de la constante de tiempo del cable puede obtenerse de la tabla 3 siguiente o listado que le continúa, ambos extraídos de la citada norma.

Tabla 3: Constante de tiempo de cables

Constante de tiempo en horas					
Tamaño del cable		Aire		Conducto subterráneo	Enterrado
MCM	mm ²	Sin conducto	En conducto		
< #2,	< 35	0,33	0,67	1,00	1,25
#2 a #4/0	35 a 120	1,00	1,50	2,50	3,00
> = 250	> = 120	1,50	2,50	4,00	6,00

Las constantes de tiempo pueden definirse de la siguiente manera: [4]

0,5 Pequeños cables en aire

1,0 Cables de tamaño mediano en aire o pequeños no directamente enterrados

1,5 Grandes cables en aire o cables pequeños directamente enterrados

2,5 Cables medianos directa y no directamente enterrados

4,5 Grandes cables enterrados

6,0 Grandes cables directamente enterrados

La expresión dada permite construir la curva característica tiempo - corriente del cable, la cual se puede comparar directamente con la homóloga del dispositivo de protección.

6- Protección frente a sobrecargas

Los elementos mas adecuados para esta tarea son los dispositivos de “constante de tiempo elevada”, como fusibles, relés de tiempo inverso, de imagen térmica, curva tipo bimetálica, etc. Los que sin duda no los protegen son los relés con respuesta instantánea, o dispositivos en general con curva característica tiempo corriente con elevada pendiente.

Usualmente se prefiere el procedimiento de coordinación gráfico, para lo cual es necesario disponer de la curva corriente tiempo del cable para tiempos cortos y largos, suministrada por el fabricante del mismo. En caso de no contar con esta información, se puede emplear la descrita en el apartado anterior.

Si el cable se utiliza para la alimentación de transformadores, la protección contra sobrecarga del transformador puede proteger también al cable, ya que normalmente la capacidad térmica del conductor es mayor que la del equipo. La ubicación de la protección debe hacerse en el lado de recepción de energía, para de tal manera ofrecer no solo la protección al conductor, sino también al sistema. (en caso de fallas dentro del tramo de cable en estudio).

Hasta el momento no se había efectuado ninguna discriminación entre el uso de fusibles ACR en media o baja tensión, ya que ambos dispositivos poseen comportamiento similar frente al

cortocircuito. Lo que no es así cuando nos referimos a la actuación contra sobrecarga. En general podemos afirmar que el dispositivo de media tensión, denominado HH, es una protección contra corrientes muy elevadas, no siendo capaz de proteger a los cables contra sobrecargas, ya que por sus características constructivas y necesidad de soportar los transitorios de energización del sistema, resulta insensible hasta corrientes desde 2 a 4 veces su valor nominal. Por otra parte, el fusible del tipo expulsión es capaz de brindar protección contra sobrecarga en virtud de su característica de respuesta menos empinada, siendo mas adecuados los que poseen mayor "speed ratio"; debiendo tenerse en cuenta la limitación en lo referente a su baja capacidad de interrupción.

El proceso de sobrecarga se analiza en forma distinta según la norma a utilizar, existiendo dos criterios, el de IEC o Europeo y el de ANSI/IEEE o Americano. [4] [5]

Las normas Europeas (BS, IEC, etc.) y las de ellas derivadas como las IRAM, especifican una serie de condiciones, que en caso de cumplirlas garantizan la protección, las cuales son:

- la corriente nominal del dispositivo de protección debe ser inferior o igual a la homóloga del conductor

- la corriente que causa la operación efectiva del dispositivo no debe superar a 1,45 veces la capacidad de carga del conductor (denominada I_2)

Tales condiciones se cumplen fácilmente en el caso de fusibles de baja tensión (siguiendo igual normalización), adoptando aquel cuya corriente nominal sea similar pero no superior a la homóloga del cable en la aplicación bajo estudio.

Es oportuno recordar los significados del tiempo convencional y las corrientes convencionales de fusión y no-fusión, definidas para los fusibles de baja tensión. El tiempo convencional es un lapso en el cual se considera que el fusible ha alcanzado el equilibrio térmico con el ambiente, variando entre 1 y 4 hs. según la corriente nominal del fusible en tratamiento. Las corrientes convencionales son los múltiplos de la intensidad nominal del fusible que provocan la fusión y la que no la produce en el tiempo convencional, para dispositivos de más de 25 A nominales, los múltiplos son 1,6 y 1,3 respectivamente. Para menos de 25 A., se tienen tres zonas con valores variables entre 2,1 - 1,75 y 1,5 - 1,4.

A primera vista parecería que la utilización de tales fusibles no protege a los conductores, existiendo el lapso desguarnecido entre 1,45 y 1,6 veces la nominal del fusible (en el peor caso, cuando los valores nominales del cable y dispositivo protector sean iguales). Sin embargo, como los valores de 1,6 y 1,3 son los límites de cumplimiento, los fusibles reales dentro de una partida de producción con tolerancias normales, operan con el valor promedio (1,45); por otra parte, en la práctica la operación del fusible es más rápida debido a diferencias entre las condiciones de trabajo y las de ensayo, además los dispositivos normalmente operan con la corriente de no-fusión en un tiempo mayor al convencional, que debido a la diferencia a las constantes de tiempo involucradas, mantienen la protección al cable. [6]

El criterio americano se basa simplemente en la comparación de las curvas corriente tiempo del cable, dada en el punto anterior en forma de ecuación y la homóloga del dispositivo de protección, tratando que la curva del fusible brinde una barrera al cable, actuando para cualquier corriente de potencial daño en un tiempo menor al soportado por el conductor.

Protección de cable con Fusible tipo NH

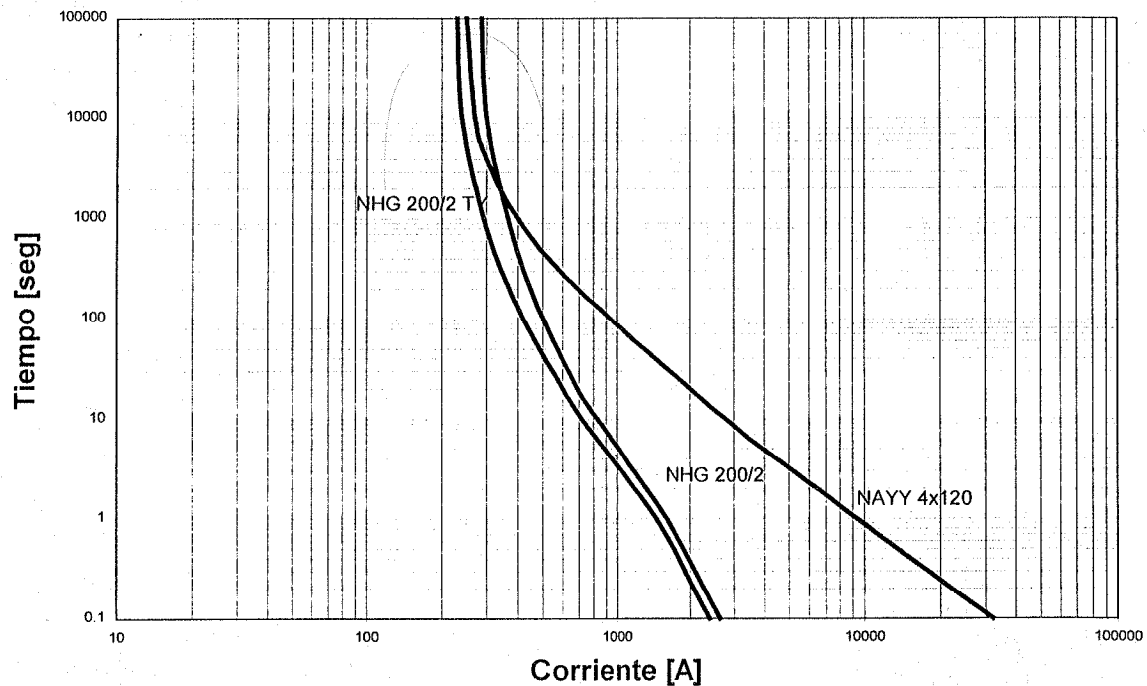


Figura 4

Obviamente la protección más ajustada se lograría con valores nominales de cable y fusible coincidentes, salvaguardando al cable para cualquier corriente entre la nominal y la capacidad de ruptura del fusible, el problema que se presenta es la limitación de la capacidad de sobrecarga del cable. La figura 3 muestra las diferencias en las pendientes de las curvas originada en la discrepancias en las constantes de tiempo, conjuntamente con la protección brindada para corrientes de fusible de hasta cuatro veces la nominal del cable, indicando que la decisión final se deberá tomar como solución de compromiso.

Como ya fue mencionado, los cables poseen elevada capacidad de sobrecarga, lo que le permite superar los denominados arranques en frío (luego de un corte de energía prolongado) y caliente (a continuación de una interrupción breve), por lo que la protección los debe soportar. Algunos autores proponen que la verificación se efectúe en base a los siguientes puntos: 1.75 por 10 s., 1.5 por 15 min. y 1.25 por 30 min. Los fabricantes de fusibles por su parte suministran los siguientes valores (25 I_n ; 0,01 s), (12 I_n ; 0,1 s), (6 I_n ; 1 s), (3 I_n ; 10 s) y (2 I_n ; 600 s). [7]

En el estudio de protección del cable, debe verificarse que la corriente mínima de fusión del fusible sea menor que la corriente mínima de falla a tierra a fin de ser detectada por el dispositivo. Esto significa que para la longitud total del cable, su impedancia (conductor mas retorno por pantalla o armadura) con el agregado de la resistencia de falla, debe ser suficientemente baja para permitir la detección de la corriente de falla en el extremo de carga del mismo. Este objetivo conduce a una limitación del largo permitido del conductor basándose en la corriente nominal del fusible empleado, o la restricción en la corriente de carga del cable fijada por el fusible para alcanzar la longitud deseada, siendo muy común hallar tablas con esta información en los catálogos de fabricantes de fusibles. Tablas similares a la descripta pueden encontrarse para ser aplicadas a la protección contra contacto accidental, basadas en la máxima

tensión de contacto como función de la duración.

A pesar de su escasa difusión, hay disponibles fusibles diseñados especialmente para la protección de cables en baja tensión, todos ellos respondiendo a la normalización IEC y VDE. Driescher y SIBA son algunos de los fabricantes de este tipo de fusibles, denominados clase G con subclase Ty, que reemplazan a los de aplicación general como los NH gL, con la ventaja que protegen al conductor en las sobrecargas leves, del orden de 1,3 veces la nominal.

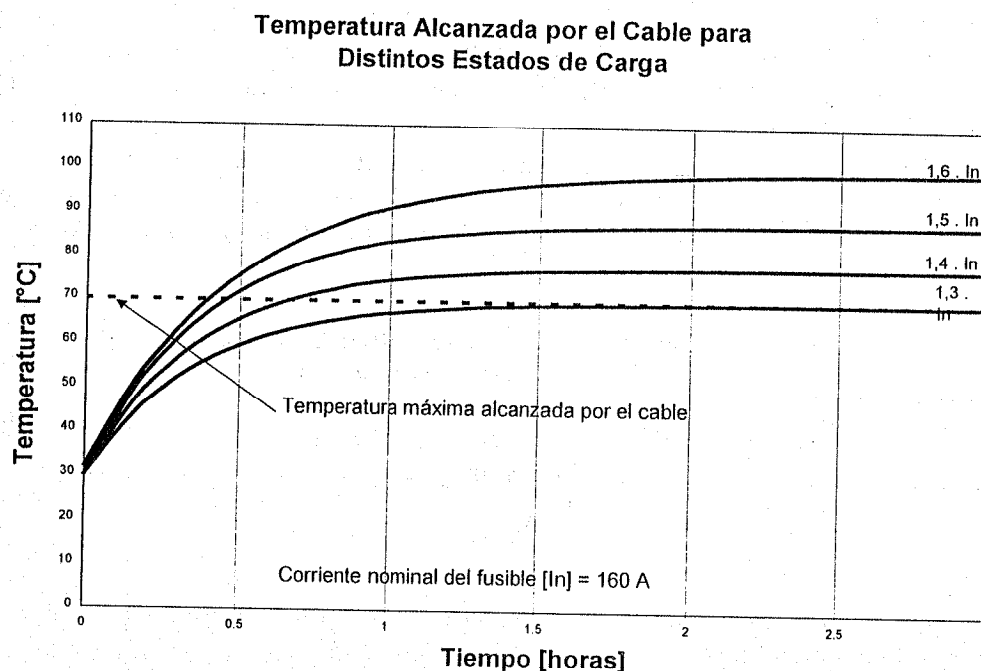


Figura 5.

La diferencia fundamental con el tipo gL se produce para tiempos mayores a los 200 seg., donde el fusible especial comienza a ser mas rápido y baja la corriente mínima de fusión, sin superar el límite inferior especificado en norma, a relación 1,3. Lo explicado puede verse en la Figura 4. La forma de comprobar tal protección es mediante una serie de ensayos con corriente en escalones que se va aumentando a medida que se alcanza el equilibrio térmico en el cable, siempre y cuando no se supere la temperatura límite. En uno de los casos se ensayó un cable de $4 \times 95 \text{ mm}^2$, con una elevación máxima de 70°C , y corrientes desde su nominal 160 A. Con las corrientes entre la nominal y 1,3 veces, se alcanzó el equilibrio térmico sin superar los 70°C , con 1,4; 1,5 y 1,6 se fundieron los fusibles en 50 minutos, 30 minutos y 16 minutos respectivamente, siempre antes de alcanzar los 70°C . Este método es muy confiable y sencillo de poner en práctica, por lo que es aconsejable su implementación en caso de dudas y que a relación se justifique a relación n n t al a relación n n. Figura 5.

Como fue dicho a relación n, se ha producido una considerable a relación del uso de "cables aéreos", en líneas aéreas de media tensión, que son conductores aislados o protegidos, cuya protección es del mismo tipo que la tratada para cables, pues el limitante de la carga es la temperatura soportada por el aislante. Los límites mecánicos se alcanzan cuando ya se ha

superado a riación el térmico (la capacidad de carga se reduce en un 15 % en ari ación n con el desnudo).

Los cables, a lo largo del día, semana, mes, etc., están sometidos a cargas variables, de tal manera que al efectuar la elección del mismo se pueden adoptar criterios de alta ari ación y elevado costo o mas económicos. En el primer caso la capacidad de carga del conductor será superior a la máxima corriente posible. En cambio en el segundo caso se estudia el ari aci de carga de tal manera que en las horas de carga inferior a la nominal se ahorra vida útil, la que es gastada durante las sobrecargas, haciendo que el consumo de vida promedio para un período de tiempo dado sea igual al consumo con carga normal constante.

Este último criterio de gran uso en la actualidad, consiste en el estudio de los ciclos de enfriamiento y calentamiento sufridos por el conductor, determinando la curva de temperatura – tiempo, aplicando a la misma la Ley de Arrhenius.

El mismo criterio se utiliza para la selección del conductor y su protección en caso de tener cargas cíclicas con a riación considerable. Se adopta la sección que a lo largo de un período dado, por ejemplo un día, consuma un monto de vida equivalente a la correspondiente en ese período con carga constante.

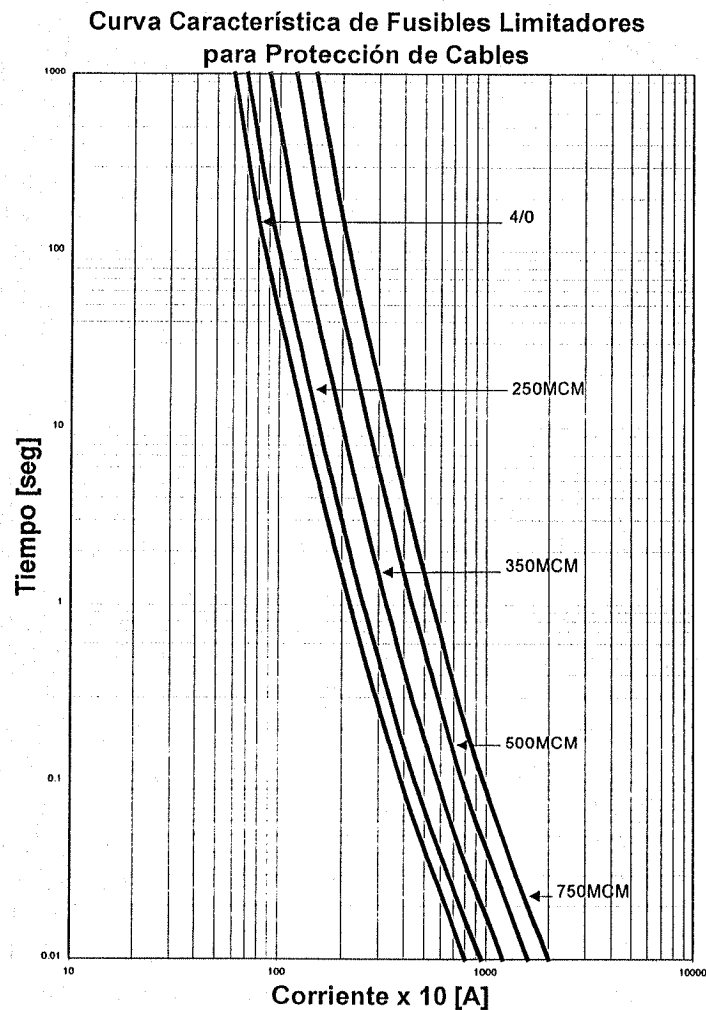


Figura 6.

7- Fusibles Protectores de Cables

Existe un tipo de fusible de alta capacidad de ruptura especialmente diseñado para la protección de conductores, denominado "Limitador", muy usado en USA, cuya particularidad es tener una curva característica corriente tiempo muy vertical, o sea, ofrece protección contra cortocircuito mas que contra sobrecarga, ver Figura 6. Sus conexiones están adaptadas para ser indentados directamente sobre el conductor, siendo el otro contacto del tipo terminal. Por su curva y forma de conectarlos, lo que realmente hace el limitador es proteger al sistema de una salida por una falla en el cable. También son muy usados en caso de disponer de varios conductores en paralelo, ya que se le coloca a cada cable un limitador en sus extremos, por lo que si un cable falla, ambos limitadores lo desconectan, permaneciendo el sistema en funcionamiento con los cables restantes. Los limitadores actúan selectivamente entre si, siempre que se tengan mas de dos cables en paralelo. Poseen manguitos termocontraíbles e indicadores de operación como accesorios. No tienen corriente nominal, su característica nominal es la sección del conductor al que protegen, por ejemplo 4/0, 250 MCM, 350 MCM, 500 MCM y 750 MCM; poseen tensión nominal de 600 V y capacidad de ruptura de 200 kA.

8. Particularidades

Si se emplean cables en paralelo, deben ser protegidos con dispositivos ubicados en ambos extremos ya que en caso de falla, la misma es alimentada por la fuente y por el otro cable en el extremo opuesto.

Los fusibles tienen como función primordial proteger al conductor, por lo cual resultan de corrientes nominales iguales. Si se produce una falla interna, ambos fusibles operan en forma secuencial, dependiendo de la corriente que los atraviesa (relacionada con la posición del desperfecto dentro del tramo de cable). Si la falla es pasante, o sea que el fusible está respaldando a otro dispositivo, si éste no actúa, operarán ambos fusibles, sin coordinación selectiva y sin indicación de la ubicación de la falla.

9. Conclusiones

Los fusibles de alta capacidad de ruptura para baja tensión y de expulsión para media tensión son dispositivos de curva característica tiempo corriente similar a la homóloga de los cables, por lo que puede lograrse una muy buena coordinación y por ello excelente protección. El estudio correcto de la protección requiere el conocimiento de las curvas características de los cables, que se obtienen de los correspondientes fabricantes o de las Normas Nacionales o Internacionales a las que responden. En baja tensión, los fusibles protegen al cable contra cortocircuito y sobrecarga, en cambio en media tensión el dispositivo ACR solo lo hace contra cortocircuitos. Para la sobrecarga en media tensión se debe emplear el fusible del tipo expulsión. La aplicación de la Ley de Arrhenius modificada permite determinar el consumo de vida útil del cable, dando de esta manera el límite de carga aceptable para la duración deseada del cable, facilitando extremar las cargas útiles y las cíclicas. La verificación de las temperaturas alcanzadas debe realizarse para los conductores, pantalla y armadura. Con las herramientas enumeradas en el artículo puede efectuarse el estudio correcto de la protección de cables empleando fusibles.

Bibliografía:

- 1.- Pirelli Cabos S.A., Dimensionamento de conductores eléctricos, Makron books, Brasil, 1994.
- 2.- IRAM 2178-1990, Cables de energía aislados con dieléctricos sólidos extruídos para tensiones nominales de 1,1 kV a 33 kV.

- 3.- Morgan,VT (1971): Rating of conductors for short-duration currents. Proc. IEE 118, 555-570.
- 4.- IEEE Std. 242-1986, Recommended Practice for Protection and Coordination of Industrial and Commercial Power Systems, New York, Sixt Printing, 1994,
- 5.- IEC 60502-1997, Power Cable with extruded insulation and their accesories for rated voltages from 1 kV up to 30 kV.
- 6.- Toniolo,S; Cantarella,G; Farina,G (1976): Overcurrent protection of cables by fuses. 1st ICEFA,197-202.
- 7.- Mirza, Ozair H., Usage of CLPU Curve to deal with the cold load pickup problem, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 12, n° 2, April 1997.

Apéndice:

Equivalencia entre las secciones transversales mm² y AWG (circular mils).

Sección AWG o MCM	Sección mm ²	Sección AWG o MCM	Sección mm ²
19 AWG	0,653	3 AWG	26,670
18	0,832	2	33,630
17	1,040	1	42,410
16	1,310	1/0	53,480
15	1,650	2/0	67,430
14	2,080	3/0	85,030
13	2,620	4/0	107,200
12	3,310	250 MCM	126,640
11	4,170	300	152,000
10	5,260	400	202,710
9	6,630	500	253,350
8	8,370	600	304,000
7	10,550	700	354,710
6	13,300	800	405,350
5	16,770	1000	506,710
4	21,150		

