

TEMA 3

DISPOSITIVOS DE PROTECCIÓN

3.1- Interruptores

El interruptor es uno de los elementos más vitales de los sistemas eléctricos, debiendo cumplir tareas sumamente exigentes, muchas de ellas pasivas y unas pocas pero de gran importancia activas, actuando como un elemento vigilante o centinela en el circuito pasando prácticamente desapercibido hasta el instante que debe emplear toda su capacidad y/o habilidad en el manejo de una corriente de falla.

Las funciones a cumplir son:

- Cerrar en carga y conducir tal corriente por largos períodos de tiempo
- Bajo condiciones prescriptas debe ser capaz de operar cortando la carga y alguna pequeña sobrecarga
- Debe interrumpir tan rápido como sea posible las corrientes de cortocircuito elevadas del sistema
- Con contactos abiertos debe soportar la tensión del sistema, ya sea de régimen o bajo condiciones transitorias
- Tiene que poder conectar en falla y abrir consecuentemente, interrumpiendo tal corriente
- Debe ser capaz de soportar la circulación de las corrientes de falla el tiempo necesario por otro interruptor para cortar tal intensidad
- Tiene que poder cortar corrientes bajas como las inductivas de transformadores o capacitivas de líneas y capacitores
- Debe ser capaz de soportar los efectos del arco en sus contactos, fuerzas electromagnéticas y solicitaciones térmicas producidas por el pasaje de corrientes de magnitud de cortocircuito

A continuación veremos como se diseña este dispositivo para poder satisfacer las funciones enumeradas.

3.1.1- Fundamentos del arco eléctrico

Introducción:

Desde los inicios de la energía eléctrica surgió la necesidad de un dispositivo que estableciera e interrumpiera la circulación de la corriente eléctrica. Básicamente existen dos formas de lograr tal interrupción, una de ellas es hacer cero la diferencia de potencial que provoca la circulación de la corriente y la restante es producir una apertura o discontinuidad en el circuito; siendo este último el método más usado.

Los primeros diseños se basaban en dos barras conductoras que se introducían o extraían de un tanque con mercurio. Poco tiempo después fue usado el concepto base (garra) cuchilla.

El proceso de conexión o desconexión involucra tres etapas, la conducción sólida (contacto móvil y contacto fijo en unión íntima), conducción gaseosa o en arco eléctrico y período post-arco.

Teoría básica de la descarga eléctrica:

La conducción en vapores metálicos o gases se basa en que tales elementos siempre contienen portadores de carga positivos y negativos, presentándose los procesos de producción, movimiento y absorción final de los portadores de carga, como medio de conducir la corriente eléctrica entre electrodos.

- Descargas no autosostenidas: Al aplicar una diferencia de potencial entre los electrodos, sobre los portadores actúa una fuerza proporcional al poder del campo eléctrico, estableciendo un movimiento de los iones hacia el cátodo y de los electrones hacia el ánodo. En el momento en que las cargas móviles inciden sobre los electrodos ceden su carga, estableciendo por ello una circulación de corriente en el medio gaseoso. Puede presentarse un flujo continuo de corriente, solamente si los portadores que ceden su carga son reemplazados continuamente. El reemplazo puede producirse por una serie de procesos de ionización, tales como emisión fotoeléctrica o termoiónica.

Inicialmente la corriente de descarga es muy pequeña, a medida que el voltaje entre los electrodos se incrementa, la corriente aumenta en la misma proporción, hasta que se alcanza una situación en que los portadores son tomados por los electrodos a la misma velocidad con que ellos son producidos, alcanzando un valor estable de saturación de corriente. El valor de saturación es función de la intensidad de la ionización, del volumen del gas llenando el espacio entre electrodos y de la presión del gas.

En esta situación de saturación, la corriente permanece constante a pesar del aumento del voltaje a valores varias veces superior al inicial. Como tal corriente depende enteramente de portadores de carga que se suministran por medio de acciones ionizantes externas, se denomina descarga no autosostenida.

Los portadores de carga no se encuentran solamente influenciados por la fuerza originada en el campo eléctrico, sino también por fuerzas electrostáticas debida a la polaridad opuesta de los electrodos, por lo tanto la distribución original uniforme de los portadores de carga puede ser modificada por la aplicación de un voltaje a través de los electrodos.

La existencia de este voltaje externo provoca un incremento en la concentración de electrones cerca del ánodo y de iones (positivos) cerca del cátodo, creando cargas espaciales en las zonas de los electrodos. Estas cargas espaciales producen un incremento de campo eléctrico en los electrodos y un decremento en el espacio entre los electrodos, las caídas de potencial en los electrodos reciben los nombres de caída anódica y caída catódica.

A pesar de estar en la zona de saturación, el aumento de potencial causa un aumento de la energía cinética de los portadores. Cuando tales portadores colisionan con partículas neutras, se expelerán nuevos electrones, creando las condiciones de ionización por choque.

Si la energía cinética no es suficiente para producir la ionización completa, puede alcanzar para reordenar los electrones posicionándolos en una órbita mas alejada del núcleo. A tal situación se la denomina de átomos excitados, ya que con menor energía se puede alcanzar la ionización completa, o sea expulsar el electrón.

La corriente en la región de descarga no autosostenida, cesa tan pronto como es retirada la fuente externa.

Sin embargo existe un nivel crítico de voltaje, el cual una vez alcanzado produce un rápido incremento de corriente, dando por resultado una descarga autosostenida en la forma de una descarga luminosa o arco eléctrico.

En caso de electrodos planos, la transición entre no sostenida y autosostenida se produce rápidamente en forma de perforación estableciendo un arco eléctrico.

En otros casos la descarga toma la forma de descarga parcial, siendo el poder dieléctrico del gas solo superado en la zona del electrodo, presentando una descarga luminosa conocida como "corona".

- Descarga autosostenida: La transición de una descarga no autosostenida a auto sostenida se caracteriza por un incremento en corriente pasando a través del gas mientras la tensión entre los electrodos se mantiene casi constante. En el momento en que el potencial entre los electrodos alcanza el valor para que la ionización se produzca libremente, los iones positivos pueden incidir sobre el cátodo con una fuerza suficiente para eyectar el número de electrones necesarios para mantener la descarga, sin necesidad de medio exterior de excitación, denominándose descarga auto sostenida.

Durante los primeros instantes la densidad de corriente es solo de unos pocos microamperes por centímetro cuadrado, siendo una descarga no visible, llamándose descarga oscura. Si la corriente continúa aumentando aparece un halo luminoso entre los electrodos, denominada descarga luminosa. El color de la luminosidad difiere según la región y depende del gas, siendo esta particularidad muy empleada en iluminación.

Si la corriente es baja y el cátodo no está completamente iluminado, la densidad de corriente catódica es constante e independiente de la intensidad de corriente. Si la corriente aumenta hasta que el cátodo está totalmente cubierto por la luminosidad, se incrementa la densidad de corriente y la caída catódica, denominando a tal región como descarga luminosa anormal.

Cuando la corriente continúa aumentando en la citada región, el espesor de la región de caída catódica disminuye, conduciendo a un incremento de la energía dada a los iones positivos, disminuyendo el número de colisiones ionizantes del ion en el espacio de la caída catódica. El incremento de la energía de los iones, aumenta la temperatura catódica provocando emisión termoiónica, con aumento de corriente y colapso de la tensión de descarga. En este tiempo las características físicas de la descarga cambian de descarga luminosa a arco desarrollado plenamente.

Este proceso es mostrado en la Figura 3.1.

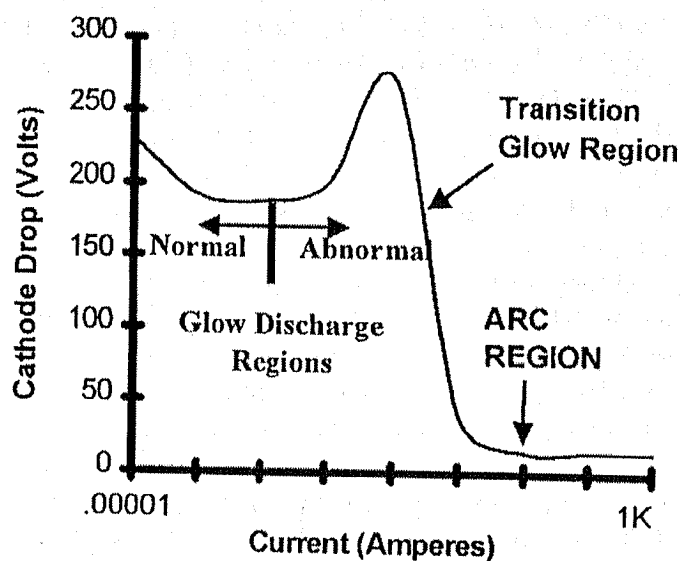


Figura 3.1

El arco eléctrico:

El arco eléctrico es una descarga auto sostenida que presenta una caída de tensión baja y capaz de sostener corrientes elevadas, actuando como un resistor no lineal.

Los arcos mas conocidos se producen en el aire, a presión atmosférica, pero también pueden generarse en el vacío, en altas y bajas presiones, y dentro de una larga variedad de gases y vapores metálicos. Los gases y vapores que sirven como conductores del arco son originados parcialmente a partir del material de los electrodos, parcialmente del ambiente donde éste se desarrolla y de los productos de la reacción.

- Arcos de alta presión:

Son aquellos que existen a presiones superiores a la atmosférica. Se manifiesta como una columna brillante, teniendo un núcleo brillante pequeño, consistente de gases ionizados los cuales conducen la corriente. El núcleo siempre se encuentra a muy alta temperatura, por lo cual los gases están muy disociados.

La temperatura del arco alcanza los 6000 ° K cuando se encuentra bajo refrigeración natural por aire, observándose valores de 20.000 ° K en casos de refrigeración forzada. Estos valores parecerían contradictorios, ya que con mayor refrigeración la temperatura es mayor, pero la razón se encuentra en que al refrigerarlo se produce una reducción en el diámetro del arco, con el aumento de la densidad de corriente en el plasma.

Una interesante diferencia entre las observaciones del cátodo de la descarga luminosa y el arco, es que la primera tiene una caída de tensión de 100 a 400 V, baja densidad de corriente y la luz emitida tiene el espectro del gas que rodea la descarga, en cambio en el arco la caída es de 10 V, elevada densidad de corriente y luz con el espectro del vapor del material del cátodo.

El arco se comporta como una resistencia, por lo que la energía absorbida es el producto de la caída de tensión y la corriente por él, es fácilmente influenciado por un campo magnético y por la acción de flujos de fluido a alta presión.

Bajo condiciones de corriente constante, el arco está en equilibrio, lo que significa que las pérdidas están balanceadas con la energía ingresante al arco, no obstante debido a la capacidad de almacenamiento de energía del mismo, existe un retraso entre las pérdidas instantáneas y las pérdidas de régimen. Por ello en cualquier instante de tiempo, la potencia ingresante mas la energía absorbida, iguala a las pérdidas.

Debido a tal equilibrio térmico local, la columna conductora del arco puede ser tratada como un gas caliente que cumple con las leyes de conservación de masa, momento y energía, donde son aplicables las leyes termodinámicas y las electromagnéticas de Maxwell. O sea que su conductividad eléctrica, conductividad térmica y composición gaseosa son controladas esencialmente por la temperatura.

La caída de tensión a lo largo de un arco puede ser dividida en tres regiones, como se muestran en la Figura 3.2.

En arcos relativamente cortos, un elevado porcentaje de la caída de tensión se produce en una región muy angosta frente al cátodo, alcanzando un voltaje entre 10 y 25 V, siendo tal valor función del material del cátodo. En el otro electrodo, la caída es de 5 a 10 V. La caída de tensión a lo largo de la columna positiva del arco se caracteriza por un gradiente de tensión uniforme, cuya magnitud en caso de arco en un ambiente gaseoso, depende del tipo de gas, presión, valor de la corriente y largo de la columna. El gradiente de tensión puede oscilar entre algunos V/cm y varios cientos de V/cm.

El primer estudio extensivo y formulación empírica sobre el arco fue realizado por Ayrton en 1902, elaborándola siguiente expresión:

$$e_0 = A + B d + (C + D d) / i \quad (3.1)$$

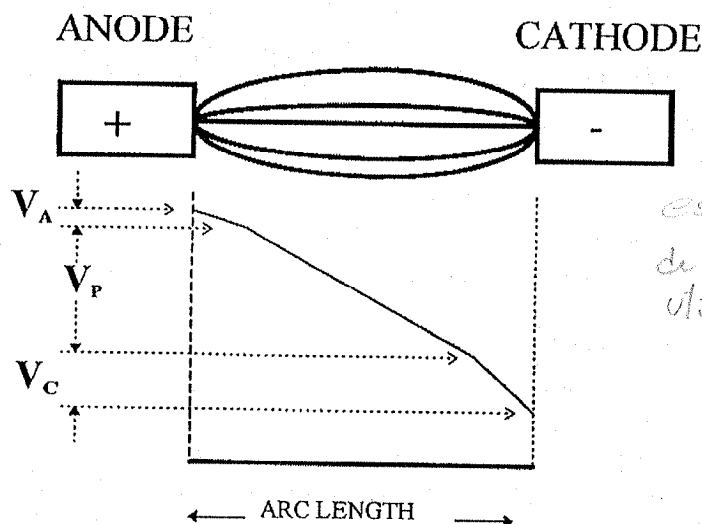


Figura 3.2

donde:

e_0 = es la tensión de arco

d = longitud del arco

i = corriente de arco

$A = 19$; $B = 11,4$; $C = 21,4$ y $D = 3$

Los valores numéricos son resultados empíricos para electrodos de cobre en aire.

La densidad de corriente en el cátodo es independiente de la corriente de arco, siendo función del material del electrodo. En materiales de elevado punto de ebullición, denominados refractarios, tales como carbón, tungsteno o molibdeno, los puntos de arco son relativamente fijos, operando por emisión termoiónica y su densidad de corriente es de 10^3 A/cm^2 .

Por el contrario, en los materiales con bajo punto de ebullición, como cobre y mercurio, se produce el denominado "arco de cátodo frío", con puntos catódicos sumamente móviles, operando por emisión de campo, con densidades de corriente entre 10^6 y 10^7 A/cm^2 , con considerable material (expulsado) erosionado. En los refractarios la erosión es solo debida a la vaporización, factor de gran importancia cuando se habla de contactos para interruptores.

- Arcos de baja presión:

Son los arcos que existen a presión atmosférica o menor, los cuales tienen muchas de las características ya explicadas, con tres diferencias fundamentales:

a- bajo valor de tensión promedio de arco, menos de 40 V

b- la columna positiva está influenciada solamente por el material de los electrodos, ya que la columna se forma con los vapores que han sido extraídos de los electrodos (en los de alta presión provenía de los gases ionizados del ambiente)

c- posee la característica única de permitir la existencia del arco en modo difuso o modo coalescente o constricto.

El modo difuso se caracteriza por un conjunto numeroso de puntos catódicos de alta movilidad, lo que parece contar con múltiples arcos en paralelo. La corriente conducida por cada punto catódico depende del material del electrodo, pero usualmente es de 100 A, mayores densidades se presentan en refractarios y las menores en los de bajo punto de ebullición.

Si la corriente se incrementa, la raíz del ánodo se concentra en un solo punto, mientras en el cátodo los puntos se mueven y parten, desplazándose sobre toda la superficie del cátodo. A mayores corrientes se establece un solo punto en cada electrodo, con elevada energía de colisión de los electrones, liberando gran cantidad de átomos del ánodo, produciendo una zona de fusión masiva. El valor de umbral para que este fenómeno se produzca depende del tamaño y material del electrodo. Ver Figura 3.3

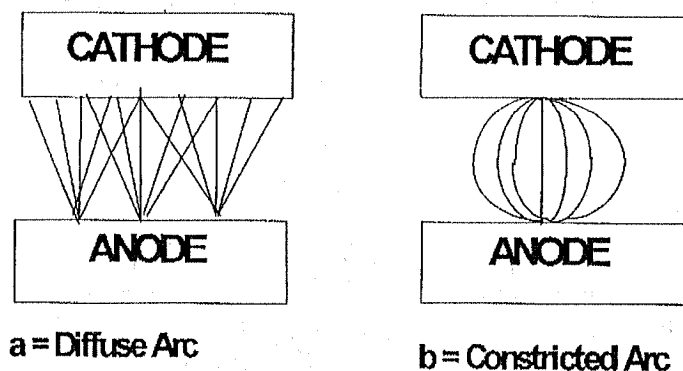


Figura 3.3

Este concepto es aplicado a los interruptores de vacío, donde el umbral se presenta para 15 kA, por lo que en cada ciclo pasa de difuso a constricto cerca del pico de corriente, retornando cuando la intensidad baja. Esto significa que a medida que es mas adelantada la transición a difuso antes del pasaje natural por cero, mayor será la capacidad de interrupción.

Arco en corriente alternada

Debido al funcionamiento propio del arco, en un arco estable si la corriente aumenta, se incrementa la temperatura, promoviendo el proceso de ionización, por lo cual la resistencia de arco disminuye, si la corriente decrece se produce el fenómeno inverso, por lo cual el arco colapsa un corto tiempo antes de que se produzca el cero natural de la corriente. El mismo se reencenderá en el siguiente ciclo con la corriente en sentido contrario, siempre y cuando las condiciones ambientales lo permitan. El tiempo de transición (tiempo de $i = 0$) depende del medio y del circuito externo.

El colapso de corriente es acompañado por un incremento de tensión cuyo pico es denominado "tensión de pico de extinción", mientras este pico no alcance la tensión instantánea del circuito, la corriente será nula.

Durante este período sin corriente, el arco es parcialmente desionizado debido a las pérdidas de calor, por lo que el campo eléctrico necesario para reencenderlo será mayor que el suficiente para mantenerlo. El voltaje de arco es prácticamente constante durante el período estable, con incrementos al comienzo y final del semiciclo.

El tiempo de corriente cero es función de la velocidad con la que se incrementa la tensión del circuito en el comienzo de cada semiciclo y de la velocidad con la que se produce el proceso de deionización, o sea tenemos un juego de dos velocidades, la de recuperación de la tensión del sistema y la de recuperación del poder dieléctrico del espacio entre electrodos.

Proceso de interrupción

El arco estable, o sea una descarga sostenida que quema continuamente, en corriente continua se denomina estático y cuasi-estático en corriente alternada. Nuestro interés radica en el proceso de extinción, que sabemos depende de las características del circuito y de la capacidad del arco de almacenar energía, por lo cual analizaremos diferentemente según el cero de corriente es creado por el arco o por el circuito.

Interrupción en corriente continua:

La corriente continua no posee ceros naturales, por lo que la corriente debe ser forzada a cero de alguna otra forma para lograr la extinción. Para forzar la corriente a cero se usan dos métodos, uno de ellos consiste en incrementar la tensión de arco a valores iguales o mayores a la del circuito, o sino por la inyección de una tensión opuesta a la de arco, lo que es equivalente a introducir una corriente opuesta.

Los métodos empleados para incrementar la tensión de arco consisten en simplemente incrementar la longitud de la columna de arco, constriñéndolo por medio del aumento de la presión del ambiente para así disminuir el diámetro, incrementando la tensión de arco o por medio de la introducción de placas metálicas para producir así una serie de arcos cortos (cámara de ion), cada uno de los cuales poseerá una caída catódica y anódica, agregando 30 V por cada placa introducida.

La inyección de una corriente opuesta a la del arco se logra mediante la descarga de un capacitor sobre el arco.

En la Figura 3.4 se muestra el circuito y la representación gráfica $E = f(i)$ conjuntamente con la de un arco estable (recordar curva anterior, donde representa la parte final), donde puede comprenderse el funcionamiento del arco. Con un arco de longitud 1, los puntos A y B reúnen las condiciones del circuito y del arco, por lo que son puntos de funcionamiento estable. Si se modifica la longitud del arco, la curva ascenderá, aproximando los puntos A y B, hasta un momento en que coincidan, para mayores longitudes no habrá puntos de funcionamiento estable y el arco se apagará.

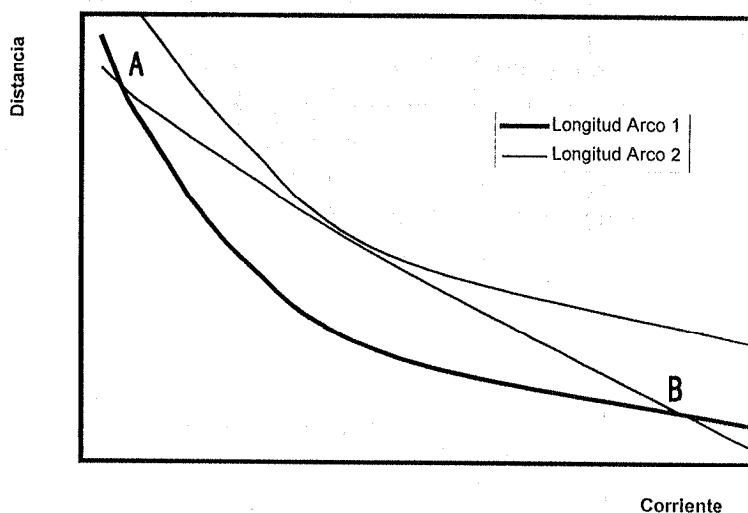


Figura 3.4

Si ahora nos aproximamos a un circuito real, debemos incorporar la siempre existente inductancia, con lo cual la ecuación del circuito será:

$$L \frac{di}{dt} = (E - iR) - e_a = \Delta e \quad (3.2)$$

La inductancia cambia las condiciones, ya que si la corriente está en camino de extinción aparece una reacción para impedirla que refuerza la tensión del sistema, por lo que a fin de lograr la extinción, la tensión de arco deberá ser mayor (mayor longitud de arco por ejemplo). Además el dispositivo interruptor deberá ser capaz de absorber la energía adicional almacenada en la inductancia.

Interrupción en corriente alternada:

Como en este caso la corriente pasa por cero naturalmente dos veces por ciclo, la interrupción se reduce a evitar el reencendido del arco después del cero. El esfuerzo debe concentrarse en la desionización en la zona próxima previa al cero natural, siendo de beneficio desionizar en la zona de los picos sin que esto favorezca la interrupción. Similarmente a lo ya explicado tenemos en juego las dos velocidades, de tensión del circuito y de desionización.

En frecuencias muy bajas, el tiempo de corrientes de baja energía es largo, permitiendo la desionización pasando de arco a descarga luminosa con gran facilidad. Tal fenómeno no se presenta para las frecuencias de uso en potencia, desde $16 \frac{2}{3}$ hasta 60 Hz, ya que los tiempos de cero son muy cortos para pasar de valores de alta conductividad a extinción y evitar la posterior reignición, debiendo tener en cuenta que existe un retraso entre la temperatura y corriente, denominado "histéresis del arco", por el cual cuando la corriente es cero todavía la temperatura es elevada. En 50 Hz y 30 kV en aire se puede mantener en régimen un arco de un metro de longitud.

Cuando la corriente pasa por el cero, la tensión de arco presenta un salto brusco cuyo valor es la suma del pico instantáneo de la tensión de extinción del ciclo anterior más la de reencendido de la siguiente onda, lo cual se debe a la inversión de la corriente. El resto del semiciclo, la tensión se mantiene casi constante. La interrupción se producirá cuando la tensión de arco supere a la del circuito. Ver Figura 3.5

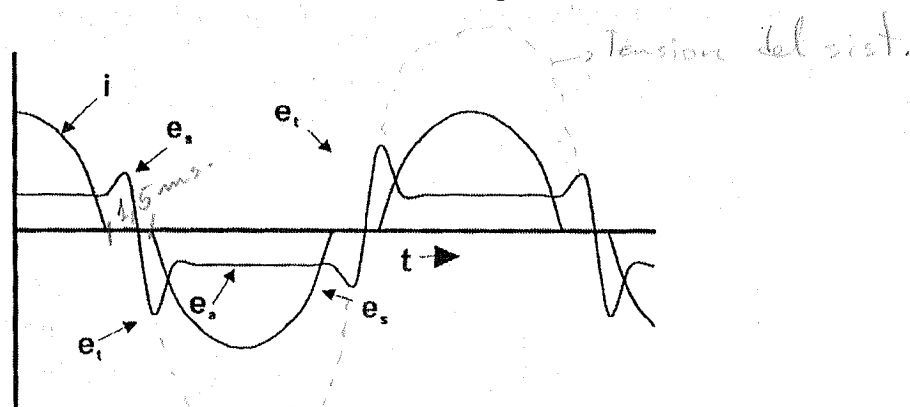


Figura 3.5

Por lo explicado, la situación favorable de extinción se producirá cuando la tensión del circuito posea valores bajos cerca de los ceros de corriente, lo que significa carga resistiva pura.

- Interrupción de circuitos resistivos:

Idealmente la corriente y tensión están en fase, pero debido a que la energía no es suficiente para mantener el arco con bajas corrientes, se produce el cero de corriente antes que el cero de tensión. En tal momento la tensión de arco y la del circuito son iguales, o sea que no se producen nuevas cargas en el arco y las existentes se encuentran en proceso de desionización, por lo tanto tenemos un proceso de enfriamiento generalizado. Si la tensión del sistema crece más rápidamente que el poder desionizante,

se reencenderá el arco algunas veces mas, hasta que el efecto desionizante permita que el poder dieléctrico supere a la tensión, produciendo la extinción. Ver Figura 3.6

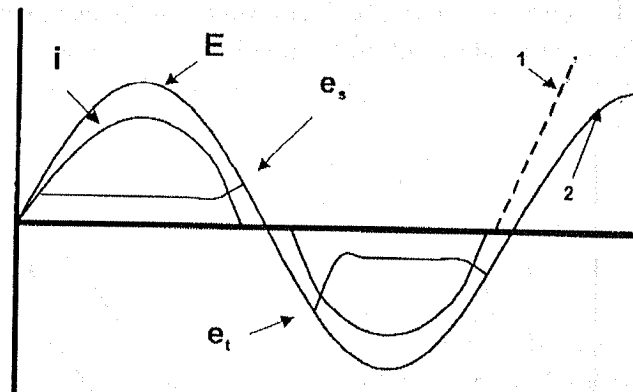


Figura 3.6

- Interrupción de circuitos inductivos

Los ceros de corriente se producen durante los máximos de tensión, presentando una situación totalmente favorable al reencendido.

Desdichadamente todos los circuitos tienen algo de capacidad, entre espiras, contra tierra, etc., que a pesar de ser de pequeño valor juegan un papel muy importante en la interrupción. Cuando la corriente se hace cero, la capacidad citada permanece cargada con el valor máximo del voltaje del sistema mas el valor de pico de la tensión de extinción. Cuando el arco se extingue, la energía electromagnética almacenada en la inductancia es transformada en energía electrostática en la capacidad y viceversa, con una serie de oscilaciones amortiguadas por la presencia de resistencia en el circuito, con una frecuencia en general muy superior a la de potencia del circuito. Este proceso dificulta la interrupción, ya que el crecimiento del poder dieléctrico debe ahora compensar un voltaje con elevada velocidad de crecimiento. Además deberá soportar la sobretensión de oscilación. Figura 3.7.

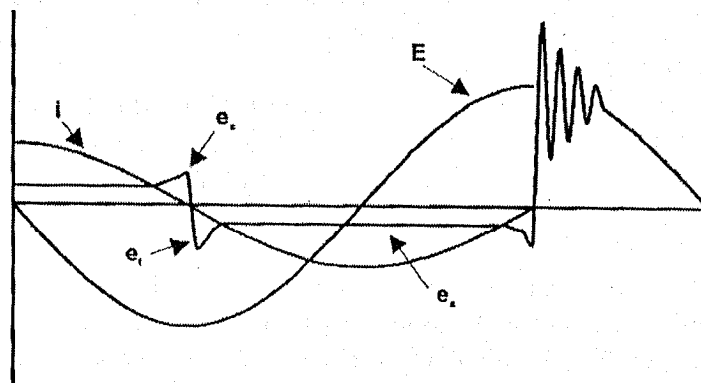


Figura 3.7

- Interrupción de circuitos capacitivos

El comportamiento de un circuito puramente capacitivo se muestra en la Figura 3.8. Al contrario de lo que ocurría en el caso inductivo puro las condiciones del circuito son totalmente favorables en el momento de la interrupción, o sea en el pasaje por cero de la corriente, debido a que la tensión que aparece entre los electrodos crece a muy baja velocidad, quedando el capacitor cargado prácticamente a su máxima tensión. Medio

ciclo mas tarde, la tensión sobre los electrodos es duplicada, siendo la suma algebraica de la de carga mas la máxima del sistema, sin embargo ha existido un largo período en general suficiente para que se recupere el poder dieléctrico, evitando la presencia de reencendidos. En ciertos casos puede presentarse la escalación de tensiones, que se produce cuando hay un reencendido frente al doble de tensión, se apaga, reenciende con tres veces y así sucesivamente, lo que puede conducir al fracaso de la interrupción.

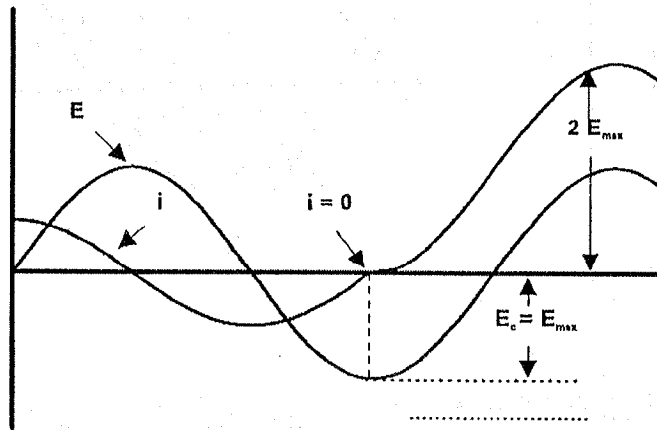


Figura 3.8

Teorías de la interrupción

La complejidad del comportamiento del arco eléctrico, ha conducido a lo largo de los años a varios investigadores, ha proponer diversas teorías que describan el proceso.

Los primeros modelos se concentraban en la zona del pasaje por cero, donde el arco se extinguía o reencendía, los últimos modelos se dedican a explicar lo que ocurre en la zona de los picos de corriente, a fin de calcular el diámetro del arco.

Si bien es cierto que tales modelos solo brindan una visión aproximada de lo que ocurre, la aplicación de la computadora ha permitido el uso de modelos más exactos, empleando ecuaciones diferenciales parciales que relacionan fenómenos complejos de flujo de gases y relaciones termodinámicas.

Teoría de Slepian:

Introducida en el año 1928 y conocida por la teoría de la velocidad, simplemente establece que la interrupción exitosa es obtenida cuando la velocidad de crecimiento del poder dieléctrico es mayor que la velocidad de incremento de la tensión de restablecimiento del sistema.

El proceso de interrupción fue visualizado como comenzando inmediatamente después del pasaje por cero, cuando los electrones son extraídos del cátodo y cuando una zona o delgada vaina compuesta de iones positivos es creada alrededor del cátodo. Slepian consideraba que el poder dieléctrico de esta vaina era superior al del medio en el cual se producía el arco. El éxito de la interrupción dependía de la velocidad de recombinación de iones, que incrementaba el espesor de la vaina, en comparación con la recuperación del sistema, que incrementa el campo eléctrico a través de la vaina.

Teoría de Prince:

Dice que el circuito es interrumpido si la longitud del camino de descarga introducido en el arco se incrementa a una extensión tal que la tensión de restablecimiento no es suficientemente alta para lograr la perforación en el camino.

En el momento en el que se establece el cero de corriente, el arco es cortado en dos por una explosión de gases refrigerantes, quedando las dos mitades conductivas de la

columna de arco en serie con la columna de gas frío, la cual es no conductora. Si la conductividad de las mitades es alta puede considerarse como una extensión de los electrodos.

Teoría de Cassie:

Presenta la teoría en 1939, mediante una ecuación diferencial, basada en el concepto que la conductividad del arco en altas corrientes es controlada por las pérdidas por convección durante el intervalo bajo alta corriente. Supone que se mantiene una temperatura aproximadamente constante a través del diámetro del arco. Los cambios de corriente producen cambios de diámetro pero no de temperatura dentro de la columna de arco.

Por ello la conductancia de régimen G es simplemente proporcional a la corriente, por lo que el gradiente de tensión de régimen es fijo.

Para considerar el retraso debido a la capacidad de almacenar energía Q y la velocidad de pérdidas de energía N, se introduce el concepto de constante de tiempo, dada por:

$$\vartheta = Q / N \quad (3.3)$$

La expresión simplificada de la teoría de Cassie, dada para valores instantáneos de corriente, es:

$$d/dt (G^2) = 2/\vartheta (I / E_0)^2 \quad (3.4)$$

En la región de corrientes altas la coincidencia es muy buena, alrededor del pasaje por cero la precisión es satisfactoria para elevadas velocidades de decaimiento de la corriente. Teóricamente y prácticamente el diámetro del arco no se hace cero con la corriente, permaneciendo un pequeño filamento de arco de diámetro de una fracción de milímetro. Este filamento es un plasma a alta temperatura que puede volverse arco fácilmente con la aparición de suficiente tensión. Este modelo es muy exitoso cuando se lo aplica conjuntamente con el siguiente.

Teoría de Mayr:

Presentada en 1943, considera al arco como de diámetro constante y cuya temperatura es variable con el tiempo y con la dimensión radial. Posteriormente agregó que el decaimiento de la temperatura es causado por conducción térmica y que la conductividad eléctrica del arco es función de la temperatura.

Sus estudios en Nitrógeno a 6000 ° K, hallaron solamente un pequeño aumento en la velocidad de pérdida del calor en relación con la temperatura axial, asumiendo pérdidas constantes N_0 , independientes de la temperatura y corriente.

La ecuación diferencial resultante es:

$$1/G \, dG/dt = 1 / \vartheta (E I / N_0 - 1) \quad (3.5)$$

donde $\vartheta = Q_0 / N_0$

La validez de esta teoría es normalmente aceptada durante el período de corriente cero, esto es así ya que en esa región las pérdidas radiales representan el factor dominante y controlador.

Teoría combinada de Browne:

Es una combinación de las dos anteriores, fue presentada en 1948, usando una ecuación del tipo de Cassie para definir el régimen de arco controlado por corriente y convertirla en otra del tipo de Mayr para el régimen controlado por temperatura, si la interrupción no se presenta en el pasaje por cero, se revierte nuevamente a la ecuación tipo Cassie. El punto de transición entre una y otra es en la zona de unos pocos microsegundos alrededor del pasaje natural por cero.

Las ecuaciones del modelo son:

Para el período de Cassie antes del cero de corriente:

$$d/dt (1/R^2) + 2(1/R^2) = 2/\vartheta (1/E_0)^2 \quad (3.6)$$

Para el período de Mayr alrededor del cero:

$$dR/dt - R/\vartheta = -e^2/\vartheta N_0 \quad (3.7)$$

donde la constante de tiempo está en el orden de un microsegundo.

Teorías modernas:

Numerosas teorías han aparecido en los últimos años, debidas fundamentalmente a la disponibilidad de poderosas herramientas de cálculo.

La más exitosa es la debida a Hermann y Ragaller, que describe el funcionamiento de interruptores en aire y SF₆ en forma sumamente exitosa.

La principal diferencia con los anteriores es la incorporación del efecto de la turbulencia.

Se efectúan las siguientes suposiciones:

- a- Existen tres regiones delimitadas térmicamente, la primera encierra el núcleo del arco, la segunda cubre la zona que rodea al arco y la tercera rodea a los gases externos.
- b- La columna de arco alrededor del cero de corriente es cilíndrica y la distribución de temperaturas es independiente de la posición axial.
- c- La velocidad promedio de flujo de gases es proporcional a la posición axial.

Si bien es cierto que necesita algunos refinamientos, es el que mejores resultados brinda para interruptores.

Todos los modelos actuales poseen un elemento en común, que es el reconocimiento de la importancia de la turbulencia, habiendo sido demostrado que a 2000 A la turbulencia no modifica la temperatura del arco, pero con 100 A y turbulencia hace una diferencia de 4000 ° K, en corriente cero la diferencia puede alcanzar los 6000 ° K. La turbulencia reafirma la teoría de Mayr, ya que con ella la columna se enfría a valores próximos a los de su teoría, donde la conductividad eléctrica varía exponencialmente con la temperatura.

3.1.2- Sobre tensiones de maniobras

Una de las causas más importantes de falla dieléctrica en un sistema eléctrico es por sobre tensiones de maniobras, las que son originadas por: conexión de una línea descargada, abrir un seccionador, interrupción de corrientes inductivas o capacitivas de pequeño valor. La incidencia de tales perturbaciones no solo depende de la presencia de fallas sino también de la rutina de maniobras en uso.

Conexión de una línea:

La Figura 3.9 muestra el circuito simple, donde el transformador es representado por su reactancia de dispersión y el cable por su capacidad. La tensión transitoria oscila a relativamente baja frecuencia, y su amplitud alcanza al doble de la tensión del sistema presente en el momento de la conexión. En la práctica los sistemas son más complejos,

con líneas largas e interconectadas, por lo que su circuito esquemático no es tan simple como el anterior. La tensión transitoria es determinada por la impedancia combinada del transformador y de la impedancia de onda total de las líneas.

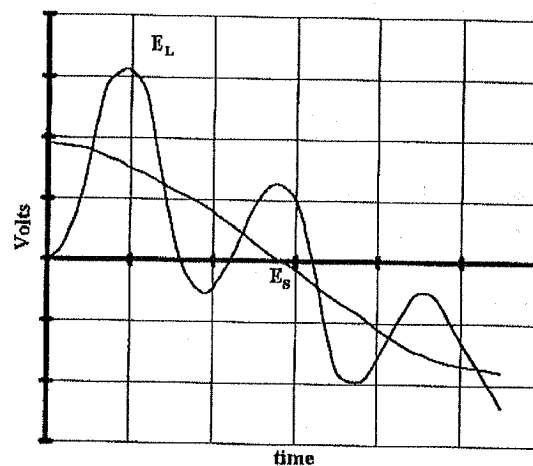
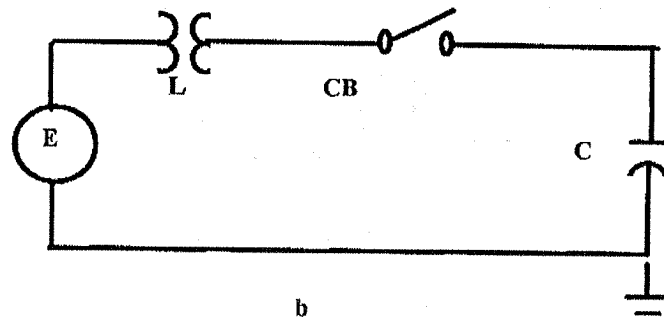


Figura 3.9

El oscilograma resultante es mas complicado, ver Figura 3.10, teniendo la siguiente expresión para determinar el factor de sobretensión:

$$K_s = \frac{1}{\cos 2\pi f \sqrt{LC}l - \frac{X_s}{Z} \sin 2\pi f \sqrt{LC}l} \quad (3.8)$$

donde:

f = frecuencia de potencia

L = inductancia de secuencia positiva por unidad de longitud de la línea

C = capacidad de secuencia positiva por unidad de longitud de la línea

l = longitud de la línea

X_s = reactancia de cortocircuito de la fuente

Z = impedancia de onda de la línea

Los valores elevados del factor de sobretensión se presentan cuando:

- se incrementa el largo de la línea
- se aumenta la reactancia de fuente
- baja la impedancia de onda de la línea por aumento del número de líneas
- aumento de frecuencia de potencia

En ciertas aplicaciones se emplean interruptores con recierre, que frente a una falla monofásica, puede encontrar bastante carga en las líneas sanas como para producir el

efecto de escalación de voltaje, si el ángulo de conexión es favorable para ello, pudiendo alcanzarse sobretensiones de cuatro veces la nominal.

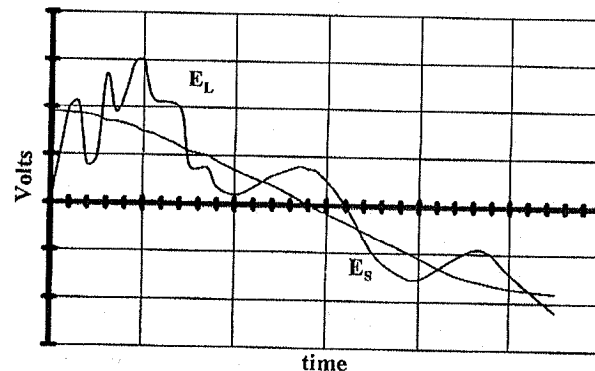
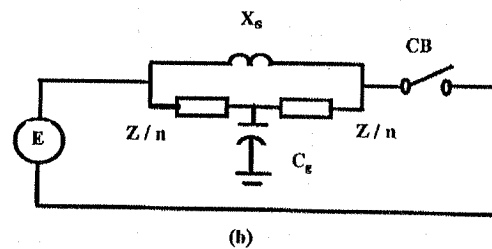


Figura 3.10

Desconexión:

Siempre el proceso de desconexión se basa en la extracción de la energía del arco eléctrico, por lo que podría pensarse que el corte de corrientes elevadas es siempre más exigente que el correspondiente a corrientes bajas, no obstante la interrupción de corrientes bajas favorece el reencendido del arco, que a su vez puede ocasionar incremento de la tensión de restablecimiento.

Se define reencendido (restrike) como una descarga que ocurre un cuarto de ciclo o más a continuación de la primer interrupción.

Se denomina reignición (reignition) a una descarga que ocurre no después de un octavo de ciclo pasado el cero de corriente.

- Desconexión de cargas capacitivas pequeñas: Es el caso que se presenta al interrumpir bancos de capacitores y líneas en vacío, que representa corrientes de menos de 1000 A para el primer caso y menos de 10 A para el segundo.

Como la interrupción siempre tiene lugar en el cero natural de corriente, siendo bastante sencillo pues el arco es de baja energía y la distancia entre contactos es muy pequeña, la tensión de carga permanece en el valor máximo. Luego de unos pocos milisegundos, con todavía un espacio chico, aparece la tensión de restablecimiento en su valor doble o 2,5 según el sistema esté puesto a tierra o no, provocando el reencendido del arco. El capacitor o la línea tratará de cargarse ahora con ese valor de tensión, provocando una corriente de carga fijada por la inductancia y capacidad del sistema. Si el arco se reenciende la carga será ahora de 3 o 3,5 veces la tensión nominal, medio ciclo después el proceso se repite y así sucesivamente, con corrientes de carga y reencendidos, como se muestra en la Figura 3.11.

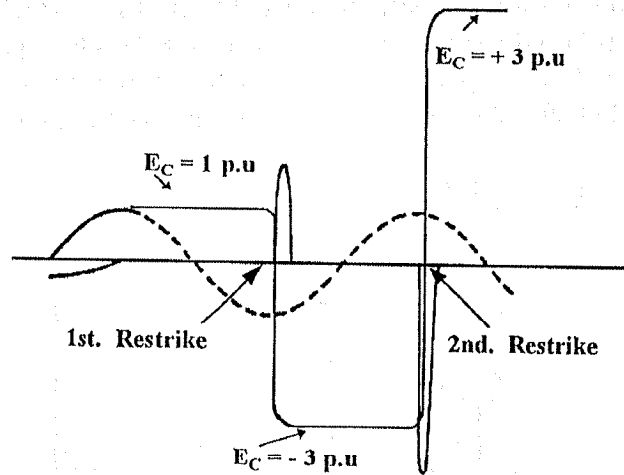


Figura 3.11

- Desconexión de corrientes de carga inductiva: Un interruptor preparado para cortar corrientes de varios miles de Amp. corta fácilmente corrientes inductivas de algunas decenas de Amp. en su pasaje por cero. El corte lo hace muy rápidamente, con un pequeño espacio entre contactos, produciéndose un reencendido con elevada velocidad de crecimiento y considerable sobretensión. Debido al amortiguamiento del circuito y a la posibilidad de que el arco se reencienda en cualquier punto, las sobretensiones normalmente no superan a 2 p.u.. Con interruptores de capacidad de ruptura muy elevada, se puede producir una serie de interrupciones, almacenamiento de mayor energía en la inductancia y mayor sobretensión, que teóricamente es muy difícil de analizar, por lo que es conveniente el empleo de descargadores de sobretensión para controlar el fenómeno. Ver Figura 3.12.

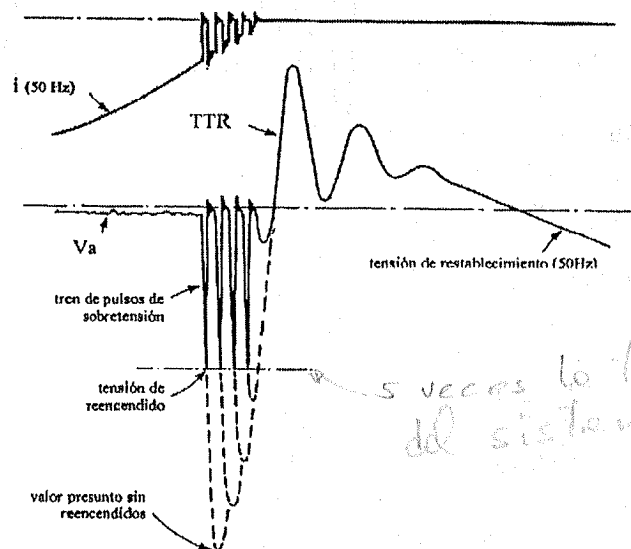


Figura 3.12

- Corriente cortada: Este fenómeno aparece cuando la corriente es interrumpida antes del pasaje natural por cero, debido a la inestabilidad del arco. El valor instantáneo de corte de corriente depende del tipo de interruptor, todos ellos lo pueden causar, si bien el más predispuesto es el de vacío.

El interruptor de vacío. Tiene una corriente mínima de aprox. 20Amp.

En el momento en que se pasa de un valor finito de corriente a cero, existe energía almacenada en la inductancia la cual es transferida a la capacidad del lado de la carga, creando las condiciones para la generación de sobretensiones.

La ecuación de balance energético para el circuito de la Figura 3.13 es:

$$\frac{1}{2} C E_m^2 = \frac{1}{2} C E_c^2 + \frac{1}{2} L I_0^2 \quad (3.9)$$

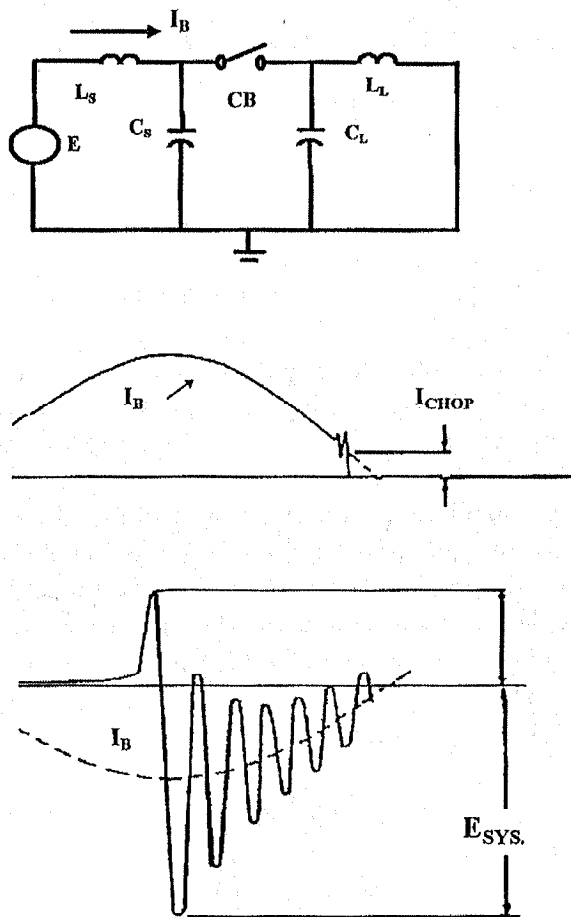


Figura 3.13

Resultando un factor de sobretensión:

$$K = \frac{E_m}{E_s} = \sqrt{\left(\frac{I_0}{E_s}\right)^2 \left(\frac{L}{C}\right) + \frac{E_c}{E_s}} \quad (3.10)$$

Donde:

E_m = pico de sobretensión

E_0 = pico de tensión de alimentación

E_c = tensión sobre el capacitor en el momento del corte

I_0 = valor instantáneo de la corriente cortada

L/C = impedancia de onda del circuito

Como se ve de la expresión la sobretensión es altamente dependiente del valor de la corriente cortada.

Los valores que puede alcanzar la corriente cortada son función del tipo de interruptor:

$$I_0 = \lambda \sqrt{C_L} \quad (3.11)$$

con C_L igual a la capacidad del sistema (entre 10 y 50 nF) y λ = número de corte, el cual vale:

7 a 10×10^4 para interruptores en reducido volumen de aceite
 15 a 40×10^4 para interruptores de aire comprimido
 4 a 17×10^4 para interruptores en SF_6

La corriente cortada en interruptores en vacío no depende de la capacidad, siendo función del material de los electrodos:

5 a 17 A para cobre - bismuto

2 a 5 para cromo cobre

Las sobretensiones de maniobra, no son generadas por los interruptores por si mismos, sino que por la reacción del sistema, la sobretensión cuenta con dos componentes, la de frecuencia de red y la transitoria. Tales componentes pueden controlarse mediante los siguientes métodos:

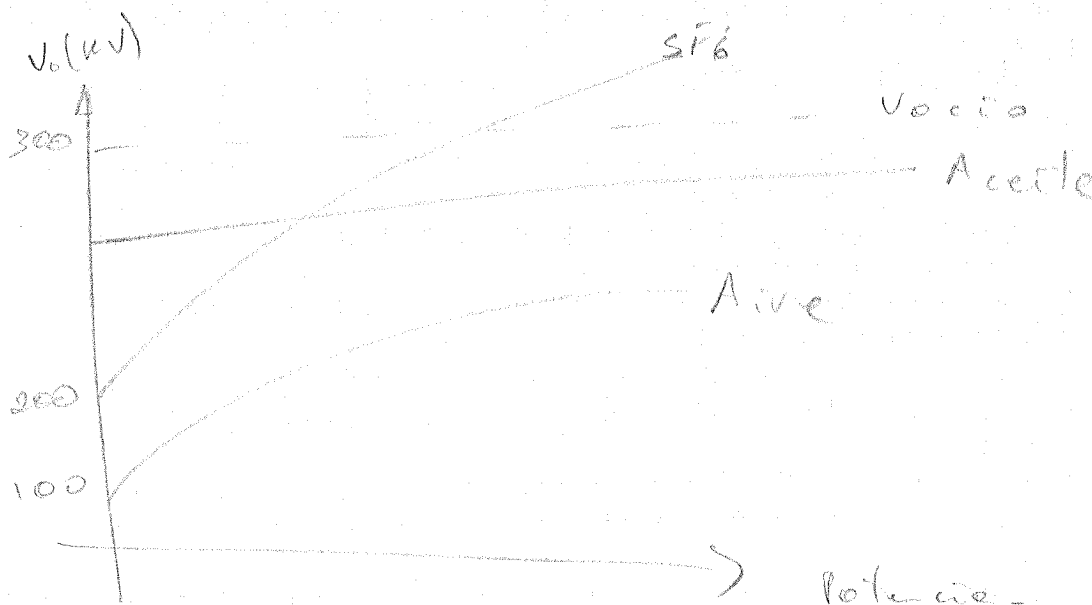
Control de tensión de frecuencia de red:

- Control de la polaridad del cierre
- Agregado de resistencias de preinserción y o preapertura
- Reducción de la reactancia de fuente

Control de transitorio:

- Eliminando la carga atrapada en la línea
- Cierre sincronizado (en voltaje cero, o acomodando las tensiones de ambos lados del interruptor)
- Apertura sincronizada
- Usando resistencias de preinserción

El método mas usado es el de las resistencias de preinserción.



3.1.3- Tipos de interruptores

Los distintos tipos de interruptores poseen diferentes campos de aplicación, dado por características técnicas y en ciertos casos por costumbre, encontrándonos con bastante movilidad al respecto, causada por los adelantos tecnológicos que se incorporan día a día. Normalmente se los clasifica por su tensión nominal, por su ubicación, apariencia externa (tanque vivo o muerto, que significa tanque a potencial de línea o a nivel de tierra) y por el medio empleado para la extinción. Para nuestro estudio nos basaremos en esta última clasificación.

En tensiones de 5 a 38 kV, en instalaciones cerradas, el más popular es el de aire con soplado magnético en USA y el de reducido volumen de aceite en Europa. En altas tensiones se emplean de Aire comprimido y elevado volumen de aceite.

Con la aparición en los 60, de los interruptores de vacío y en SF₆ se puede asegurar que han avanzado sobre los campos de los anteriores, llegando a transformarlos en obsoletos.

3.1.3.1- Interruptores en aire con soplado magnético

Este principio de interrupción es el más antiguo, habiendo comenzado con los interruptores primitivos a cuchilla, con capacidad de interrupción y tensión nominal muy limitados, que mejoran su comportamiento mediante el agregado de otros componentes.

En aire libre a presión atmosférica el poder dieléctrico es muy pequeño y además no existe elemento que acelere el proceso de recombinación, por lo que la constante de tiempo para desionización es demasiado larga. Esto significa que no generará elevadas sobretensiones de maniobra y será insensible a las TRV (tensión transitoria de restablecimiento).

Las medidas tomadas son a fin de mejorar el proceso de desionización mediante la refrigeración del arco, aumento de la resistencia y de la tensión de arco. Este proceso reduce la corriente y el ángulo de fase, mejorando la posibilidad de extinción del arco.

Métodos:

- Incrementar la longitud del arco, lo cual aumenta la caída de tensión en la columna positiva
- Dividir el arco en una serie de arcos cortos conectados en serie, los cuales agregan una caída catódica y anódica por cada arco, si bien es cierto que disminuye la caída en la columna, no obstante el resultado es positivo, logrando superar a la tensión del sistema por lo que se extingue la corriente.
- Encerrar el arco dentro de canales estrechos, reduciendo la sección transversal de la columna e incrementa la tensión.

Los dos últimos métodos agregan el enfriamiento adicional provocado por la capacidad de almacenamiento de energía de las placas separadoras.

Este tipo de interruptor utiliza una cámara denominada apagachispas, individual por polo, que soporta las placas separadoras y en ciertos casos posee la bobina de soplado magnético.

El arco se inicia entre los contactos, siendo impulsado hacia la zona de placas por medio de los denominados conductores de arco, que son un a especie de cuernos, siendo posteriormente introducido entre las placas por medio de la tendencia a abrirse del arco y la fuerte corriente de convección de los gases calientes. A fin de controlar el

movimiento de los gases, se practican sobre las placas ranuras verticales, de forma variable entre fabricantes.

Para aplicaciones de baja tensión las placas son metálicas, ya sea de acero o hierro cromado, en casos de mayor tensión, hasta 15 kV y 50 kA, las placas son aislantes, construidas con cerámicas como por ejemplo óxido de circonio, óxido de aluminio, etc. En los casos de mayor tensión el arco es obligado a seguir un camino en zigzag entre las placas, siendo de mayor longitud a medida que el arco asciende dentro de la cámara. También se emplea el método de soplado magnético, que se basa en la facilidad que presenta el arco de cambiar su forma frente a fuerzas de origen magnético, como ya fue explicado. La bobina tiene su eje perpendicular al camino del arco, siendo recorrido por la corriente del interruptor recién cuando éste ha abierto los contactos principales, o sea que está conectada a los cuernos, produciendo sobre el arco una fuerza que trata de introducirlo más profundamente dentro de las placas separadoras. Existe un retardo expreso entre la fuerza y la corriente, para que continúe existiendo el soplado en la zona del cero de corriente. Como vemos la tendencia al apagado del arco depende fundamentalmente de la intensidad de corriente, por lo que diseños más complejos incluyen un soplado de aire en el sentido del soplado magnético, el cual se obtiene de forma independiente de la intensidad.

El calentamiento de las placas separadoras y de los espacios entre ellas provoca la emisión de gran cantidad de gases calientes y vapores que son liberados por la parte superior de la cámara extintora. En situaciones donde el espacio es reducido o donde la expulsión de gases parcialmente ionizados puede causar fallas de aislación, se coloca en la parte superior de la cámara una malla metálica cuya función es enfriar y condensar los gases o vapores de escape.

Este tipo de cámara es sumamente antiguo, pero ha prestado y seguirá prestando muy buenos servicios por su simplicidad y economía.

Su tamaño es mayor que los con otro principio de interrupción, no requiere dieléctrico especial, debe efectuarse frecuente mantenimiento sobre los contactos y es muy ruidoso al operar.

3.1.3.2- Interruptores en aire comprimido

Las primeras patentes provienen del año 1927, pero recién estuvieron disponibles comercialmente para los años 40, habiendo prestado muy buen servicio durante más de 50 años. Prácticamente hasta la aparición del tipo en SF₆, no había otro tipo de elemento para tensiones de más de 200 kV. Realmente no hay una gran diferencia en funcionamiento con el último, ajen a pequeñas variaciones en la capacidad de refrigeración y en las constantes de tiempo de los gases usados.

El proceso de extinción es comenzado entre dos contactos que se separan, entre los que se establece un arco, simultáneamente con la apertura de una válvula que produce un chorro de aire a alta presión el cual barre la columna de arco sometiéndola a un intenso efecto refrigerante.

Según la dirección del chorro de aire se denominan: chorro axial, radial y cruzado. Ver Figura 3.14. Los dos primeros se prefieren para diseños de alta tensión, en cambio el último es para media tensión y elevada capacidad de interrupción.

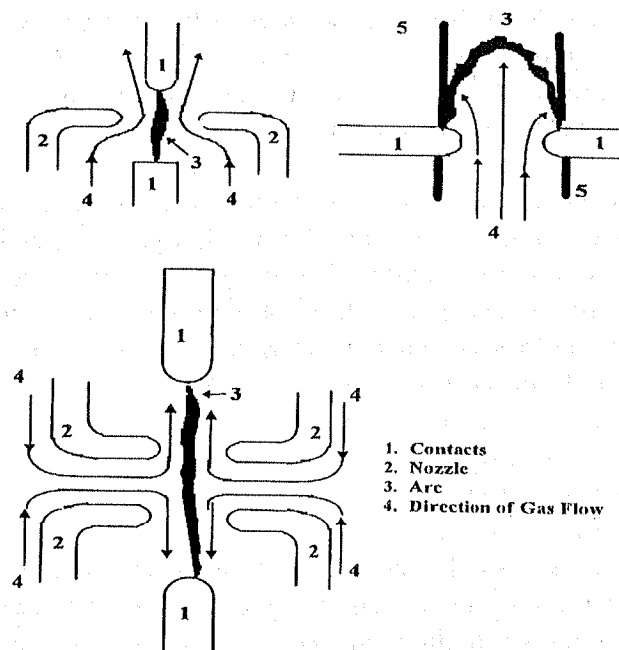


Figura 3.14

El control efectivo del flujo de gas se obtiene mediante el uso de toberas D'Laval, del tipo convergentes - divergentes. Las toberas pueden ser aislantes (teflón reforzado a fin de disminuir la erosión en la garganta) o metálicas, y de simple o doble flujo.

Las toberas conductoras presentan la ventaja de extender mayormente la longitud del arco y con velocidad mas elevada que las aislantes, de forma de someter rápidamente al arco a una intensa extracción de calor. Ver Figura 3.15.

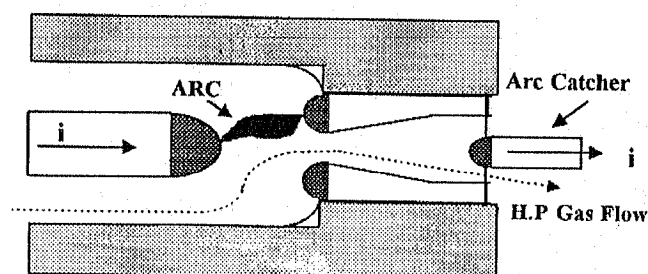


Figura 3.15

Debido a las limitaciones de tensión de este tipo de interruptores se recurre a la colocación de varias cabezas interruptoras en serie, donde cada una de ellas posee la capacidad de extinción íntegra, siendo la principal dificultad la repartición uniforme de la tensión de restablecimiento (transitoria) entre ellas. En condiciones ideales, todos los interruptores deben actuar de la misma manera, compartiendo la sollicitación, repitiendo el comportamiento eléctrico y aerodinámico.

La última condición se garantiza por medio del empleo de válvulas individuales para cada cabeza, con cañerías de similar longitud e igualdad de pérdidas de carga. La repartición eléctrica se garantiza por medio del empleo de redes igualadoras contando con capacitores y resistencias conectadas entre las partes vivas y tierra.

Los equipos de tensiones mayores a 72,5 kV son del tipo de tanque vivo. La operación de disparo es iniciada por la apertura de la válvula de aire comprimido, que desplaza al mismo tiempo que al chorro de aire al contacto móvil, por lo que en un corto tiempo

(del orden de 40 0 50 ms) se necesita la apertura de un seccionador auxiliar en aire que evita el reestablecimiento del circuito cuando la presión ha disminuido y los contactos principales se cierran. El consumo de aire era muy elevado y se presentaban dificultades para poder hacer el recierre en tiempo corto.

Aparecieron nuevos diseños, hasta que en la actualidad se mantiene la cámara de arco a alta presión, para interrumpir se abre a la atmósfera y se comienza el movimiento de contactos, de manera tal que luego de la interrupción la cámara vuelve a alta presión, con contactos abiertos, recuperando su poder dieléctrico haciendo innecesario el uso del seccionador, y además disminuyó en mucho el consumo de aire, incrementándose la capacidad de cierre e interrupción.

3.1.3.3- Interruptores en aceite

Cuando se produce un arco en aceite, las superficies del aceite en contacto con el arco de alta temperatura (5000 a 15000 ° K) se vaporizan rápidamente produciendo una burbuja que encierra totalmente al arco. La composición de esta burbuja es 60 a 80 % hidrógeno, 20 % acetileno, y el resto son pequeñas proporciones de metano y otros gases.

En la Figura 3.16, se ven las tres zonas en las que se divide el sistema, una interior compuesta de gases disociados en contacto con el arco, una intermedia formada por vapores supercalentados en su parte interior y saturados en el exterior y una zona externa formada por líquido en ebullición.

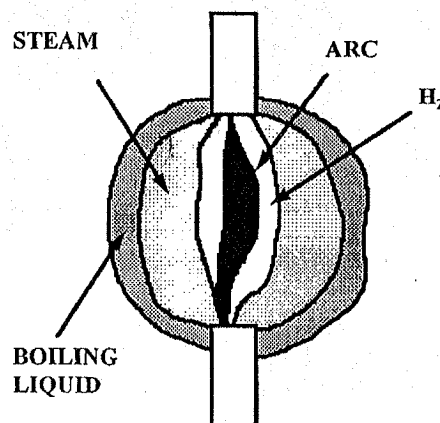


Figura 3.16

El hidrógeno sería un gas ideal para interrupción, si no fuera por las dificultades de recuperación y empleo.

Los primeros diseños de interruptores en aceite no poseían elemento alguno de control del tamaño de la burbuja, encontrándose los tres polos dentro de un voluminoso tanque metálico. La extinción se lograba por elongación del arco, incremento de la presión en la zona del arco y por la turbulencia natural del aceite caliente y movimiento de los contactos. Usualmente el arco era demasiado largo y tardaba mucho tiempo en extinguirse, lo que hacía impredecible el monto de energía a manejar por el interruptor.

El siguiente avance consistió en el agregado de una cámara de extinción, construida de material aislante de alta resistencia mecánica, la cual rodeaba completamente al arco. Por ello la burbuja de hidrógeno es también contenida dentro de la cámara, durante una parte del movimiento del contacto, una vez que este dejaba la cámara se producía un escape de gases similarmente a lo que ocurre en la tobera del en aire comprimido.

Uno de los inconvenientes de este esquema es la sensibilidad al punto en la onda de tensión, ya que si el cero ocurre muy temprano en el movimiento del contacto, se deberá esperar por el siguiente, que se presenta cuando la presión en la cámara ha disminuido demasiado. Otra de las desventajas es la dependencia de la interrupción con la intensidad de corriente, en corrientes altas la cámara podía explotar y en corrientes bajas ocurre algo similar a lo explicado en el párrafo anterior. A esa corriente se la denomina "corriente crítica".

Las soluciones surgieron como válvula de sobrepresión para evitar la explosión de la cámara y un sistema de contacto móvil - pistón el cuál bombeaba aceite a presión hacia la zona de arco independientemente de la intensidad de corriente.

El último adelanto fue el denominado *cross baffle*, que se muestra en la Figura 3.17, compuesto por placas apiladas formando pasajes para el arco los cuales ofrecen constricción y venteo, que somete al arco a un continuo flujo transversal, mejorando su capacidad de interrupción.

Existen dos tipos de interruptores en aceite, el de elevado volumen y el denominado reducido volumen, donde la principal diferencia es que en el primero de ellos el aceite brinda no solo el líquido para la interrupción sino también como medio primario de aislación. El principal uso de los de elevado volumen se presenta en USA, donde hasta 72,5 kV poseen los tres polos en el mismo tanque, para mayores tensiones se emplean interruptores unipolares.

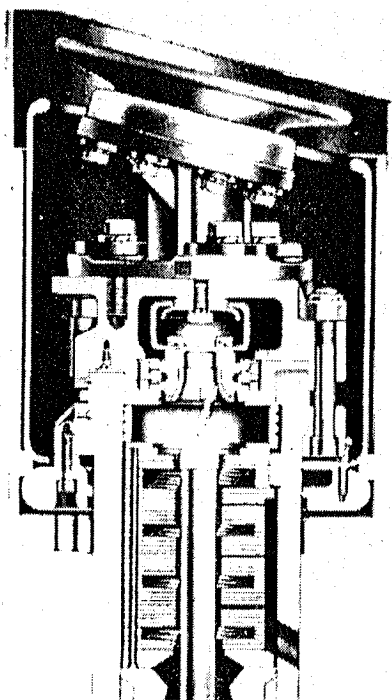


Figura 3.17

Los principales inconvenientes de este tipo de interruptor radican en el espacio necesario en la estación, la fundación (debe ser capaz de absorber cuatro veces el peso debido a las solicitaciones de cortocircuito, del orden de 50 Ton.) y en el volumen de aceite. (un interruptor unipolar de 230 kV necesita 50.000 litros).

El de reducido volumen es popular en Europa por razones de espacio y economía de materiales, siendo la principal diferencia que en este caso la aislación fuera de la cámara de extinción es brindada por materiales aislantes sólidos, como porcelana inicialmente y resinas de epoxy reforzadas con fibra de vidrio en la actualidad.

3.1.3.4- Interruptores en SF₆

Si bien es cierto que el SF_6 se conoce desde el año 1900, recién en 1953 fue empleado como medio extintor. La capacidad de ruptura con este gas es 100 veces superior a la del aire, y la presencia de valores moderados de flujo de gases incrementa la capacidad 30 veces. En su corta vida ocupado el campo desde 72,5 kV hasta 800 kV, reemplazando a la tecnología del aire comprimido y del aceite. Para bajas tensiones tiene un formidable competidor, que veremos mas adelante, el interruptor en vacío.

El SF_6 es un gas químicamente estable, no inflamable, no corrosivo, no venenoso, incoloro e inodoro, posee un peso molecular de 146 y es uno de los gases mas pesados, por lo que su velocidad sónica es limitada a 136 m/s, una tercera parte de la velocidad sónica del aire.

Es un excelente dieléctrico, doble poder que el aire y a tres atmósferas iguala al poder del aceite, sin perderlo a pesar de estar contaminado con porcentajes importantes de aire o nitrógeno. Posee superior capacidad de transferencia de calor que el aire, y es sumamente electronegativo o sea tiene afinidad de electrones. Es un excelente extintor debido a su baja temperatura de disociación y elevada energía disociativa, con alta velocidad de recuperación de dieléctrico, con pequeña constante de tiempo para el cambio de conductancia cerca del cero de corriente.

Por su baja temperatura de disociación, comienza a disociarse durante los primeros momentos del arco, pero al enfriarse se recombina casi totalmente, salvo algunos compuestos que se depositan en forma de polvos blancos. Algunos de los productos residuales se vuelven corrosivos en presencia de humedad, atacando a los aislantes como porcelana, resinas y resinas reforzadas, por lo cual deben recubrirse con anticorrosivos. La purificación del gas se logra en forma suficiente mediante la circulación a través de filtros.

Uno de los factores más importantes a tener en cuenta con este gas es el problema de contaminación ambiental, ya que se considera como uno de los potenciales colaboradores al efecto invernadero, debido a poseer una estructura molecular superestable, por pertenecer a la familia de los totalmente fluorinados, lo que desde el punto de la vida humana los hace indestructibles, tiene una vida de 3200 años, comparada con la vida de 50 a 200 años del dióxido de carbono.

Su GWP (Global warming potential) es muy alto, 24.900 si se lo compara con el contaminante más común, CO_2 , que posee valor unitario.

La emisión estimada para el año 2010 no es muy alta, todavía es muy inferior si se compara con la concentración del CO_2 , pero su larga vida puede complicar las cosas en el futuro.

Veremos a continuación cual es su comportamiento durante el arco, para lo cual recordaremos la que la distribución radial de temperaturas en el arco posee forma de pico de pato, cuando éste es refrigerado por conducción. Esto significa que la mayor parte de la corriente es conducida por la parte central del arco, pues un aumento de temperatura corresponde a un aumento de conductividad. El arco siempre trata de mantener su equilibrio, por lo que a una variación de corriente se producirá un cambio de temperatura, no obstante cuando se ha alcanzado la ionización completa, un aumento de corriente no provoca un aumento de temperatura, cuando la corriente está pasando por cero, la región pierde conductividad. El pico de conductividad térmica del SF_6 se presenta para 2.000 °K, por lo que cerca de la corriente cero, donde se requiere rápido enfriamiento este gas es muy eficaz, ya que a esa temperatura la conductividad eléctrica es baja. En el otro lado del espectro, con corrientes muy altas, la conductividad térmica del SF_6 no es muy diferente de la correspondiente de otros gases, siendo similar el proceso de enfriamiento al que ocurre con ellos. La temperatura para la conductividad térmica máxima es de 6000 °K para el aire y 2000 °K para el SF_6 , o sea que este gas es capaz de enfriar mas rápidamente que en aire, siendo capaz de soportar mayores

tensiones mas rápidamente, en otras palabras la constante de tiempo es bastante mas corta que la del aire, en SF_6 es de $0,1 \mu s$ mientras que en aire es de $10 \mu s$. Esta constante de tiempo reducida es especialmente importante cuando se enfrentan altas velocidades de TRV, como en el caso de fallas de línea corta.

Los primeros diseños constructivos, fueron una mezcla de los tipos de aire comprimido y aceite.

La Figura 3.18 muestra el principio de operación del denominado Soplador (Puffer), donde a medida que se separan los contactos disminuye el volumen bajo el pistón y se comprime el gas.

Una precaución muy importante a tener en cuenta al usar este gas, es el riesgo de licuarse a las presiones normales de trabajo, lo que ocurre a temperaturas de menos de 13°C , que se debe evitar mediante la colocación de calefactores en los tanques de alta presión. El licuado baja la densidad del gas remanente, disminuye las características dieléctricas y produce el fenómeno de bomba de humedad, proceso que ocurre por la diferencia entre los puntos de condensación en aire y SF_6 , acumulando la humedad en las zonas frías del interruptor con el riesgo de descarga.

3.1.3.5- Interruptores en vacío

Toman la ventaja de las excepcionales características dieléctricas y capacidad de difusión del vacío, empleándolo como medio de interrupción. El poder dieléctrico del vacío se debe a la ausencia de colisiones inelásticas entre moléculas de gas, por lo cual no hay mecanismo de avalancha para disparar la perforación del dieléctrico, como ocurre en medios gaseosos.

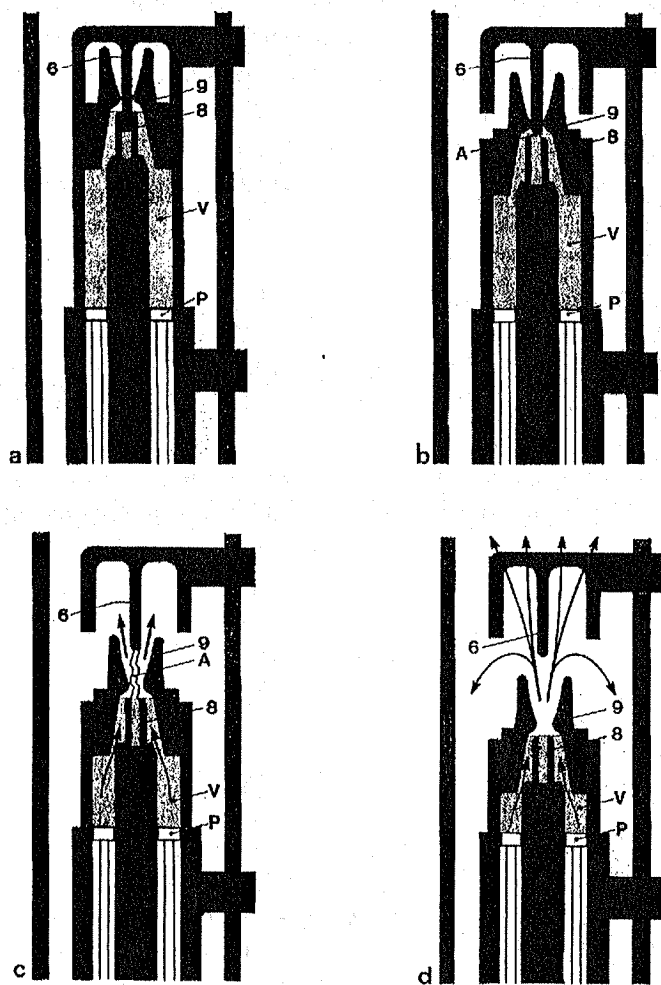


Figura 3.18

Los primeros avances se realizaron en 1926, pero hasta 1950/60 no hubo dispositivos disponibles comercialmente. Los primeros problemas técnicos estuvieron relacionados con la imposibilidad de extraer los gases atrapados en el material de los electrodos y la falta de técnicas para soldar y sellar los electrodos con los aisladores cerámicos.

En la actualidad el campo de aplicación de este tipo de interruptores va desde unos pocos kV hasta 38 kV, en tensiones mayores no pueden competir con los en SF_6 .

El proceso de interrupción es iniciado cuando los contactos se separan, seguido por la presencia de un puente de metal fundido entre ellos, el que se rompe, formando una columna de arco difusa. Este arco se caracteriza por la existencia de un numero elevado de puntos de cátodo moviéndose rápidamente, donde cada punto comparte una porción igual de corriente. Tal corriente depende del material del electrodo, para cobre se han observado valores de 100 A por punto. El arco permanece en forma difusa hasta alcanzar los 15 kA., a partir de la cual tendremos un solo punto en el ánodo, como productor de vapores el cual debido a la constante térmica del punto del ánodo continúa generando vapores en el pasaje por cero de corriente. Cuando la corriente se invierte, debido al bombardeo de iones y a la alta temperatura residual, resulta muy sencillo establecer un punto de cátodo en el previo punto de ánodo.

Durante los pasajes por cero el arco está en el modo difuso, el cual resulta fácil de extinguir, a medida que el arco procede, los contactos se separan, resultando cada vez más fácil apagar el arco largo y difuso, hasta que esto ocurre. Se han introducido varios elementos encargados de extender el tiempo en el cual el arco es difuso, uno de ellos es mediante campos magnéticos producidos por la corriente en los electrodos los cuales poseen formas especiales. Existen campos magnéticos transversales y radiales.

Campo transversal:

Se obtiene mediante el uso de contactos en espiral, como puede verse en la Figura 3.19.

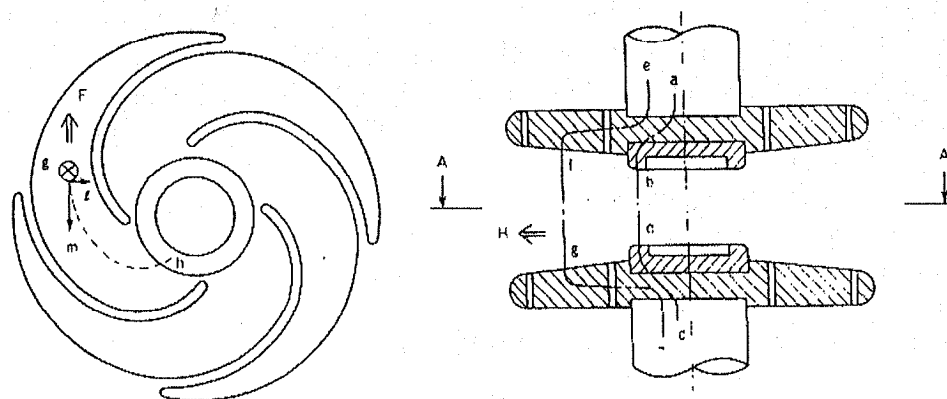


Figura 3.19

En corrientes bajas los puntos catódicos se mueven como sobre un disco plano, en cambio con corrientes altas el arco es forzado a moverse a lo largo de las espirales. Al rotar los arcos, sus raíces se mueven, reduciendo la posibilidad de formar puntos localizados, disminuyendo el calentamiento localizado de los electrodos y por ello reduciendo la emisión de vapores metálicos. Cuando alcanzan el borde se ven obligados a saltar el canal y continuar el movimiento en la otra espira.

*estos interruptores se pueden usar como
contactores.*

Campo axial:

La aplicación de un campo magnético axial reduce la tensión de arco y el ingreso de potencia desde el arco, teniendo como efecto confinar la columna del arco. Sin la presencia del campo, la difusión hace que el arco tienda a extenderse hacia afuera del espacio entre contactos, el campo produce trayectorias circunferenciales en los iones y efecto de confinamiento. Este campo se produce con una bobina externa a la botella interruptora y recorrida por la corriente a interrumpir o mediante un diseño especial de los contactos.

El vacío se puede hacer por evacuación con o sin alta temperatura, siendo preferible este último método por la pureza que se obtiene, trabajando con presiones del orden de 10^{-6} a 10^{-8} torr.

Normalmente el cuerpo es cerámico, con el contacto móvil unido a un fuelle metálico, los contactos están rodeados por un blindaje metálico para que sobre el se condensen los vapores metálicos, para evitar que el cilindro aislante se transforme en conductor.

Los materiales de los contactos deben reunir las siguientes características:

- material con presión de vapor intermedia, si es baja es propenso a cortar la corriente, si es alta tendrá dificultades para interrumpir corrientes altas por la gran cantidad de vapores remanentes en el cero de corriente.
- buena conductividad eléctrica para disminuir pérdidas en estado de régimen
- alta conductividad térmica para reducir temperatura de contactos y lograr rápido enfriamiento de los mismos luego de la interrupción de la corriente.
- alta capacidad de ruptura
- materiales que tengan baja resistencia de soldadura, o sea que si se sueldan al recerrar pueda romperse fácilmente tal soldadura por la fuerza del mecanismo de movimiento.
- alta resistencia mecánica para soportar los impactos principalmente durante los cierres.
- materiales con bajo contenido de gases y fáciles de degasificar, para que no liberen gases durante la interrupción arruinando la calidad del vacío
- a fin de evitar que el cátodo se transforme en un suministrador de electrones, se desea un material con características de baja emisión termoiónica

No hay materiales puros que brinden tales características, por lo que se recurre a metales sinterizados o aleados, los más populares hoy son cobre - bismuto (98 y 2%) y cobre - cromo (60 y 40 %). Los valores de corte de corriente para el primer material están en el orden de 3 a 15 A, siendo de 1 a 4 A para el segundo.

Con estas características constructivas, se logra insensibilidad a las altas velocidades de tensión de restablecimiento y el valor de la capacidad de recuperación a la tensión transitoria es muy superior al tipo en aire comprimido.

Todos los interruptores citados son comandados por relés, siendo estos últimos quienes fijan las curvas características o de respuesta.

3.1.3.6- Interruptores de baja tensión o tipo industrial

Los mecanismos de operación de estos dispositivos pueden ser: manuales, por motor, electroimán, o carga de resorte, en este último caso el resorte es cargado por motor o manualmente, de tal manera que una vez en tensión el cierre o apertura se produce por liberación mediante un pequeño electroimán.

La mayoría de ellos son del denominado "disparo libre", o sea si se presenta alguna falla o disturbio durante el momento de cierre, abren independientemente del movimiento de cierre.

Los contactos son normalmente compuestos, con tres juegos, uno de régimen permanente, otro de arco y por último el conductor de arco o de cuernos, de tal manera que al cerrar y al abrir el ciclo de contactos comienza de manera que los arcos no sean sufridos por el principal, para garantizar así un funcionamiento con bajas pérdidas.

El tipo clásico de interruptores posee disparos por sobrecarga (también denominado térmico), cortocircuito (llamado electromagnético) y de baja tensión (con posibilidad de ser regulado para abrir cuando la tensión está entre el 30 y el 70 %).

Principales tipos:

- Interruptores miniatura (MCB miniature circuit breakers)

Fundamentalmente es un dispositivo encapsulado en plástico, de tamaños según normas UL (mayor) y DIN (menor), con cierre y apertura manual, con disparo automático por sobrecorrientes siguiendo una característica de tipo inverso (bimetal recorrido o calentado indirectamente) y por cortocircuito con accionamiento electromagnético (regulación fija entre 6 y 8 veces la corriente nominal). Ninguna de las características de respuesta puede ser cambiadas por el usuario, están fijadas en fábrica.

En caso de necesidad polifásica, se colocan el número adecuado de polos acoplados mecánicamente. Sus características los hacen aplicables a la protección de instalaciones industriales y domiciliarias de baja potencia, como calefacción, iluminación, electrodomésticos y pequeños motores. Como poseen capacidad de ruptura reducida, de no más de 10 kA, en casos de mayor potencia son respaldados por fusibles de alta capacidad de ruptura. Frecuentemente se encuentran combinados con dispositivos diferenciales, basado en el desbalance de un toroide recorrido por las corrientes de fase (sensibilidad desde 30 mA hasta 300 mA), pudiendo encontrar unidades con las tres o cuatro protecciones incluidas.

Se los puede encontrar combinados con complejidad variable, por ejemplo conjuntamente con temporizadores, automáticos de temperatura e iluminación, economizadores, etc.

El principio de extinción del arco es normalmente en aire

- Interruptores en caja moldeada (MCCB moulded case circuit breakers)

Se trata de elementos similares a los anteriores, difiriendo fundamentalmente en el tamaño y capacidades nominales, con corrientes de hasta 2500 A, tensión hasta 1200 V, capacidades de interrupción de 50 kA o mayores. Son fundamentalmente polifásicos, con regulación de los niveles de actuación por sobrecorriente, cortocircuito y sub-tensión. Algunos de ellos ya tienen incluidos relés del tipo microprocesado, lo que da una increíble versatilidad. La extinción es usualmente en aire.

- Interruptores en aceite (OCB)

Son de características similares a los ya vistos como de reducido volumen de aceite, su única diferencia es el tamaño pequeño, ya que sus tensiones de trabajo no superan los 3,3 kV.

- Interruptores en vacío (VCB)

Este elemento ha reemplazado a los dos tipos citados previamente, sus tensiones de trabajo van desde 1000 V hasta 3300 V, siendo prácticamente una extensión del empleado en tensiones de distribución hacia aplicaciones industriales. Los accionamientos por sobrecarga, cortocircuito, etc. son provistos por relés externos independientes.

- Interruptores diferenciales

Son dispositivos fundamentalmente dedicados a la detección de las corrientes de fuga, siendo capaces de reaccionar frente a valores de falla tan pequeños como 10 mA. Se los emplea mayormente en las instalaciones de baja tensión para la protección de personas. Si el mecanismo de actuación y el detector de fuga están en el mismo elemento, reciben el nombre de interruptor diferencial, en caso de corrientes de carga elevadas, ambas funciones se encuentran separadas, actuando el relé diferencial sobre el disparo indirecto de un interruptor automático. El elemento sensible es usualmente un núcleo toroidal de material ferromagnético, atravesado por todos los conductores activos del circuito, donde aparecerá un flujo inducido cuando la suma de las corrientes es distinta de cero.

Las características nominales de los mismos son similares a la de los interruptores ya citados, o sea corriente nominal, tensión nominal, capacidad de interrupción y con el agregado de la sensibilidad y la corriente nominal de no-funcionamiento. La sensibilidad es la corriente que provoca la actuación por intensidad de fuga, que puede ser entre 10 y 30 mA los denominados de alta sensibilidad, y los de baja que actúan recién para corrientes desde 300 mA a 500 mA. Existen dispositivos especiales, con sensibilidades que alcanzan a 1 mA, cuya aplicación es por ejemplo para salas de operaciones, baños termales, etc.

Los dispositivos de alta sensibilidad son realmente para protección personal, en cambio los regulados en 300 mA no son capaces de evitar el mencionado riesgo, siendo su aplicación la protección de equipos contra daños mayores e incendios. En una instalación con baja tensión 220/380V, y sensibilidad en 300 mA, se permiten potencias de fuga de solo 6,6 W, valor insuficiente para provocar ignición, por lo que el riesgo de incendio desaparece. La protección contra incendios originados en cortocircuitos queda en manos de los interruptores automáticos o fusibles.

La corriente nominal de no-funcionamiento es usualmente el 50 % de la intensidad que determina la sensibilidad. Es importante destacar que por su aplicación prácticamente a circuitos de baja carga, su capacidad de interrupción es muy pequeña, usualmente entre 1 y 1,5 kA, siendo necesario el uso de protección de respaldo con interruptores automáticos o fusibles, cuando se emplea en lugares con corrientes de falla elevadas.

Las características de disparo se muestran en la Figura 3.20, donde pueden verse las curvas para sensibilidades de 10, 30 y 300 mA, con tiempos mínimos de disparo de aproximadamente 30 ms.

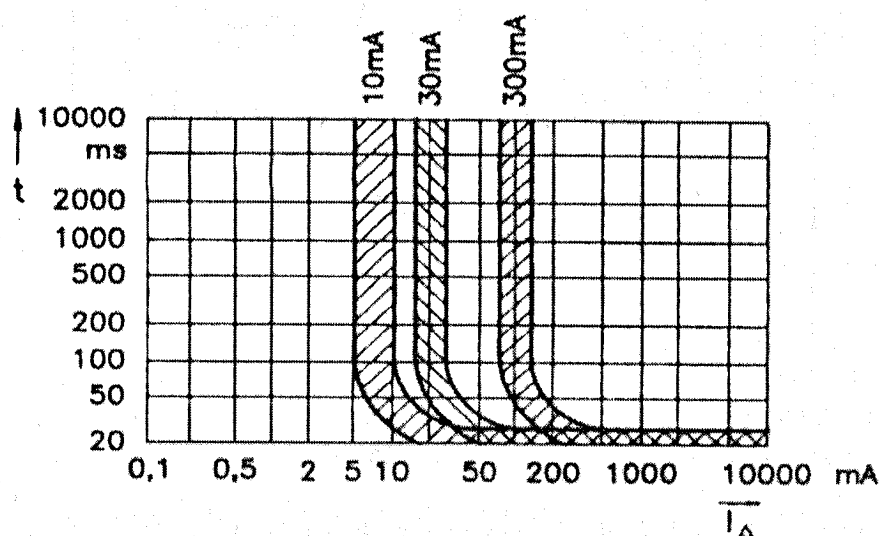


Figura 3.20

En casos donde es necesario garantizar coordinación selectiva entre distintos dispositivos diferenciales, se puede agregar un retardo de operación, para mantener márgenes aún para corrientes altas. Los retardos son del orden de los 50 ms.

La razón de la forma de la curva característica corriente-tiempo radica en la sensibilidad del cuerpo humano, según la especificación 64 de la IEC, la cual se muestra en la Figura 3.21, donde las diversas zonas indican los siguientes efectos sobre el ser humano:

- zona 1: sin percepción del paso de la corriente
- zona 2: limitada por una curva de intensidad en función del tiempo, considerada como el límite inferior de la corriente peligrosa desde el punto de vista fisiopatológico. Con intensidades mayores se presenta la crispación muscular o imposibilidad de dominar la tetanización.
- zona 3: la curva superior muestra la posibilidad menor al 0,5 % de fibrilación cardíaca.
- zona 4: riesgo de fibrilación cardíaca entre el 0,5 y el 50 %.
- zona 5: el paso de la corriente representa riesgo de muerte.

La necesidad de protección contra contacto eléctrico está directamente relacionada con la tensión aplicada, y por ello los valores de voltaje de contacto al que puede estar sometido el ser humano. Tal tensión al ser aplicada a la persona, provoca la circulación de una corriente que depende de la resistencia del cuerpo, la cual resulta sumamente variable entre las personas y las circunstancias, por lo que se prefiere hablar de voltajes máximos accesibles.

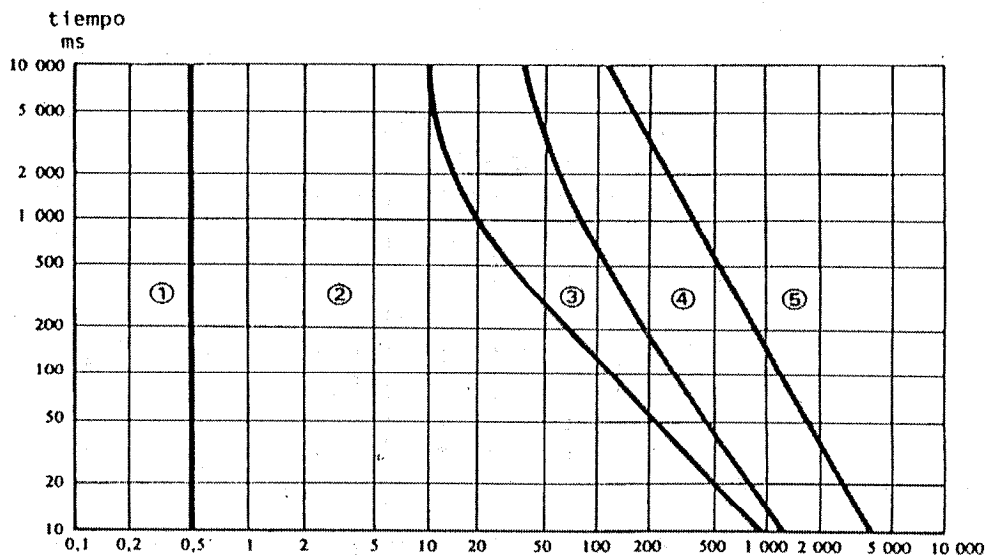
Los valores convencionales son:

- tensión máxima convencional: valor máximo permanente de la tensión, que en las normas IEC 364 se especifica como 50 V.

- 1) No percepción
- 2) Límite peligro
- 3) Pos. de Fibrilación 0,5%

- 4) Pos. L. F.L. = 50%
- 5) Riesg. Muerte.

III-30



Efectos de la corriente alterna 50/60 HZ sobre personas adultas según edición 1974 de la publicación 479 elaborada por la comisión de estudios n° 64 de la CEI

Figura 3.21

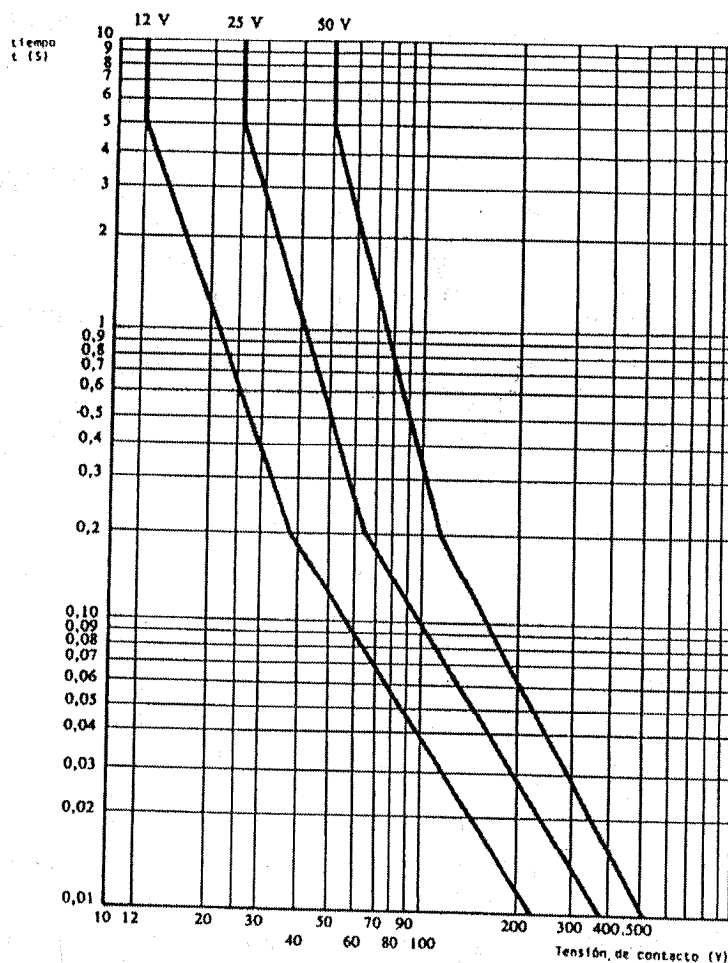
- curva de seguridad: tiempo máximo durante el cual puede ser soportada una tensión sin riesgo personal, la que se muestra en la Figura 3.22.
- para condiciones más severas como con piel mojada, 25 V y para piel sumergida en agua 12 V, con curvas diferentes, que también se muestran en la citada figura.

En la Tabla 3.1 de la IEC 364, se muestran los valores de resistencia del cuerpo humano en función de la tensión y condiciones, correspondiendo las columnas 2 y 3 al caso de contacto mano y los dos pies, siendo la 4 y 5 para contacto de las dos manos y dos pies.

Tabla 3.1: Resistencias de contacto

Tensión de contacto	Piel seca	Piel húmeda	Piel mojada	Piel sumergida
V	ohms	ohms	ohms	ohms
10	6500	3200	1200	500
25	5000	2500	1000	400
50	4000	2000	875	300
100	2200	1500	730	260
250	1000	1000	650	200

Pueden encontrarse dispositivos diferenciales para corriente continua, siendo imprescindible la existencia de ripple en las ondas de corriente para en base a las diferencias entre ellas lograr la detección, por lo que sistemas de c.c. con alimentación mediante un generador o baterías no permiten detección de corrientes de fuga.

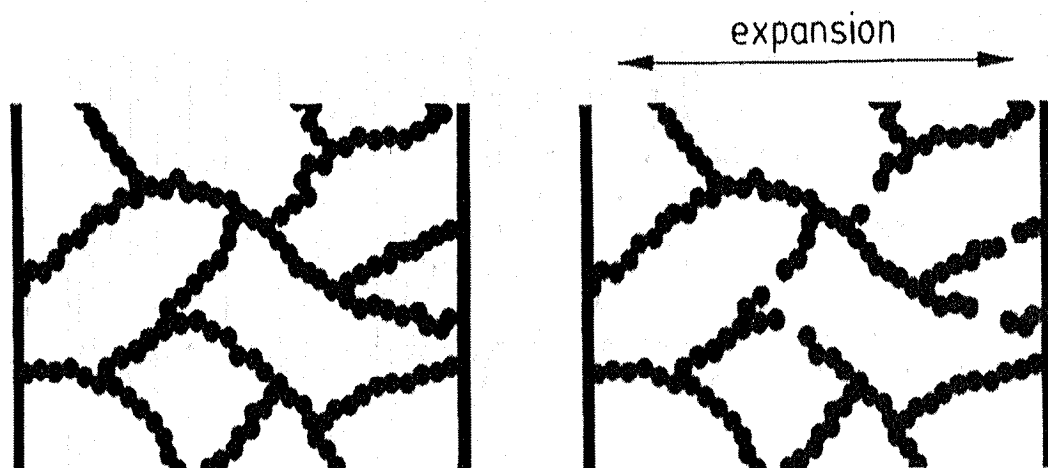


curvas de seguridad para tensiones alternas
según CEI 364

Figura 3.22

- Interruptores limitadores (poliméricos)

Existen materiales, los cuales presentan una resistencia muy elevada y que aún se sigue incrementando, cuando se ha superado un cierto valor de umbral de temperatura. A pesar de su diferencia estructural y de naturaleza física, se comportan similarmente a los semiconductores cuando su temperatura crítica se ha alcanzado. Desde hace bastante tiempo se conocen materiales con tales características, como son las cerámicas de Ba Ti O_3 y las de $\text{V}_2 \text{O}_3$, los cuales poseen coeficientes positivos de variación de la resistencia con la temperatura. En los últimos años han aparecido polímeros conductores, los cuales presentan considerable aceptación en la industria, presentados por Raychem y ABB. Tales polímeros consisten en polietileno relleno con partículas conductoras especialmente carbón y negro de humo. Como se muestra en la Figura 3.23, las partículas de relleno forman puentes de baja resistividad cuando se encuentran en condiciones normales de carga. Cuando se supera la temperatura de fusión de los cristales, aproximadamente 125°C , la matriz polimérica se expande, rompiendo los puentes, incrementándose la resistencia en varios órdenes de magnitud. El proceso mencionado es reversible, permitiendo el diseño de interruptores que limitan la corriente, los cuales actúan como fusibles permanentes. La variación de resistividad con la temperatura se muestra en la Figura 3.24.



a- Cadenas a temperatura ambiente b- Disrupción debida a la expansión por calor

Figura 3.23

Tales limitadores se encuentran a la fecha disponibles en combinación con resistencias en paralelo (absorben energía) e interruptores automáticos.

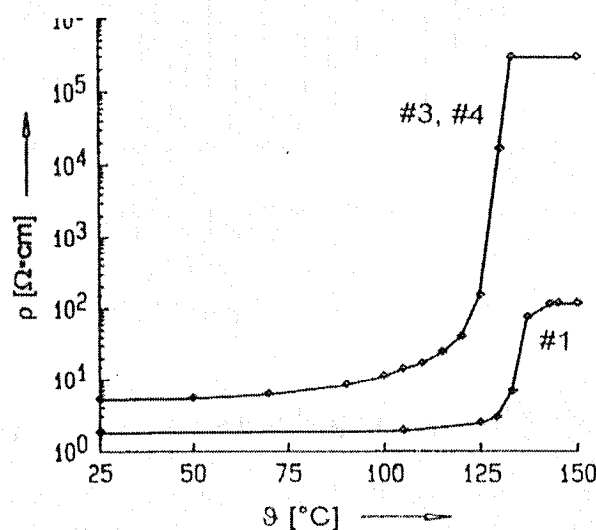


Figura 3.24

Compatibilidad electromagnética e interruptores de baja tensión:

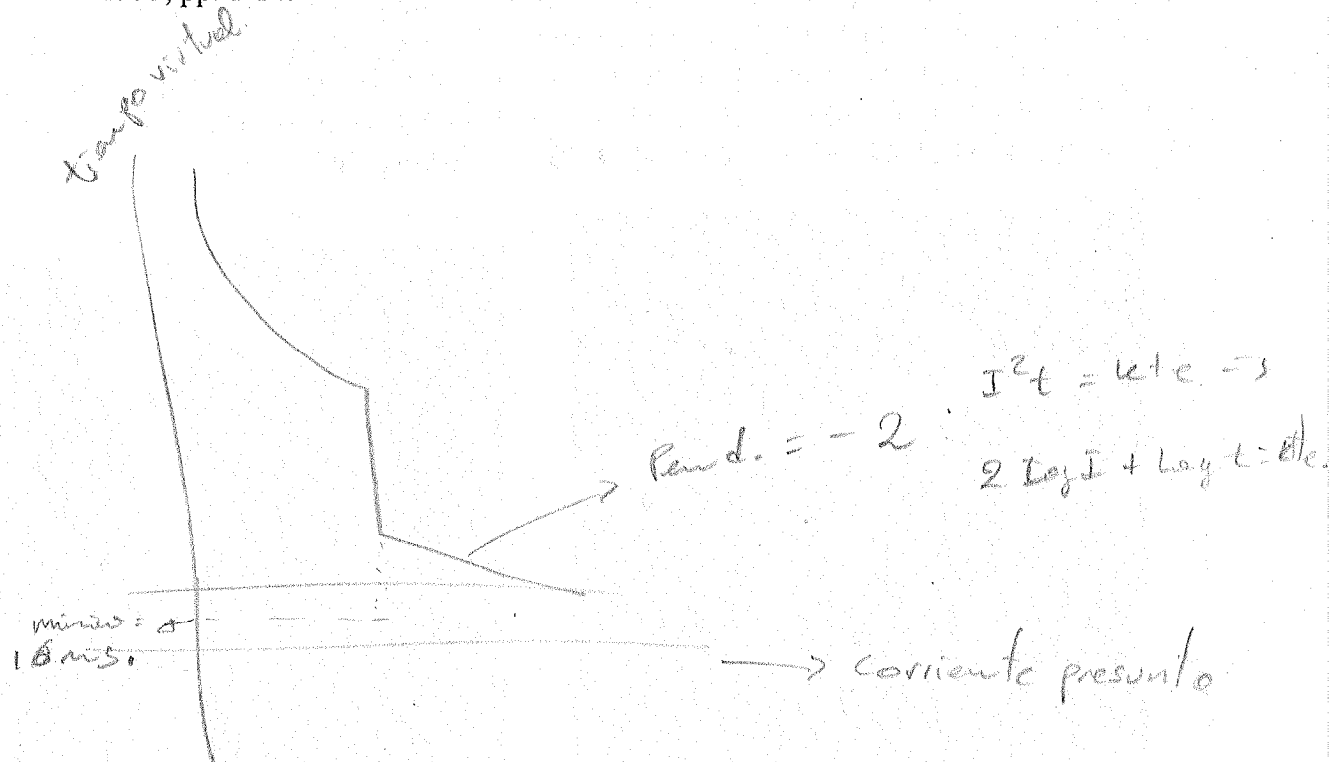
A la fecha ya existen varias normas que especifican la compatibilidad electromagnética de equipos e instalaciones, encontrándose numerosos países en la redacción de sus propias especificaciones, especialmente para los sistemas de baja tensión.

La compatibilidad electromagnética tiene en cuenta que los equipos no deben ser afectados por la operación de otros, ni debe afectar a otros por su operación. La interferencia electromagnética (IEM) es la razón de la necesidad de compatibilidad electromagnética (CEM).

El estudio es diferente según se trate de dispositivos con accionamiento electrónico o electromecánico, siendo en estos últimos solo importante las perturbaciones debidas a las sobretensiones de maniobra. En cambio para los primeros existen problemas cada vez mayores con la amplia difusión de equipamiento electrónico que contamina la red.

Bibliografía:

- [1]- Garzon, Ruben D.; High Voltage Circuit Breakers, design and applications; Marcel Dekker Inc.; New York 1996.
- [2]- GEC ALSTHOM, T & D; Protective Relays, Application Guide; Balding + Mansell, Third Edition, 1995, London.
- [3]- Cohen, Viv; EMC Beyond 1996; II Congreso Latinoamericano de Distribución de Energía Eléctrica, Viña del Mar, Chile, Octubre 1996.
- [4]- Lindmayer, M., Schubert, M.; Current limitation by high temperature superconductors and by conducting polymers; V ICEFA, Ilmenau, Germany, September 1995, pp. 1-14.



t_{pa} → tiempo de pre arco (no dep. de la tensión)
es el tiempo hasta que empiezan a separar los arcos.

$$t_v = \frac{\int i^2 dt}{I_f^2}$$

corriente presunta

5 seg. es el tiempo
para el cual un cable
se supone con
un portamiento
adiólato.

3.2- Fusibles

El fusible es uno de los dispositivos de protección más antiguos, conociéndose los primeros diseños desde fines del siglo pasado. La clave de la permanencia se basa en la elevada confiabilidad de operación debida a su simplicidad, como así mismo a su versatilidad que le ha permitido adaptarse a requerimientos muy variados. La producción de fusibles a nivel mundial alcanza a varias decenas de millones, consumiendo nuestro país un monto de alrededor de 500.000 unidades de distintos tipos. En la actualidad se dispone de fusibles muy específicos con características de respuesta particulares, extendiendo su aplicación desde algunos mA hasta 4 kA de corriente nominal, tensiones nominales a partir de algunos volts hasta 132 kV y capacidades de ruptura desde 35 A hasta 200 kA. En lo referente a la aplicación para la protección de sistemas de distribución, podemos citar fundamentalmente los tipos de alta tensión y de baja tensión, cada uno de los cuales se dividen a su vez en alta y baja capacidad de ruptura. Figura 3.25.

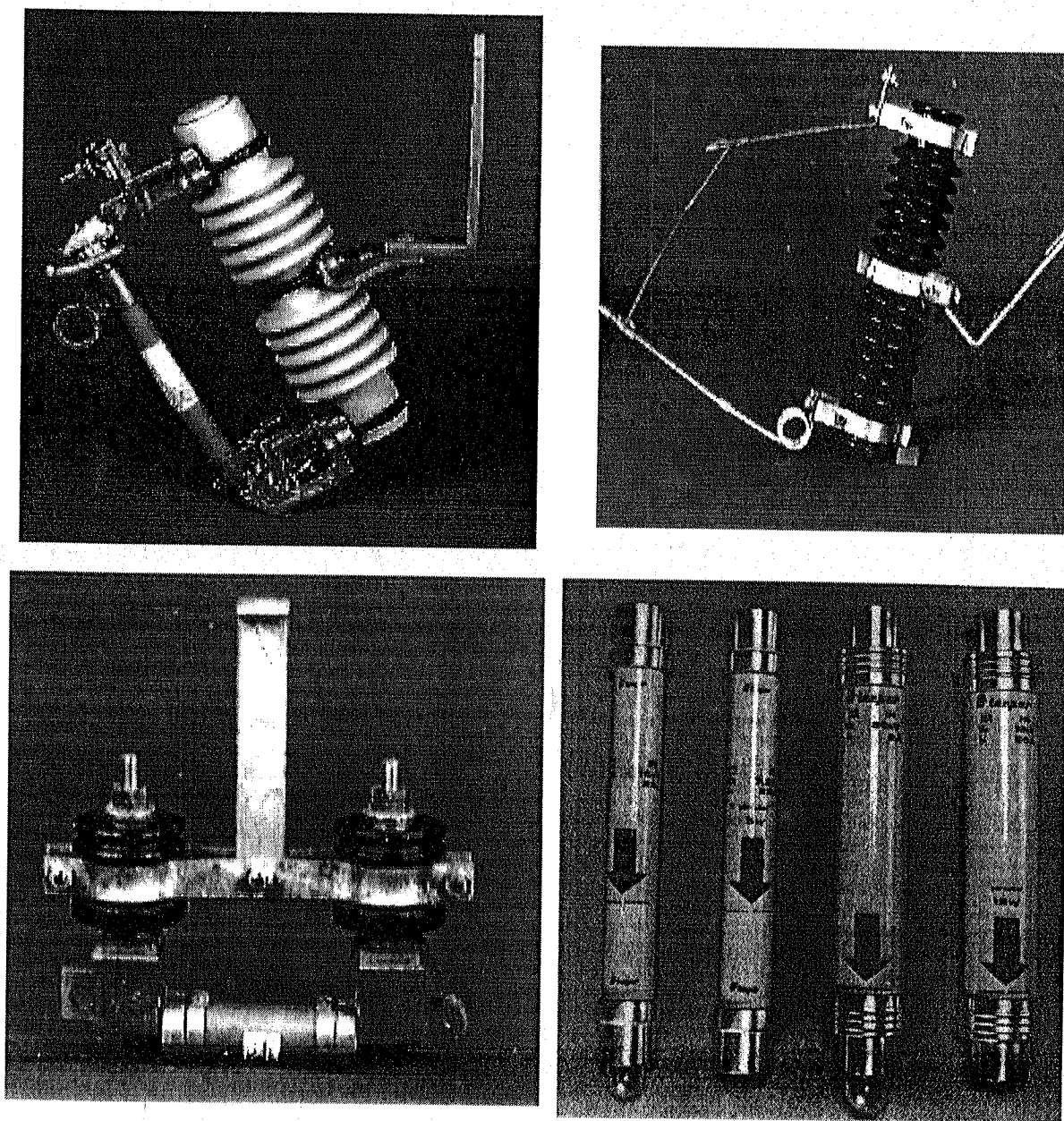


Figura 3.25

3.2.1- Fusibles de alta tensión

3.2.1.1- Alta capacidad de ruptura:

Tales fusibles provienen de los años cuarenta, se denominan normalmente como HH, nombre derivado de sus iniciales en idioma alemán, Hochspannung Hochleistung, responden a las normas IEC 282-1 y fundamentalmente a las DIN 43625 -VDE 0670, estando normalizadas sus características constructivas y de respuesta.

Se trata de un cuerpo cerámico de alta resistencia al choque térmico, con contactos extremos cilíndricos de cobre plateado, rellenos con arena de cuarzo de alta pureza y contando con varios elementos fusibles de plata con reducciones de sección. Poseen, además un percutor ubicado en el extremo superior, cuya función no es solo de indicación sino también es capaz de realizar trabajo mecánico, abriendo un seccionador bajo carga. El diámetro y extensión del contacto están fijados en 45 mm y 33 mm respectivamente, siendo variable el largo del fusible según la tensión nominal, encontrándose normalizados las siguientes longitudes de cuerpo: 192 mm, 292 mm, 367 mm, 442 mm y 537 mm.

Las corrientes nominales van desde 0,5 A hasta 400 A y tensiones desde 2,3 kV hasta 36 kV. Existen algunos diseños en 66 kV, pero para corrientes nominales no mayores a 63 A.

Su capacidad de ruptura máxima es de 900 MVA, disponiendo de modelos intermedios con 300 y 600 MVA. Al operar en forma cerrada, conteniendo en su interior todos los productos de la extinción, sin tener manifestación externa alguna, puede ser instalado en gabinetes o tableros, existiendo además un diseño algo más complejo, para su uso a la intemperie.

Según su capacidad de ruptura se dividen en Respaldo (backup), Propósito General (general purpose) y Campo Completo (full range), cuyas capacidades de ruptura se extienden desde el máximo fijado por el fabricante hasta el mínimo definido respectivamente de la siguiente forma:

- Respaldo: por el fabricante
- Propósito general: corriente que lo funde en una hora
- Campo completo: cualquier corriente capaz de provocar su fusión.

Sus características operativas son de alta velocidad, control de corriente de cresta y generación de sobretensión.

Existe un tipo especial de fusible de media tensión, con corrientes nominales del orden del Ampere, para ser aplicados a la protección de transformadores de tensión, cuyas dimensiones no siguen los lineamientos citados. Tales elementos poseen dos longitudes, adecuadas a 13,2 kV (serie de 20 kV) y 7,6 kV (serie de 10 kV).

3.2.1.2- Expulsión

Sus tensiones nominales alcanzan los 132 kV, con corrientes desde 0,5 A hasta 150/200 A, se encuentran especificados en las Normas ANSI-IEEE C37-41 y en las IRAM, se denominan usualmente por la marca del fabricante, como por ejemplo Kearney, Chance, X&S, o por la nomenclatura AyEE que los llama MN 241.

Constructivamente están formados por un tubo de papel prespan, dentro del cual se coloca el hilo o lámina fusible. El elemento fusible que se encuentra tensionado por el resorte inferior, es normalmente de plata, en caso de corrientes bajas posee otro elemento en paralelo que le brinda resistencia mecánica, como un hilo de acero o Nicrome. Todo el conjunto interior, denominado eslabón fusible, debe ser reemplazado luego de operar. Este conjunto se encuentra ubicado dentro del denominado tubo portafusible, que brinda las conexiones externas y facilita la interrupción. Normalmente son del tipo de caída, por lo que al operar se sueltan de su contacto superior, pivotando sobre el inferior, permaneciendo luego colgados de este último, brindando una muy buena indicación de la ubicación de la

falla. Si por alguna causa el fusible no cae, no será capaz de interrumpir la falla, provocando su explosión, ya que no pueden cortar la corriente subsiguiente. Tal corriente es la que continúa circulando luego de la atenuación del arco, hasta la interrupción definitiva en alguno de los pasajes por cero próximos.

Su capacidad de ruptura está definida en conjunto por el elemento fusible y el tubo porta fusible, ya que este último también genera gases extintores, fundamentalmente cuando las corrientes de falla son muy elevadas como para que el arco supere la barrera del elemento fusible. De tal manera que ambos elementos son fundamentales si se desea una operación confiable.

Se dispone de un tipo de bajo costo, denominado ballesta que no emplea porta fusible, sino que se lo coloca directamente sobre el aislador soporte, sostenido por dos contactos elásticos. El elemento posee dos aros en los extremos, para su manejo con pértiga.

En general podemos afirmar que las capacidades de ruptura máximas alcanzan:

1,2 kA fusible tipo ballesta.

2 kA fusible normal de expulsión

12 kA fusible expulsión con porta fusible impregnado con sustancias generadoras de gases.

En referencia a su característica de respuesta, las Normas especifican dos velocidades, denominadas K (rápido) y T (lento). En catálogos de fabricantes pueden encontrarse varias velocidades intermedias, incluso existen unos específicos para proteger transformadores de distribución, con curva doble, o sea rápida para elevadas corrientes y lenta para sobrecargas, comercialmente se denominan slow-fast y quick-fast, los estudiaremos en mayor detalle mas adelante.

Existe otro tipo denominado explosivo, muy difundido entre las Cooperativas Eléctricas, cuya operación se basa en la deflagración de pólvora ubicada en la cámara del elemento fusible. Tales dispositivos poseen una capacidad de ruptura y curvas características muy inconsistentes por problemas de humedad en la carga y, además, es muy frecuente que su explosión sea radial en lugar de la axial esperada, con lo que el porta fusible queda trabado dentro del tubo con la consecuencia de que el seccionador no cae, con los inconvenientes ya mencionados. Su utilización no es aconsejable.

Otro de los inconvenientes del fusible de expulsión es la existencia de numerosos fabricantes con muy poco o nulo conocimiento sobre lo que están produciendo, por lo que es de fundamental importancia la disponibilidad de especificaciones de compra claras y un estricto control de calidad en la recepción.

3.2.2- Fusibles de baja tensión

3.2.2.1- Alta capacidad de ruptura:

En nuestro país los más difundidos de este tipo son los denominados APR o NH (siglas del nombre alemán Niederspannung Hochleistung), están especificados en IEC 269 y VDE 0636 -DIN 43620. Se encuentran en 7 tamaños, identificados por 00, 0, 1, 2, 3, 4 y 4a, con corrientes nominales crecientes, disponiendo de una importante superposición de tamaños en las corrientes nominales mayor y menor de cada uno. La tensión es de 500 V y sus corrientes van desde 6 A hasta 1600 A, su capacidad de ruptura es de 100 kA.

También existen los tipos D y D0 para aplicaciones de menor potencia y corriente que los NH, con tensiones nominales 500 y 380V respectivamente, con corrientes variables según el tipo, desde 4A hasta 200A para el D y hasta 100A para el D0. Los D y D0 poseen tamaños DI, DII, DIII, DIV, DV y D01, D02, D03. La diferencia fundamental entre el NH y el D / D0 se refiere a la seguridad personal brindada al operador, los primeros son para ser usados por personal habilitado, en cambio los segundos ofrecen protección contra contactos permitiendo su utilización por parte de personas inexpertas. Los distintos

tamaños y subtipos poseen corrientes nominales superpuestas en los extremos, para facilitar el reemplazo y permitir el crecimiento del sistema y de las cargas.

Las características de respuesta dependen de la clase, la cual está definida por una pareja de letras. La primera es "a" o "g", la segunda letra puede ser R, L, Tr, B o M. El significado de la primera letra está relacionado con la capacidad mínima de interrupción, los individualizados con la letra g, son capaces de interrumpir cualquier corriente que lo funda, comenzando a partir de 1,25 o 1,3 veces la intensidad nominal. Los que poseen la característica a, son mas veloces que los g, pero en contrapartida solo pueden interrumpir corrientes a partir de un mínimo especificado por el fabricante, normalmente entre 4 y 6 veces la nominal. La segunda letra está directamente relacionada con la aplicación.

Las combinaciones más difundidas, en orden de uso son:

- gL: adecuada para proteger líneas y aparatos en general, contra sobrecargas y cortocircuitos (en la norma IEC 269 se la denomina gG, pero ambas clases son equivalentes).
- gTr: diseñado exclusivamente para la protección de transformadores de distribución, a tal punto que su tensión es de 400 V (no los 500 V usuales) y su carga nominal se expresa en kVA (en vez de A).
- aM: aplicable a la protección de motores asíncronos o de inducción. No son capaces de interrumpir corrientes menores a 7 veces la nominal. Sus curvas características poseen formas especiales para soportar los transitorios de arranque sin desmedro de la velocidad de operación frente a rigurosos cortocircuitos.
- aR: diseñados para proteger semiconductores de potencia, por lo que son de altísima velocidad, e insensibles a las sobrecargas.
- gR: similares a los anteriores, pero ahora con extensión de la capacidad de interrupción a valores tan bajos como 1,6 veces la nominal.
- gM: análogos a los aM, pero con dimensionamiento especial que los habilita a cortar sobrecorrientes leves de considerable duración, sin disminuir la insensibilidad a las corrientes de arranque.
- gB: aplicables a la protección de instalaciones mineras, donde se exigen requisitos especiales en lo que respecta a tensiones y manifestación externa del arco, por el riesgo de explosiones.

3.2.2.2- Baja capacidad de ruptura:

En esta categoría se incluyen los fusibles abiertos o semi-cerrados, que en los sistemas de distribución se los llama tipo Lira y MN 233/234 (nomenclatura AyEE). La tensión nominal es 380V, corrientes entre 10 A y 400 A, capacidades de interrupción no mayores 2,5 a 5 kA. Existen otros tipos de aplicación domiciliaria como los antiguos "tabaquera", todavía en uso y los mal denominados americanos bastante difundidos en circuitos industriales, ambos sin control alguno del apagado del arco, por lo cual su uso es desaconsejable.

Todos ellos pueden ser reparados, el operador puede reemplazar el elemento fusible quemado por uno similar nuevo o por un conductor cualquiera. Presentan numerosos inconvenientes, entre los cuales podemos citar:

- operación violenta en caso de fallas importantes, con expulsión de material fundido, con el consiguiente riesgo de incendio y peligro a equipos y personas.
- curva característica inexistente: al ser fácilmente reparable, el elemento fusible puede ser reemplazado por una hebra de cobre, aluminio y aún de hierro, de cualquier sección.

- deficiencias de contacto: lo que hace que su operación puede producirse en forma descontrolada.
- muy sensible al envejecimiento: recibiendo este nombre el fenómeno por el cual un conductor va perdiendo su capacidad conductora por disminución de la sección y por recubrimiento con una capa aislante térmica. Este proceso comienza cuando el conductor en contacto con la atmósfera supera temperaturas del orden de $100 / 150^{\circ}\text{C}$, iniciándose la oxidación por la humedad ambiental, formando una camisa aislante que le impide la extracción del calor en forma radial, disminuyendo la sección conductora, elevando aún más la temperatura y así sucesivamente hasta que se produce la fusión. En los fusibles ACR este proceso de envejecimiento se controla con reducción de temperatura de trabajo, uso de material de relleno y el aislamiento del ambiente.

3.2.3- Principio de funcionamiento

Para el estudio del principio de operación resulta conveniente dividirlos en tres categorías, de alta capacidad de interrupción o también llamado limitador de la corriente de falla, del tipo de expulsión y abiertos o sin control de arco.

3.2.3.1- Limitador de corriente de falla

Para el estudio de la operación del fusible ACR, consideraremos al campo de actuación dividido en tres zonas:

- Régimen nominal: Primeramente definiremos régimen nominal como las condiciones de funcionamiento del fusible sin límite de tiempo, sin que la temperatura de ninguna de sus partes supere valores prefijados y sin que se produzca efecto alguno sobre el elemento que lo aparte de su respuesta tiempo - corriente. En esta zona debemos diferenciar los fusibles en base al material del elemento, ya que los límites de trabajo entre usar plata y cobre son totalmente distintos.

En principio podríamos suponer que si la temperatura de trabajo del punto más caliente del elemento no se aproxima a la correspondiente de fusión, no se producirá alteración alguna, lo que no es válido debido al fenómeno de oxidación. El elemento de plata forma un óxido inestable que alcanza rápidamente la saturación. En cambio, el cobre establece un óxido que envuelve al conductor iniciando el **envejecimiento**, que impide a los fusibles de cobre a trabajar con temperaturas máximas superiores a los 150°C . Debe tenerse en cuenta que el régimen nominal se define para condiciones normalizadas en lo que se refiere a temperatura ambiente de 20°C y libre circulación de aire, si el elemento se encuentra instalado por ejemplo en un gabinete o cámara donde la refrigeración es distinta, la corriente nominal debe ser disminuida.

- Sobrecarga: De no existir ningún elemento auxiliar agregado, nada impide al fusible a trabajar con temperaturas próximas a la de fusión, 960°C y 1083°C , para plata y cobre respectivamente. Estas altas temperaturas interiores provocan valores excesivos sobre el cuerpo aislante y los terminales, y lo que es aún peor, dificultan sobremanera la extinción definitiva de la corriente de falla. La solución a tal problema se logró con la incorporación del denominado efecto M, que consiste en una aleación de bajo punto de fusión ubicada en el centro del elemento, sobre el metal base, cobre o plata, la cual permanece inactiva hasta que una sobrecarga eleva la temperatura hasta su valor de fusión. Tal aleación, dependiendo de los materiales involucrados y sus porcentajes, funde con temperaturas de 140 a 300°C . Una vez alcanzado el estado líquido comienza un proceso de disolución de la lámina base, disminuyendo su sección conductora y su temperatura de fusión, con lo que se produce un proceso acumulativo que conduce a la fusión total, cuyo tiempo es función inversa de la intensidad de corriente. De esta manera se logra la iniciación del arco eléctrico con corrientes del orden de 1,4 veces la intensidad nominal, sin que el fusible

completo esté a temperaturas que comprometan la extinción. El salto térmico existente entre el arco y el material de relleno es suficientemente alto como para obtener un flujo de calor adecuado para lograr la desionización requerida para la interrupción. Este arco se extenderá hacia los extremos del fusible, hasta que su longitud y refrigeración genere un poder dieléctrico suficiente para soportar la tensión de restablecimiento del sistema, iniciándose el proceso de interrupción, el cual tomará varios ciclos hasta su apagado definitivo. El proceso se muestra en la Figura 3.26.

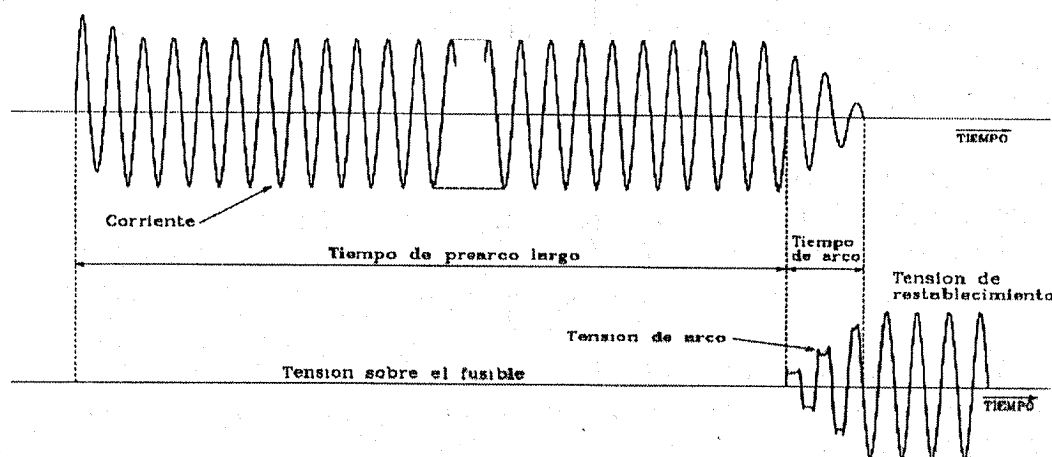


Figura 3.26

- Cortocircuito: Si las corrientes de falla son elevadas, la generación de calor se produce prácticamente en forma uniforme a lo largo de todo el elemento, alcanzando la fusión en varias partes, especialmente aquellas reducciones de sección practicadas a tal fin. El arco se establece dentro de una cámara, fabricada por el mismo arco por vaporización del material de relleno. Los vapores así formados mas los homólogos metálicos provenientes del elemento fusible son expulsados hacia el relleno, pasando a través de los intersticios dejados por los granos de arena. El material líquido es presionado hacia la pared interior de la cámara, logrando así un aumento de presión con lo que se mejora el poder dieléctrico. La citada pared al mismo tiempo tiene como función estabilizar el arco mediante enfriamiento por conducción. Este proceso continúa hasta que la cantidad de calor extraída supera a la generada, con lo que se comienza a enfriar el arco, hasta lograr su extinción definitiva. La generación de los arcos se produce a una elevada velocidad, proporcional a la intensidad de corriente de falla, lo que agregado al número de arcos individuales, hace que se supere largamente la tensión del sistema, tendiendo a la inversión de la pendiente de la corriente, impidiendo se alcance la cresta, forzándola a cero antes del pasaje natural. El proceso detallado controla la cantidad de energía que es liberada en el equipo bajo falla, por lo tanto disminuye su deterioro y evita la explosión, sin el consiguiente riesgo al personal y bienes. Este proceso se denomina limitación de la corriente de cortocircuito, siendo una propiedad de los fusibles A.C.R. que los hace inigualables en comparación con los otros tipos de dispositivos de protección disponibles. Ver figura 3.27.

3.2.3.2- Expulsión

Igualmente su estudio se puede dividir en tres partes, régimen nominal, sobrecarga y cortocircuito.

El primero de ellos es simplemente válido para corrientes cuya generación de calor en el elemento se encuentre dentro de su capacidad de extracción por convección y conducción.

La única consideración que no debemos olvidar es el tema del envejecimiento, que aquí se debe a un fenómeno diferente ya que no empleamos conductor de cobre sino de plata.

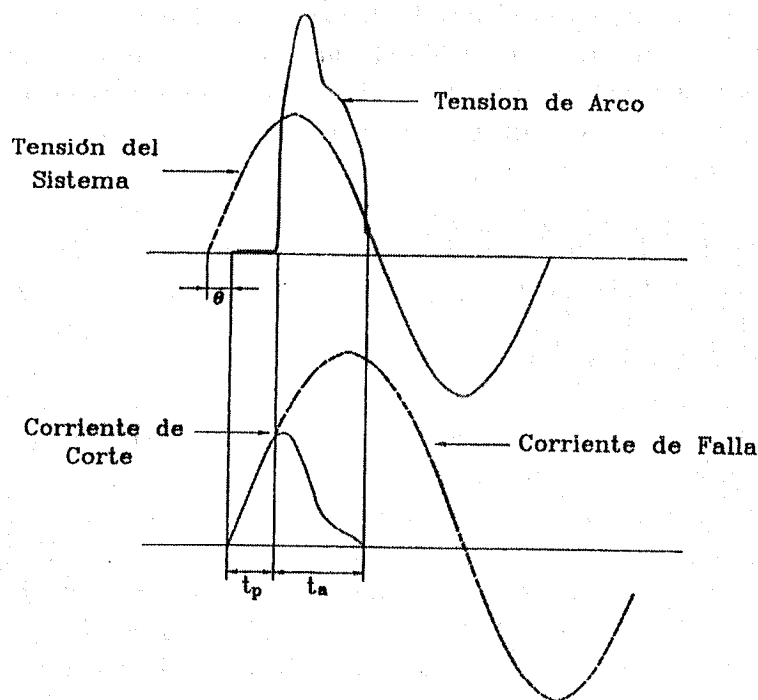


Figura 3.27

Por las corrientes nominales usadas es necesario emplear conductores fusibles de tamaño reducido lo que agregado a la elevada tensión de trabajo puede producir el efecto "corona", que lo erosiona disminuyendo su sección conductora, conduciéndolo al debilitamiento mecánico que permite su rotura por parte del tiro del resorte inferior del portafusible. Este fenómeno se controla mediante el aumento artificial del diámetro o dimensiones del elemento, por montaje en forma helicoidal o rodeándolo con una campana de control.

En presencia de una corriente de sobrecarga, el balance entre los calores no puede ser mantenido, elevando la temperatura del conductor fusible, hasta que su debilitamiento mecánico permite el corte por parte del tiro del resorte. O sea, que el elemento no funde sino se corta mecánicamente. Una vez interrumpido el camino sólido, se establece el arco eléctrico entre los electrodos que se están separando debido al resorte y al efecto pistón del contacto dentro del tubo. Este desplazamiento se debe a la generación de gases desde la pared del tubo aislante que está impregnado con resinas fenólicas, que los produce cuando sobre él incide el arco, haciéndolo a una velocidad proporcional a la energía del arco, además, estos gases son sumamente extintores, muy electronegativos. La suma de la elongación y la desionización produce un aplastamiento de la corriente en la zona de los pasajes naturales por cero, que agregado a la desconexión del borne superior logra la interrupción definitiva. Se puede deducir que si la interrupción interna no es satisfactoria, el contacto superior en aire puede verse obligado a una interrupción mayor a su capacidad, lo que lo daña (pica) y mantiene el arco hasta que las condiciones atmosféricas permitan su apagado o se transfiera al perno del aislador y de allí a tierra, manteniéndose hasta que la protección aguas arriba actúe. Si el mecanismo de caída está trabado, el fusible no cae y simplemente no interrumpe, quemando todo el tubo porta fusible y derivando la falla.

La operación en caso de cortocircuito es similar a la frente a sobrecarga, pero magnificada. La corriente vaporiza al elemento, se establece un arco violento, la generación de gases del

tubo interior no es suficiente, por lo que se destruye permitiendo al arco incidir sobre el tubo porta fusible, con mayor generación. El tubo exterior encierra al arco en un espacio reducido por lo que la sobrepresión mejora el poder dieléctrico, conduciendo a la interrupción final en el contacto superior, ya con una corriente muy atenuada. El efecto de pistón citado previamente es fundamental en este caso, conjuntamente con la disponibilidad de un porta fusible que realmente colabore en el apagado. La explicación dada pone de manifiesto que el tubo porta fusible fue erosionado, gastando algo de su substancia generadora de gases, por lo cual su vida útil ha sido disminuida. Contrariamente o lo que muchos creen el porta fusible debe ser reemplazado luego de una serie de operaciones, no es suficiente con limpiarlo. Tal información es dada en las normas, donde indican el número de operaciones en función de la corriente y del X/R de tal intensidad.

3.2.3.3- Abiertos o sin control de arco.

Los fusibles de baja tensión, no limitadores, de baja capacidad de ruptura o abiertos, presentan un proceso de operación de prearco similar a los explicados en el punto anterior, pudiendo tener incluso el efecto M y usar láminas con reducciones de sección. La diferencia surge cuando se inicia el arco eléctrico, ya que no poseen elemento alguno para el control del tamaño de la cámara ni para absorber la energía liberada. De tal manera que si la corriente de falla no es demasiado alta y su factor de potencia no es muy bajo, el fusible interrumpirá sin explotar. Pero nuestro interés en protecciones no es solamente que corte, sino además queremos controlar la energía que dejó pasar para limitar el daño y poseer información para la coordinación selectiva, funciones que no puede hacer este tipo de fusible, lo que pone de manifiesto que su campo de aplicación es muy reducido, sino nulo.

3.2.4- Parámetros nominales y curvas características

La información relacionada con las características nominales del fusible se suministra en forma explícita, en cambio la manera en que reacciona frente a las sobrecorrientes se encuentra en forma de gráficos.

Las primeras son:

Tensión nominal, corriente nominal, capacidad de ruptura, frecuencia de trabajo y clase.

Las curvas características más importantes son:

Corriente versus tiempo, corriente de paso en función de la corriente de falla y energía específica función de la corriente nominal.

- **Tensión nominal:** es la máxima tensión de trabajo del fusible, la que puede interrumpir bajo condiciones prescriptas sin reencendidos peligrosos. Parecería que es posible utilizar un fusible de cualquier tensión nominal superior a la de trabajo del sistema, lo que no puede ser exagerado ya que debe recordarse que el fusible del tipo limitador de corriente genera una sobretensión importante en la operación frente a cortocircuitos, que puede deteriorar a la aislación del sistema. Como regla práctica se aconseja que la tensión nominal del fusible no debe superar en mas del 30 % a la homóloga del sistema donde se instala. Si el fusible es de expulsión o abierto no existe la limitación detallada previamente.

- **Corriente nominal:** es la intensidad máxima de trabajo sin que se superen las temperaturas ni valores de pérdidas límites. Puede hacerse trabajar al fusible con sobrecargas temporales siempre y cuando no superen a un 15 %, mas allá de la cual se puede iniciar el envejecimiento.

- **Capacidad de ruptura:** es la máxima corriente de falla que pueden interrumpir a tensión, factor de potencia y ángulo de conexión especificados en las normas citadas. Usualmente se expresa en kA para los tipos NH y D/D0, y en MVA para los HH, siendo los valores

usuales 100 kA y 300 MVA respectivamente. Para los de expulsión la capacidad de interrupción va desde 1,2 hasta 12 kA, según el tipo. Los abiertos en baja tensión no pueden cortar corrientes de mas de 2 kA (tipo tabaquera), 10 kA (Lira, MN233/234 y americanos).

- **Frecuencia de trabajo:** no requiere mayores aclaraciones ya que los diseños actuales pueden emplearse indistintamente en 50 o 60 Hz., salvo que se esté hablando de corriente continua, donde la situación es totalmente distinta. No se pueden extender aplicaciones de alterna a continua con la difundida regla del 50 % de la tensión nominal, por las dificultades en la interrupción de la corriente unidireccional. En tal caso debe consultarse al fabricante.

- **Clase:** es la aplicación particular para la cual fue diseñado, que se identifica con las letras o nombres citados previamente. Las mas difundidos son para NH: gL (gG), aR y gTr; en caso de HH la mas usada es propósito general. Para expulsión están muy difundidas las clases K (rápido) y T (lento).

En lo que respecta a las curvas características, estas son:

- **Corriente versus tiempo:** se representa en un par de ejes en coordenadas logarítmicas, con la corriente en el horizontal y el tiempo en el vertical.

Usualmente los ejes de tiempo se extienden desde 0,01 s hasta los 10000 s, en cambio el de corrientes se extiende desde 1 A hasta aproximadamente el mismo valor máximo que los tiempos. Existe normalización en lo que respecta al ancho de las décadas solamente para el caso de los del tipo expulsión, especificadas en la ANSI-IEEE C37-41.

La línea representativa de la relación corriente - tiempo es un valor promedio con tolerancias fijadas por las normas. En caso de los fusibles de baja tensión, tipos NH y D/D0, y media tensión tipo expulsión, tal tolerancia se da en las normas en forma de bandas, siendo en el segundo caso especificadas por medio de tres pares de puntos, de manera tal que se garantiza la intercambiabilidad entre distintos fabricantes. En cambio para los dispositivos del tipo HH no existe banda especificada, solo se indica que el apartamiento de los resultados experimentales durante la recepción con respecto a la curva dada por el fabricante no debe superar el 7 %.

En la citada curva pueden detectarse dos zonas bien definidas, una que corresponde a los tiempos largos para los cuales la línea se transforma en una vertical, asíntótica con el valor de la intensidad mínima de fusión. En el otro extremo de la curva, la misma se transforma en una línea recta con pendiente dos, que corresponde a la zona sin intercambio de calor, donde todo el calor producido es almacenado, o sea se comporta con energía específica constante. Entre ambos extremos, se va pasando suavemente de un proceso al otro.

Si se trata de la curva de un fusible no limitador, nos encontraremos con una importante diferencia en la zona de los tiempos cortos. La curva de tiempos mínimos o de prearco es similar a la vista, pero cuando hablamos de la de tiempos totales donde está presente el arco eléctrico, la curva se transforma en una línea horizontal con tiempos de 13,33 o 16 ms, para 60 y 50 Hz respectivamente.

Este cambio se debe a que como el fusible debe esperar el pasaje natural por cero para interrumpir, a medida que la corriente aumenta la energía que deja pasar es mayor, a diferencia del limitador que la controlaba, manteniéndola constante.

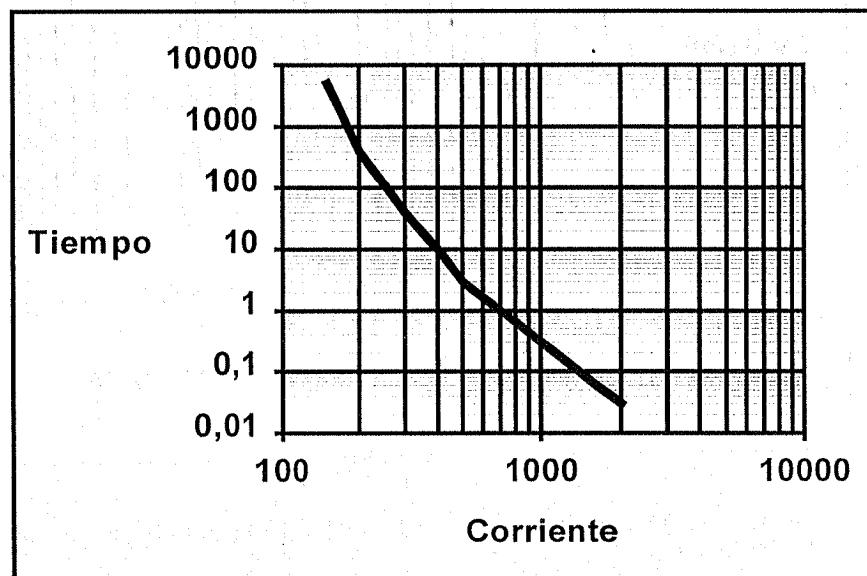


Figura 3.28: Corriente función del tiempo.

Las siguientes dos gráficas solo existen para los fusibles que controlan energía, o sea no son válidas para los fusibles del tipo abierto ni expulsión.

- **Corriente de paso en función de la corriente de falla:** suministra la información de la intensidad instantánea máxima que deja pasar el fusible, en función de la corriente presunta para las peores condiciones posibles de asimetría. La habilidad de limitación se presenta para las corrientes de falla elevadas, superiores al valor denominado "intensidad de umbral", monto que puede deducirse de la gráfica ya que es el punto a partir del cual el valor máximo es inferior a la cresta natural. En la gráfica pueden verse dos líneas, la de mayor pendiente muestra las crestas naturales (sin limitación) para la peor asimetría, que corresponde a una relación cresta / valor eficaz de 2,5. La restante línea, ejemplificada para una corriente nominal arbitraria, indica el valor máximo permitido en función de la intensidad de falla, siendo su efecto mayor a medida que la falta es más rigurosa.

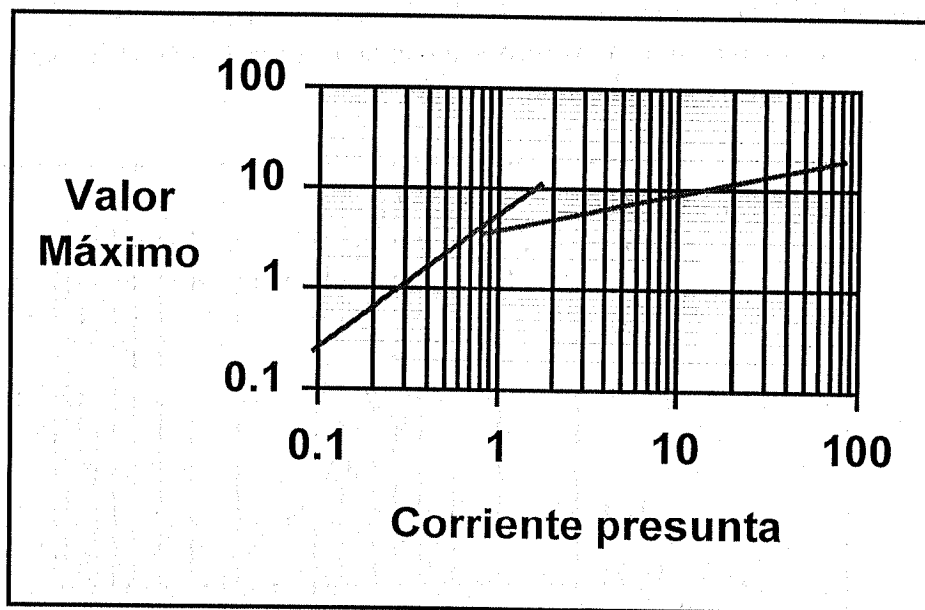


Figura 3.29: Corriente cresta función de la corriente presunta.

- **Energía específica función de la corriente nominal:** realmente no se trata de una gráfica, ya que el eje horizontal puede tener cualquier escala, lo importante son las alturas de las barras, una para cada corriente nominal.

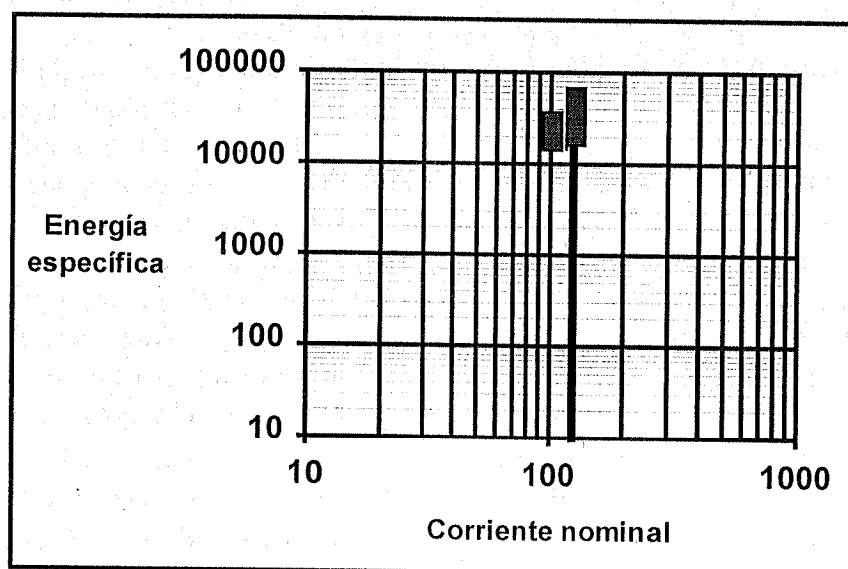


Figura 3.30: Energía específica función de la corriente nominal.

Tal altura brinda la información de la energía específica mínima de prearco y máxima total (prearco mas arco). La superior corresponde al arco, que puede llegar a desdoblarse en los montos correspondientes a dos o más tensiones, por ejemplo en baja tensión para 220, 380 y 500V. Los valores deben encontrarse dentro de límites especificados en las normas.

Tales montos son los que se deben comparar directamente con la capacidad de soportarlos de los equipos protegidos, comparación que día a día se vuelve más crítica debido al aumento de las potencias y energías en juego, que conduce a la presencia de las fallas denominadas dinámicas, capaces de provocar daños muy grandes y de alto riesgo para personas y equipos. En tales casos el fusible es inigualable en lo que se refiere a velocidad

de operación y control de tal energía, si se lo compara con los interruptores, los cuales al poseer partes móviles tienen irremediablemente inercia y por ello menor velocidad.

3.3- Varios:

Seccionadores: El seccionador es un dispositivo de menor precio que el interruptor, que lo auxilia y reemplaza en ciertos casos, cuya principal diferencia con el interruptor es la de no poseer capacidad de interrupción para corrientes de falla, superiores a su corriente nominal o de carga, teniendo en cuenta que se trata de factores de potencia elevados entre 0,6 y 0,8 (no tan bajos como los 0,1 o 0,2 encontrados en las corrientes de falla). Debe soportar los esfuerzos electrodinámicos y térmicos de las corrientes de cortocircuito durante el tiempo que tarda la protección en desconectarla, debiendo ser también capaz de cerrar en falla y superar las solicitaciones mientras la protección correspondiente la desconecta.

Poseen accesorios, como por ejemplo el de trabe de la apertura mientras el interruptor asociado está cerrado, el de puesta a tierra de las partes vivas cuando es abierto que también está enclavado con el interruptor, etc. Por las características constructivas podemos dividirlos en seccionadores para uso en gabinete o a la intemperie.

- Seccionadores en gabinete

Este tipo se difunde cada vez mas por las ventajas que posee de ahorro de espacio y por ende de costo, inicialmente se empezaron a diseñar para funcionar en aceite, pero en poco tiempo se dejo de lado el fluido aislante, empleando en la actualidad gabinetes en aire. Hay países donde se mantuvo la costumbre de gabinetes llenos de aceite, como es el caso de Inglaterra. Se trata de gabinetes metálicos autoconsistentes, o sea que poseen los accesorios y elementos necesarios para su actuación en forma independiente, siendo verdaderos Mecanos que permiten su armado inicial y posterior extensión según las necesidades. Poseen barras en la parte superior, que permite una rápida y fácil interconexión con los gabinetes vecinos, formando conexiones T, derivaciones simples, cierre de anillos, fusibles con percutor, transformadores de medida, etc. Debido a la frecuente necesidad de efectuar mantenimiento sobre los interruptores, éstos se montan sobre carros extraíbles, con sus enclavamientos, puestas a tierra y pantallas protectoras.

También es muy usado el sistema en gabinete a la intemperie, para conductores a la intemperie, donde se maniobran con pértiga. Existen disponibles comercialmente, como:

- Seccionadores tipo intemperie:

Seccionador de cuernos, con contacto principal y operación manual

Seccionadores de corte horizontal o vertical, el horizontal posee dos cortes en serie.

En equipos a la intemperie el principal enemigo es el hielo formado en el contacto, por lo tanto debe poseer fuerza suficiente para romperlo. Para mejorar el contacto deben usarse contactos autoalineantes de dedos, los cuales tienen prolongaciones mas duras para el arco, que se mantiene fuera del contacto que debe ser bueno. Los dedos tratan de cerrarse con la corriente de cortocircuito, mejorando su resistencia, disminuyendo el riesgo de soldadura. y con efecto autolimpiante

- Seccionadores sumergibles, tipo codo.

Seccionadores bajo carga

Se extiende el anterior a cortar corriente nominal con factores de potencia de 0,6 a 0,8. Hay con distintos principios, como soplado de aire, cámara de-ion, etc.

Algunos seccionadores comunes pueden transformarse en seccionadores bajo carga mediante el uso de la herramienta montada sobre pértiga, denominada load-buster.

Indicadores de falla pasante

Se emplean como indicadores de presencia de falla permanente en líneas aéreas, subterráneas o tableros de distribución con conectores acodados. Poseen curva característica de respuesta tipo corriente tiempo, con disparo por la corriente indicada como nominal en un tiempo mayor a 10 / 20 ms. Pueden ser de reposición manual o automática (se reponen automáticamente cuando se aplica tensión nominal por mas de tres minutos), y de indicación local o a distancia. Las corrientes nominales van desde 50 A hasta 1200 A. La indicación es mediante una banderita o señal luminosa de color rojo. El principio de funcionamiento se basa en un relé electromecánico conectado en el secundario de un transformador de medida.

Bibliografía:

- [1]- McGraw-Edison, Selección uso y mantenimiento de reconectadores automáticos de circuito
- [2]- McGraw - Edison Company; Distribution System Protection Manual, Pennsylvania, 1977.
- [3]- Cooper Power Systems, The Kyle KFE Recloser Line, USA, 1995
- [4]- Cooper Power Systems, Kyle type FXA Recloser Control, USA, 1995
- [5]- Hawker Siddeley Switchgear, Seccionador y Reconectador trifásico en SF6 montado en poste, England.
- [6]- Lythall, R.T. ; The J&P Switchgear Book; newness Butterworths, London, 1976
- [7]- Folletos y manuales S&C, USA.