

EL ARCO ELÉCTRICO

El arco eléctrico no es un invento; se le presentó ya al primer físico que intentó abrir un circuito recorrido por una corriente eléctrica.

En efecto, el circuito, siempre inductivo, dota a los electrones de suficiente energía para salvar la distancia que aparece en la zona de separación de los conductores.

Normalmente, son estos electrones «pioneros» los que ionizan el gas, sea el que sea, y la creación de plasma facilita desde el principio el paso de la corriente.

En estas condiciones podríamos imaginar que la ruptura total es muy difícil de conseguir a no ser que, un mejor conocimiento de este fenómeno nos permita descubrir algunas propiedades que nos van a resultar irremplazables.

Por suerte, es así: esas propiedades existen.

Condiciones de formación

El arco aparece en un medio gaseoso:

- Por perforación dieléctrica entre dos electrodos: o a partir de un valor de campo eléctrico E/d , que depende de la forma de los electrodos y de la naturaleza y densidad del gas (en la **figura 1**, siendo d la distancia entre los electrodos),

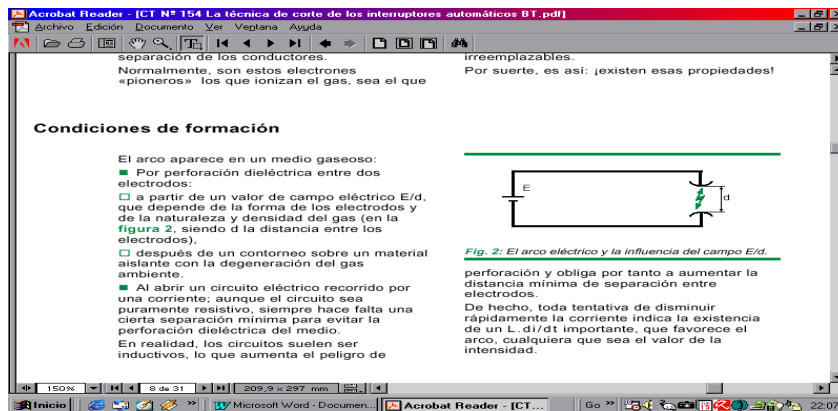


Figura 1: El arco eléctrico y la influencia del campo E/d .

- Después de un contorneo sobre un material aislante con la degeneración del gas ambiente.
- Al abrir un circuito eléctrico recorrido por una corriente; aunque el circuito sea puramente resistivo, siempre hace falta una cierta separación mínima para evitar la perforación dieléctrica del medio.

En realidad, los circuitos suelen ser inductivos, lo que aumenta el peligro de perforación y obliga por tanto a aumentar la distancia mínima de separación entre electrodos.

Propiedades físicas (Figura 2)

Al separarse los dos contactos, uno, el cátodo, emite electrones, el otro, ánodo, los recibe. Por la naturaleza energética del fenómeno de emisión de electrones, el cátodo se calentará. La base del arco se convierte en una fuente de emisión termo – iónica: el punto caliente es el principal emisor de electrones y, si el arco se estanca, pueden aparecer vapores metálicos.

Estos vapores y el gas ambiente se ionizarán debido a:

- la presencia de electrones libres,
- la creación de iones positivos que se desplazan hacia el cátodo y mantienen su calentamiento,
- la creación de iones negativos que bombardeando el ánodo, provocan también su calentamiento.

El conjunto de toda esta agitación se produce en el seno de una columna de plasma a alta temperatura 4.000 a 20.000 °K, según sea la corriente y su confinamiento.

Figura 2:El arco eléctrico: fenómeno físico (a) y tensión característica de arco U_a (b).

Propiedades eléctricas

La más notable es la aparición de una tensión de arco cuyo valor tiene:

- una parte fija, $U_{AC} \gg 20$ a 40 V, que aparece a partir del instante de separación de los contactos y depende de los materiales empleados,
- una parte variable, $U_L = 50$ a 100 V/cm, cuando el arco se ha estabilizado en su contexto de presión–temperatura.

Así se obtiene un valor total:

$$U_a = U_{AC} + U_L$$

Hay que destacar que:

- el signo de U_a cambia al modificarse el sentido de la corriente de arco,

SUS CONDICIONES DE EXTINCIÓN

Se produce la extinción cuando la corriente del arco **pasa a ser** cero.

Aspecto térmico

Cuando la corriente de arco es o pasa a ser pequeña, inferior a 10 A por ejemplo, los intercambios de energía térmica pueden llegar a ser superiores a la energía interna generada por el arco y éste «muere de frío» (arco congelado) lo que provoca un aumento de la tensión del arco (**figura 3a**).

Durante este aumento de la tensión, puede aparecer una extinción brutal si las capacidades parásitas cortocircuitan el arco, fenómeno que se produce cuando la tensión de arco es y se mantiene en un valor superior a la tensión de carga de las capacidades repartidas (**figura 3b**). Este fenómeno se denomina recortado.

Pero no siempre sucede esto así:

- si la corriente de un arco se estabiliza contra una pared aislante, su superficie de intercambio térmico disminuye y los componentes del aislante, localmente muy calientes, pueden favorecer la conducción y mantenimiento del arco,
- si la corriente de arco es importante, la columna es muy exotérmica y sólo las evoluciones conjuntas de la tensión de arco y de la tensión de la red permiten reducir y anular esta corriente.

Figura 3: Extinción del arco eléctrico por recortado

Aspecto dieléctrico

No es suficiente que el valor de la corriente de arco pase por cero en un instante para asegurar su extinción: es necesario que el medio, que está ionizado, se regenere dieléctricamente para resistir a la tensión de red, que aún está presente.

Estos fenómenos de regeneración por recombinación de los iones $+ o -$ y de los electrones son, por suerte, muy rápidos. Así, en la práctica, para que la corriente de arco se mantenga nula, la tensión de red debe de ser inferior a la tensión característica de regeneración (U_d).

Si la tensión de arco alcanza y mantiene un valor superior a la tensión de red (en valor absoluto, si se trata de una tensión alterna), el fenómeno de regeneración disminuirá durante la aproximación al cero de la corriente: el número de cargas eléctricas del plasma se ajusta al mínimo estrictamente necesario y se anula al mismo tiempo que la corriente.

Pero el arco y las capacidades parásitas tienen la misma tensión hasta la extinción de la corriente del arco. Una vez que se ha anulado la corriente de arco, esta tensión retorna al valor de la tensión de la red por un fenómeno de oscilación libre entre las capacidades distribuidas y las constantes L y R del circuito (**figura 4**). Esta «acomodación» de la tensión se denomina Tensión Transitoria de Restablecimiento (TTR). Si estas capacidades son bajas, las oscilaciones tienen una frecuencia muy alta y están muy amortiguadas.

Figura 4: La tensión transitoria de restablecimiento, TTR.

Estas condiciones se dan:

- con tensión continua (**figura 5a**):

La tensión de arco U_a es superior a la tensión de red U_r cuando la corriente se anula y la característica de regeneración U_d se mantiene superior a U_r con TTR,

- con tensión alterna:

Cuando el valor instantáneo de la tensión de la red es todavía del mismo signo que la tensión de arco en el momento del cero de corriente (**figura 5b**). La condición de ruptura definitiva se dará cuando la evolución posterior de la tensión de red no supere nunca las características de regeneración tanto en valores positivos como negativos,

Cuando el valor instantáneo de la tensión de la red es de signo opuesto a la tensión de arco, pero en valor absoluto inferior (**figura 5c**). La extinción del arco es definitiva si la TTR no rebasa las características de regeneración.

En caso contrario, cuando la TTR corta la curva de regeneración, puede provocar la aparición de una corriente post-arco de carácter electroluminiscente. Y entonces:

- si la corriente post–arco persiste con tipo o carácter «congelado» las condiciones de extinción subsisten;
- si la corriente post–arco rebasa un valor crítico con una tensión igualmente crítica, se producirá un reencendido de la corriente de arco y deberemos esperar un nuevo «cero» de la corriente para poder extinguirlo.

Figura 5: El arco en condiciones de extinción:

a: con tensión continua,

b: con tensión alterna, siendo U_r del mismo signo que U_a , en el instante del cero de corriente,

c: con tensión alterna, siendo U_r de signo opuesto a U_a .

INTERRUMPIR LAS CORRIENTES ESTABLECIDAS

Para determinar las corrientes establecidas hay que tener presentes las corrientes nominales, corrientes de sobrecarga y corrientes de cortocircuito que alcanzan un valor estable cualquiera en un momento de apertura del circuito.

La apertura del circuito puede ser:

- voluntaria, ordenada por el usuario, independientemente del valor de la corriente,
- reflejada, por la acción de un dispositivo, sensible al mismo valor de la corriente, que ordena, directa o indirectamente, la apertura del circuito.

ARCO ELÉCTRICO EN JdB

Nacimiento de un arco de defecto

Las causas de aparición de un arco de defecto en una instalación pueden clasificarse en tres categorías:

- las causas evolutivas;
- las causas mecánicas;
- las sobretensiones.

Las causas evolutivas

Son consecuencia de un debilitamiento progresivo de la resistencia de aislamiento entre fases o entre fases y masa.

Este debilitamiento puede ser consecuencia de depósitos que, si se produce una condensación o un estado higrométrico excepcional, pueden provocar la formación de un punto de resistencia superficial tal que puede abrirse una brecha en la superficie del aislante.

Según la naturaleza del aislante, este defecto inicial puede eliminarse por sí mismo o empeorarse, creando un arco de defecto.

Este fenómeno se constata a veces al volver a conectar una instalación después de varios días de paro, período en el que pueden producirse condensaciones al no estar ya la instalación a una temperatura superior a la del ambiente. Este es el caso concreto y particular de las instalaciones de cristalerías, en las que el aire ambiente transporta polvo de carbonato de sodio y en las que además los riesgos de variaciones higroscópicas son elevados. El resultado final será el mismo si la suciedad de la superficie de los aislantes se debe a salpicaduras de líquidos que contengan electrólitos.

El accidente puede pasar desapercibido y producirse en el transporte o durante los trabajos de mantenimiento de la instalación. Se notará más tarde en la explotación con condiciones higroscópicas excepcionales. Es lo mismo con condensaciones sobre materiales almacenados a la orilla del mar y mal protegidos.

La degradación progresiva del aislamiento puede igualmente deberse a un calentamiento local accidental, por ejemplo, por una mala conexión o por un aflojamiento progresivo de un borne. La elevación de la temperatura en un punto próximo a otro defectuoso puede inducir a la descomposición y la carbonización progresiva de los aislantes cercanos, lo que puede ser el origen un arco de defecto, inicialmente entre fases o entre fase y masa y después degenerar en un defecto trifásico.

Las causas mecánicas

Se deben a la intervención de un elemento conductor ajeno a la propia estructura de la instalación.

Este es el caso de intervenciones inadecuadas del personal de mantenimiento: no siempre se respetan estrictamente las normas que fijan las precauciones a tomar en caso de actuaciones en partes bajo tensión. Se observa, por ejemplo, que para no perturbar el funcionamiento general de una instalación, un electricista que tiene que realizar una verificación, abre los paneles posteriores de un cuadro, y sobre el juego de barras así accesible, se pone a trabajar pensando que tendrá suficiente cuidado. Cuando una herramienta se resbala y escapa de las manos, o cuando una lámpara de pruebas (prohibida) explota, se produce una descarga general con riesgo de quemaduras graves para el operador imprudente.

Los resultados serán los mismos si un objeto conductor «olvidado» en la parte superior del cuadro (herramienta, trozo de una barra, tuerca, arandela, cuña metálica, etc.), llega a desplazarse poco a poco por el efecto de las vibraciones y cae entre dos barras, o entre dos bornes de un cable.

Pueden incluso presentarse incidentes debidos a la presencia insólita de un animal en el interior de un cuadro (gato, ave, rata, etc.).

Las sobretensiones

Algunas sobretensiones de valor elevado producen descargas en cuadros correctamente diseñados e instalados. Sin embargo, estos casos excepcionales se pueden producir especialmente en BT.

En las redes de BT pueden encontrarse sobretensiones que alcanzan los 8 ó 10 kV. Proviene de la transmisión, por la capacidad de los transformadores de MT/BT, de sobretensiones «normales» que aparecen en MT, por ejemplo, al cortar la corriente magnetizante de un transformador en vacío.

La instalación de limitadores de sobretensiones en los bornes de BT de un transformador es el mejor medio de protegerse contra este tipo de incidentes.

COMPORTAMIENTO DEL ARCO DE DEFECTO

El desplazamiento de un arco de defecto sobre el embarrado de un cuadro es bastante imprevisible. Sin embargo tenemos ciertas leyes generales que nos permiten explicar y prever su comportamiento.

Características del arco

Es estudiando la propia naturaleza del arco como se consigue encontrar la explicación de su comportamiento: el arco eléctrico está constituido por una columna de gas conductor (plasma) que es llevada a una alta temperatura (de 6 a 12 000 °K) por los arcos producidos en los interruptores o en los defectos.

Su forma, que puede ser cualquiera, no tiene normalmente nada que ver con la de un arco, como haría suponer su nombre; su sección puede considerarse circular, en ausencia de agentes externos, y es el resultado del equilibrio entre la presión interna del gas caliente y la constricción magnética del paso de su propia intensidad. La transmisión de corriente queda asegurada en el arco por los electrones libres que se desplazan en sentido inverso del sentido convencional de la corriente.

Las partículas positivas ionizadas, presentes en la columna en número casi igual al de los electrones, no conducen más que una parte muy pequeña de la corriente debido a su masa, mucho mayor que la de los electrones. Estas partículas positivas existen para compensar la presencia de electrones.

El arco es pues semejante a un conductor gaseoso cuya forma se adapta instantáneamente a las fuerzas electrodinámicas que actúan sobre él; tiene una gran movilidad debido a su masa, que es muy pequeña.

La columna del arco está forzosamente unida en sus dos extremos a conductores sólidos (o líquidos), por las llamadas raíces del arco. Estas zonas son las catódicas y anódicas, de muy escasa longitud (10–4 cm), asiento de los fenómenos esenciales para mantener el proceso del arco. Estas raíces del arco son unas conexiones eléctricas, extremadamente móviles, a la superficie de los conductores, a través de las que circula la corriente produciendo su fusión. El arco es un conductor eléctrico cuya resistencia es elevada y muy variable dependiendo especialmente de la intensidad que lo recorre. Es más práctico considerar la tensión de arco o su caída de tensión que su resistencia: la tensión de arco, cuyo valor mínimo es del orden de 15 a 30 V, y alcanza, para los arcos de defecto, valores que pueden estar entre los 100 y 300 V.

Su expresión es $U_a = u_e + IE$:

- u_e es la suma de las caídas de tensión catódicas y anódicas, 20 V de media,
- l es la longitud del arco (en cm),
- E es el gradiente de potencial de la columna de arco (V/cm).

Por un arco en el aire, en reposo, naturalmente enfriado, E vale de 15 a 20 V/cm, pero puede alcanzar 50 V/cm cuando el arco está frío.

El desplazamiento del arco

La propagación de un arco de defecto sobre un juego de barras de un cuadro se realiza sobre la acción de las fuerzas electrodinámicas ejercidas sobre el arco por los conductores sobre los que se desplaza, o por cualquier otro conductor próximo con un campo importante.

El sentido del desplazamiento del arco es tal que el flujo abrazado por el bucle formado por el arco y sus conductores de transporte debe tender hacia un máximo (figura 7).

Figura 7

Así por regla general, el arco se desplaza sobre las barras alejándose de la fuente, incluso si este desplazamiento le obliga a descender por las barras verticales.

El efecto térmico de chimenea que tiende a hacer subir al arco es generalmente despreciable respecto a las acciones electrodinámicas proporcionales al cuadrado de la intensidad.

Velocidad de desplazamiento

El arco se desplaza a velocidades muy altas, del orden de 200 a 250 m/s para corrientes del orden de 15 a 20 KA eficaces en un juego de barras BT, separadas, en el aire, 300 mm.

Se habla de velocidad media en corriente alterna. En efecto, la inercia del arco es menor cuando la velocidad instantánea se anula en el instante que la intensidad pasa por cero (donde se apaga instantáneamente), creciendo después de nuevo para alcanzar un máximo que corresponde al valor de pico de la onda senoidal de la intensidad de corriente.

Este fenómeno se ha puesto en evidencia con fotografías tomadas a gran cadencia (200 a 300 imágenes por segundo) en el curso de un ensayo en corriente alterna monofásica.

Así, un cambio brusco de dirección de un juego de barras rectilíneo puede hacer que el arco se mantenga en el ángulo vivo formado por las barras o que siga la nueva dirección que se encuentra a su paso.

Para parar la propagación del arco, el proceso aparentemente más apropiado es el de hacer pasar las barras a través de una pantalla aislante. Ésta sólo cumplirá correctamente su función si constituye una verdadera pantalla moldeada alrededor de las barras conductoras. Una holgura del orden de un milímetro entre la pantalla aislante y el metal de las barras es suficiente para que el gas ionizado consiga provocar el recibado al otro lado de la pantalla.

Desperfectos propios del arco

Si el arco de defecto se propaga libremente sobre barras sin discontinuidades ni cambios bruscos de plano y sin encontrar obstáculos metálicos o aislantes, su paso no provoca prácticamente ningún deterioro. Las raíces del arco se desplazan en saltos sucesivos dejando trazas insignificantes, sólo pequeñas manchas circulares de algunos mm de diámetro.

Por el contrario, si el arco es frenado o parado en su camino, aunque sólo sea durante algunas centésimas de segundo, provoca entonces serios estragos: fusión de metal, combustión de aislantes.

Obstáculos en el recorrido del arco

Sin embargo, el comportamiento del arco frente a las discontinuidades de las barras sobre las que se propaga o ante los obstáculos que encuentra es relativamente aleatorio.

Así, un cambio brusco de dirección de un juego de barras rectilíneo puede hacer que el arco se mantenga en el ángulo vivo formado por las barras o que siga la nueva dirección que se encuentra a su paso.

Para parar la propagación del arco, el proceso aparentemente más apropiado es el de hacer pasar las barras a través de una pantalla aislante. Ésta sólo cumplirá correctamente su función si constituye una verdadera pantalla moldeada alrededor de las barras conductoras. Una holgura del orden de un milímetro entre la pantalla aislante y el metal de las barras es suficiente para que el gas ionizado consiga provocar el recibado al otro lado de la pantalla.

LOS DIVERSOS EFECTOS DEL ARCO

El efecto térmico: constituye la más importante manifestación del arco eléctrico:

la energía calorífica $E_A = U_a \cdot I_{cc} \cdot t$ es proporcional:

- a la tensión de arco U_a , del orden de un centenar o más de voltios,
- a la intensidad de defecto eficaz, I_{cc} , generalmente de varias decenas de millares de amperios en BT, menos en MT,
- a la duración del defecto t , que depende del tiempo de intervención de los relés de protección y del interruptor automático asociado.

El calor liberado funde el metal, carboniza los aislantes, calienta el aire próximo y aumenta bruscamente la presión si el entorno es reducido.

Se suele subestimar, a menudo, el enorme calor liberado por los arcos de defecto. Por ejemplo: una corriente de defecto de 10.000 A durante 1/10 [s] es suficiente para fundir la mitad de un cable de 150 mm².

El efecto de presión: resulta del calentamiento muy rápido de un volumen de aire reducido; es lo que hace comparar, por lo que se ha podido comprobar, un cortocircuito a una explosión. Si a los cuadros no se les ponen pantallas o puertas que resistan estas presiones internas, se agravan de los daños causados a las instalaciones.

El cebado de un arco se acompaña siempre de un **ruido impresionante**, efecto sonoro que es consecuencia de la variación brusca de la presión. En corriente alterna, este ruido será como un trueno.

El efecto luminoso de un arco es muy conocido, además de su intenso brillo; se produce en parte por las radiaciones ultravioleta, capaces de dañar la vista de una persona próxima, pero sobre todo por la ionización del entorno.

El efecto de ionización puede provocar reencendidos entre partes con tensión que, con una atmósfera normal, se considera que tienen una separación de aislamiento adecuada. Estos reencendidos tienen como consecuencia la formación de arcos secundarios, independientes del arco inicial y que se propagan sobre otros elementos. Esto explica la aparición de los cebados múltiples que se aprecian en el cuadro después del fognazo y que hacen que sea muy difícil el buscar el origen exacto del defecto.

REDUCIR LA POSIBILIDAD DE APARICIÓN DE UN ARCO

La disposición de los elementos debe de poder hacer frente a los riesgos correspondientes, que son muy naturales:

- los riesgos 1:

Se deben al conjunto de la instalación: calidad de los aislantes, distancias mínimas de aislamiento, apriete adecuado de las conexiones, rigidez de las barras entre los soportes, dimensionado de las barras para soportar eventuales sobreintensidades (calentamientos, resonancia), accesibilidad de animales a las partes con tensión.

- los riesgos 2:

Se deben a accidentes más o menos previsibles: entrada intempestiva de agua o de vapor de agua en un cuadro, choque de vehículos o cargas debidos a falsas maniobras, vibraciones excesivas producidas por la proximidad de ciertas máquinas.

- los riesgos 3:

Se deben a la intervención de personas.

Los riesgos 1 pueden eliminarse con una construcción esmerada y con una verificación exhaustiva al acabar previo a la conexión en el lugar de utilización. Hay que destacar aquí la importancia que tiene el diseño del material en si mismo; los conocimientos técnicos y la experiencia del personal de la ingeniería del estudio del que depende directamente la seguridad de la explotación de las instalaciones.

Los riesgos 2, si bien no pueden eliminarse totalmente, siempre se pueden minimizar escogiendo con cuidado los lugares de implantación de las diferentes partes de la instalación.

Hay que considerar especialmente el caso particular de los cuadros instalados en los navíos: se ha podido constatar la producción de arcos de defecto debidos a la entrada del agua de mar por las conducciones de ventilación o debidos a condensaciones abundantes resultantes de fugas importantes de vapor.

Estos accidentes pueden evitarse con un estudio previo completo de estos riesgos externos y de los medios apropiados para eliminarlos.

Los riesgos 3 están directamente relacionados con la actuación y el respeto a las normas de explotación y de intervención del personal. Debe de garantizarse la competencia del personal autorizado para intervenir: de la seriedad que este personal tenga en su trabajo depende directamente la seguridad del conjunto de la instalación o de una industria y hasta su propia seguridad.

Siempre es posible diseñar y realizar los cuadros, donde los juegos de barras y sus derivaciones estén al amparo de toda intervención torpe del personal.

Un primer método consiste en situar todas las barras bajo tensión dentro de jaulas metálicas, permitiendo así al personal poder trabajar con seguridad sobre los circuitos próximos de control.

El método más seguro, pero también el más costoso (muy practicado en USA), consiste en cubrir completamente todas las barras, conexiones y piezas de conexión con barniz clase F y encintar, después del montaje, todas las demás piezas con tensión.

LIMITACIÓN DE LAS CONSECUENCIAS DE UN ARCO

A pesar de todas las disposiciones tomadas, todavía puede presentarse un arco de defecto, aunque sea muy poco probable; se trata entonces de reducir los estragos que pueda ocasionar, a fin de poder restablecer muy rápidamente y con el menor gasto la distribución de la energía.

Se pueden tomar diferentes medidas, sea mejorando los detalles constructivos del cuadro, sea en el diseño del esquema o de las protecciones adoptadas.

Reducir la intensidad de defecto

Los efectos térmicos son proporcionales a la intensidad de cortocircuito, I_{cc} , que normalmente podrán reducirse mucho en BT utilizando interruptores automáticos limitadores. Es pues recomendable utilizar estos interruptores automáticos en las entradas a los cuadros, cuando sus características (calibre, selectividad parcial) son compatibles con la instalación.

Reducción del tiempo de defecto

Los efectos térmicos son también proporcionales a la duración de t , que se querrá reducir provocando la eliminación, lo más rápidamente posible, del defecto. Pero los aparatos encargados de esta misión, son los

interruptores automáticos de la fuente, que los imperativos de selectividad obligan a menudo a temporizar. Hará falta siempre por lo menos tener cuidado en ajustar su temporización al menor valor posible, sin eliminar en estos tiempos los márgenes de seguridad aparente, lo que sería lamentable en caso de cortocircuito en las barras provoquen menos estragos y estando todas más o menos controladas por una pantalla consumible. Estos dispositivos se denominan trampas para arco.

Pantallas, pasamuros

El fraccionamiento de un juego de barras en varios trozos como se acaba de decir ventajoso añadiendo un aislante físico eficaz entre las diferentes secciones. Los pasamuros constituyen pantallas sobre las que el arco se parará, pero su construcción debe de ser tal que sean resistentes al calor del arco durante el tiempo necesario.

EXTINCIÓN DEL ARCO

Formación del arco:

- Si en un sistema ocurre una falla, esta debe ser detectada por el sistema de protección (sensibilidad), el que después de un $t = \text{relé}$ debe dar la orden de disparo al o los interruptores más adecuados para aclarar o despejar la falla (selectividad).
- El o los interruptores cuyas bobinas de disparo han sido energizadas por los relés, después de $t = \text{tiempo de apertura}$, empiezan a separar sus contactos a través de las cuales circula IF (KA).
- Al separare los contactos, la corriente no cae a cero, ya que la R entre los contactos aumenta y el I^2R genera calor ionizado el aire y/o vaporizando el ionizando el aceite, los que actúan como un conductor debido al número de electrones libres, permitiendo que circule la corriente.
- El arco es una columna de calor, gas ionizado. La R arco es una resistencia no lineal.

Extinción

- No obstante que mediante la separación de los contactos se puede llegar a cortar el arco: R sube, por lo tanto I baja, no siempre es factible aumentar el arco al valor necesario para apagarlo.
- También es factible reducir la ionización y la sección del arco. Aumentar la fuerza dieléctrica del espacio del arco.
- En general, para apagar un arco, primero se alarga (R sube) y luego se enfría (se pueden agregar sustancias aislantes frías: aceite mineral, aire comprimido).
- La extinción de un arco de C.A es mucho más fácil que un arco de C.C, debido a que la corriente alterna se hace igual a cero dos veces en cada ciclo.
- Al pasar por cero la C.A el arco se corta; en ese instante se aumenta la resistencia dieléctrica entre contactos de manera que no se reencienda el arco (lo que sucede 1,3,5,8 ciclos después de iniciado el arco), es decir, la resistencia dieléctrica del espacio del arco debe aumentarse más rápidamente que el voltaje a través de este mismo espacio.

ELEMENTOS PARA LA EXTINCIÓN DEL ARCO

Aire: Se emplean de preferencia para baja tensión y en algunos sistemas de tensiones medias.

- Al empezar a separarse los contactos A y B se establece arco en la base.
- Calor generado, hace que la corriente de aire obligue al arco a ascender.
- Las fuerzas electromagnéticas dentro de un lazo tienden a aumentar su área, el arco es aún más impulsado hacia arriba.
- El arco más largo se enfría con mayor facilidad por convección, por corrientes de aire y por radiación. A mayor arco se necesita una mayor **er** para mantenerlo.

- En interruptores de este tipo el arco debe extinguirse antes de que llegue a los extremos superiores de los cuernos.
- Algunos interruptores emplean bobinas que producen un campo magnético que contribuya al movimiento del arco hacia los extremos de los cuernos (soplo magnético). Se emplean hasta nivel de distribución. (> 23 KV).

Arco seccionalizado

Un mayor alargamiento del arco se logra si se emplean barreras de material aislante, lo que permite interrumpir corrientes de mayor magnitud.

Las superficies de las láminas aislantes se pueden enfriar. El arco se alarga por efecto de un soplo magnético (bobinas alimentadas por la corriente del sistema, en serie con el arco).

Gran volumen aceite

Ventajas

- Mayor conductibilidad térmica del aceite que el aire (enfriá el arco y los contactos).
- Al formarse el arco el aceite vecino se evapora formando una burbuja que lo rodea. La descomposición del aceite produce un gas con alto contenido de hidrógeno, el que es desfavorable a la formación de iones.
- Los gases de alta presión introducen turbulencias dentro de la columna del arco.
- La interrupción del arco depende:
 - Alargamiento
 - Refrigeración
 - Introducción de gas desfavorable a su formación.

Cámara aislante

Cada polo o fase tiene doble cámara interruptiva conectadas en serie.

Cámara de contactos cerrados

Para tensiones y capacidades de ruptura o de interrupción muy grandes, cada fase de un interruptor va dentro de un tanque separado, aunque el accionamiento de los tres polos es simultáneo, por medio de un mando común.

Cámara de contactos abiertos

Al descender el contacto móvil, el arco sale por la garganta.

La parte del arco que esta dentro de la cámara genera gas que expelle el aceite por la garganta poniéndolo en íntimo contacto con el arco, enfriándolo y arrastrándolo físicamente hacia fuera a los electrones libres y los iones positivos.

En algunos diseños el soplo de aceite es transversal.

soplo longitudinal soplo transversal

Peligro: Incendio de aceite en caso de que el tanque se rompa por presión interna muy elevada.

Aire comprimido o aire a presión o neumático

Ventajas:

- Peligro de incendio está reducido a un mínimo.
- Velocidad de separación de los contactos puede ser muy grande.

Funcionamiento

Al tomarse el arco un chorro de aire a alta presión lo enfría y elimina el gas ionizado de entre los contactos en separación.

El poder de ruptura aumenta casi proporcionalmente a la presión del aire inyectado, esta varía entre 8 y 13 kg/cm. La extinción del arco se efectúa en un tiempo muy corto del orden de 3 ciclos, lo cual produce sobretensiones mayores que en los casos anteriores.

Debido a que algunos interruptores producen mayores sobretensiones, es común en los fabricantes insertar en paralelo con los contactos principales, resistencias amortiguadoras y capacitancias que producen altas impedancias y reparten las tensiones de las cámaras.

Pequeño volumen de aceite

Las cámaras de extinción tienen la propiedad de que el efecto de extinción aumenta a medida que la corriente que va a interrumpir crece. Por eso al extinguir las corrientes de baja intensidad, las tensiones generadas son pequeñas.

La potencia de apertura es limitada sólo por la presión de los gases desarrollados por el arco, presión que debe ser soportada por la resistencia mecánica de la cámara de arqueo. Para potencias interruptivas altas, el soplo de los gases sobre el arco se hace perpendicularmente al eje e los contactos, mientras que para potencias bajas, el soplo de los gases se inyecta de forma axial.

El desarrollo de los gases de extinción depende más de la corriente que la tensión, lo que origina que la potencia de cortocircuito aumente constantemente con la tensión, como se puede observar en la figura 6.33, que relaciona la potencia máxima de cortocircuito en por ciento con la tensión de restablecimiento, también en por ciento.

En dicha gráfica se puede apreciar que si la tensión de restablecimiento alcanza un valor doble, la potencia de ruptura aumenta en un 50%. Los interruptores de este tipo usan un mando que energiza por medio de resortes.

El tiempo de la extinción de arco es del orden de 6 ciclos.

Curvas de potencia de cortocircuito – tensión de restablecimiento

Hexafluoruro de azufre (SF₆)

Las cámaras de extinción operan dentro de un gas llamado hexafluoruro de azufre (SF₆) que tiene una capacidad dieléctrica superior a otros fluidos dieléctricos conocidos. Esto hace más compactos y más durables los interruptores desde el punto de vista de mantenimiento.

Propiedades del SF₆: Es un gas químicamente estable e inerte, su peso específico es de 6.14 g/l. Alcanza unas tres veces la rigidez dieléctrica del aire, a la misma presión. A la temperatura de 2000 °K conserva

todavía alta conductividad térmica, que ayuda a enfriar el plasma creado por el arco eléctrico y al pasar por cero la onda de corriente, facilita la extinción del arco. Físicamente el gas tiene características electronegativas, o sea, la propiedad de capturar electrones libres transformando los átomos en iones negativos, lo cual provoca en el gas las altas características de ruptura del arco eléctrico y por lo tanto la gran velocidad de recuperación dieléctrica entre los contactos, después de la extinción del arco.

Los interruptores con este gas pueden librar las fallas hasta en dos ciclos y para limitar las sobretensiones altas producidas por esta velocidad, los contactos vienen con resistencias limitadoras.

Las principales averías de este tipo de interruptores son las fugas de gas, que requieren aparatos especiales para detectar el punto de la fuga. En un aparato bien instalado, las pérdidas de gas deben ser inferiores al 2% anual del volumen total de gas encerrado dentro del aparato.

En caso de pérdida total de la presión del gas y debido a la alta rigidez dieléctrica del SF₆, la tensión que pueden soportar los contactos cuando están abiertos es igual al doble de la tensión de fase a tierra. De cualquier forma, no es conveniente operar un interruptor de SF₆ cuando ha bajado su presión por una fuga y debe ser bloqueado el circuito de control de apertura para evitar un accidente.

En los interruptores trifásicos, la apertura de los contactos es simultánea, aunque conviene que haya dispersión de un milisegundo, entre los tres polos; se entiende por dispersión a la diferencia en tiempo que existe entre el instante del cierre del primero y el instante de cierre del último polo del interruptor. El uso de la dispersión es importante, pues sirve para reducir las sobretensiones debidas a impulsos por maniobra.

El vacío

Los aparatos que utilizan este sistema, en teoría, abren en un ciclo debido a la pequeña inercia de sus contactos y a su pequeña distancia. Los contactos están dentro de botellas especiales en las que se ha hecho el vacío casi absoluto. El contacto fijo esta sellado con la cámara de vacío y por el otro lado entra el contacto móvil, que también esta sellado al otro extremo de la cámara, y que en lugar de deslizarse, se mueve junto con la contracción de un fuelle de un material que parece ser una aleación del tipo del latón.

Al abrir los contacto dentro de la cámara de vacío, no se produce ionización y, por tanto, no es necesario el soplado del arco ya que este se extingue prácticamente al paso por cero después del primer ciclo.

Este tipo de utiliza en instalaciones de hasta 34,5 KV dentro de tableros blindados.

Los dos inconvenientes principales son:

- Que por algún defecto o accidente, se pueda perder el vacío de la cámara y al entrar el aire y producirse el arco, pueda reventar la cámara.
- Debido a su rapidez producen grandes sobretensiones entre sus contactos y estos emiten ligeras radiaciones de rayos x.

CÁMARAS DE EXTINCIÓN DEL ARCO

Es la parte primordial de cualquier interruptor eléctrico, en donde al abrir los contactos se transforma en calor la energía que circula por el circuito de que se trate. Dichas cámaras deben soportar los esfuerzos electrodinámicos de las corrientes de cortocircuitos, así como los esfuerzos dieléctricos que aparecen al producirse la desconexión de bancos reactores, capacitores y transformadores.

El fenómeno de interrupción aparece al iniciarse la separación de los contactos, apareciendo un arco a través

de un fluido, que lo transforma en plasma y que provoca esfuerzos en las cámaras debido a las altas presiones y temperaturas. Al interrumpirse la corriente, durante el paso de la onda por cero, aparece entre los contactos la llamada tensión transitoria de restablecimiento o recuperación.

Durante la interrupción del arco aparecen los siguientes fenómenos:

- Altas temperaturas debido al plasma creado por el arco.
- Altas presiones debido a la alta temperatura del plasma.
- Flujos turbulentos del gas que adquieren velocidades variables entre 100 y 1000 metros entre segundo y que producen el soplado del arco, su alargamiento y, por lo tanto su extinción.
- Masas metálicas en movimiento (contacto móvil) que se aceleran en pocos milésimos de segundo hasta adquirir velocidades del orden de 10 metros entre segundo
- Esfuerzos mecánicos debido a las corrientes de cortocircuito.
- Esfuerzos dieléctricos debidos a la tensión de restablecimiento.

Con la interacción de estos fenómenos es difícil de analizar, el diseño de una cámara de interrupción esta basada, en gran porcentaje, en tablas y pruebas de laboratorio. En la actualidad, se sigue en la búsqueda de cámaras interruptivas de menor tamaño y mayores capacidades de cortocircuito, centrándose los estudios en la **investigación de la física del arco eléctrico** a través de equipos de medición, captación de datos, simulación y, finalmente del empleo de computadoras.

CONCLUSIONES

La electricidad ha sido el motor del progreso en el siglo XX y la utilización de ella es una de las mayores preocupaciones que debemos tener como futuros Instaladores Eléctricos, en lo que se refiere a la selección de las Protecciones Eléctricas.

Como nos pudimos dar cuenta con este trabajo, se ha avanzado mucho en materia de seguridad, pero existe un gran riesgo difícil de eliminar y que es el control de la energía liberada por los arcos eléctricos en los aparatos y equipos eléctricos.

Cuando se realiza una desconexión de un aparato de maniobra o de protección, sea en forma manual (si se va a realizar algún trabajo o mantención en la instalación), o en forma automática (debido a la operación de la protección), no solo se abren los contactos del interruptor, sino que también debe ser apagado el arco eléctrico que se presenta cuando los contactos se abren.

Si no se tienen las precauciones necesarias, un arco eléctrico que tan solo dure 30 [ms], puede provocar grandes desperfectos en una instalación eléctrica.

Los arcos eléctricos, entre muchas causas, se generan cuando se reduce el aislamiento entre las partes conductoras a distinto potencial, lo cual puede ser debido a:

- Cargas mecánicas, térmicas o eléctricas muy elevadas.
- Sobre tensiones.
- Cuerpos extraños en el interior de los equipos de maniobra.

- Errores humanos al trabajar bajo tensión.

Las consecuencias de los arcos eléctricos son daños a las personas (quemaduras, problemas auditivos y oculares, lesiones por material desprendido), destrucción total o parcial de la instalación y daños a la infraestructura (por el aumento de temperatura) y pérdidas económicas por el cese prolongado en la producción y por los costos en las reparaciones.