



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES CUAUTITLÁN

“INTERRUPTOR DE POTENCIA 145kV TIPO TANQUE MUERTO”

T E S I S

**QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:
INGENIERO MECÁNICO - ELÉCTRICO**

P R E S E N T A:

REYES CASTILLO NAVARRO

ASESOR: ING. ÁNGEL ISAÍAS LIMA GÓMEZ

CUAUTITLÁN IZCALLI, ESTADO DE MÉXICO, 2018



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE
MÉXICO

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES CUAUTITLÁN
UNIDAD DE ADMINISTRACIÓN ESCOLAR
DEPARTAMENTO DE EXÁMENES PROFESIONALES

U. N. A. M.
FACULTAD DE ESTUDIOS
SUPERIORES-CUAUTITLÁN
ASUNTO: VOTO APROBATORIO

M. en C. JORGE ALFREDO CUÉLLAR ORDAZ
DIRECTOR DE LA FES CUAUTITLÁN
PRESENTE

ATN: I.A. LAURA MARGARITA CORTAZAR FIGUEROA
Jefa del Departamento de Exámenes Profesionales
de la FES Cuautitlán.

Con base en el Reglamento General de Exámenes, y la Dirección de la Facultad, nos permitimos comunicar a usted que revisamos el: **Trabajo de Tesis**

Interruptor de potencia 145kV tipo tanque muerto

Que presenta el pasante: **REYES CASTILLO NAVARRO**

Con número de cuenta: **41205204-2** para obtener el Título de la carrera: **Ingeniería Mecánica Eléctrica**

Considerando que dicho trabajo reúne los requisitos necesarios para ser discutido en el **EXÁMEN PROFESIONAL** correspondiente, otorgamos nuestro **VOTO APROBATORIO**.

ATENTAMENTE

"POR MI RAZA HABLARÁ EL ESPÍRITU"

Cuautitlán Izcalli, Méx. a 15 de enero de 2018.

PROFESORES QUE INTEGRAN EL JURADO

	NOMBRE	FIRMA
PRESIDENTE	Ing. Oscar Cervantes Torres	
VOCAL	Ing. José Gustavo Orozco Hernández	
SECRETARIO	Ing. Ángel Isaias Lima Gómez	
1er. SUPLENTE	Ing. Arturo Ávila Vázquez	
2do. SUPLENTE	Ing. Jorge Romero Pérez	

NOTA: los sinodales suplentes están obligados a presentarse el día y hora del Examen Profesional (art. 127).

LMCF/ntm*

AGRADECIMIENTOS

A Irene Navarro Duran, mi madre, por brindarme esta oportunidad y depositar su confianza en mí sabiendo que lo lograría, por sus sabios consejos, sus regaños y mostrarme el camino correcto para ser un hombre de bien... Gracias Mamá.

A Cristina Ruiz Ávila, mi esposa, por su apoyo en la conclusión de esta carrera, por ser una gran bendición que dios me ha mandado y que me exhorta día a día a seguir adelante y nunca conformarme... Gracias mi vida.

Al Ing. Ángel Isaías Lima Gómez, mi asesor, porque gracias a su tiempo invertido y su apoyo he logrado concluir con este trabajo... Gracias.

OBJETIVO GENERAL

Analizar y comprender el funcionamiento del interruptor de potencia de 145 kV tipo tanque muerto, usado en la industria eléctrica.

OBJETIVOS PARTICULARES

Estudiar los diferentes fenómenos que ocurren durante la interrupción del arco, sus causas y los medios de diseño para reducir sus efectos.

Conocer los procedimientos de las pruebas más comunes que se realizan en el interruptor de potencia 145kV.

INTRODUCCIÓN

Con el aumento del potencial en los sistemas eléctricos, así como el aumento en el consumo de energía, las exigencias para desarrollar interruptores de potencia más sofisticados de igual manera aumentan.

Los interruptores de potencia desde inicios de la distribución de la energía eléctrica han tenido una gran importancia, debido a que su comportamiento determina el nivel de confiabilidad que se puede tener en un sistema eléctrico de potencia. Un sistema eléctrico de potencia debe suministrar ininterrumpidamente la energía a toda carga conectada al mismo. Los usos de la energía eléctrica son variados sin embargo muchos de ellos tienen una importancia elevada como es en hospitales, centros de investigación, procesos de producción dentro de las empresas, etcétera.

Las cargas y las centrales de generación en la mayoría de ocasiones se separan por cientos de kilómetros, las líneas generalmente son aéreas o elevadas y se encuentran expuestas a la intemperie, por lo cual la probabilidad de que se interrumpan por causas externas tales como tormentas, caída de objetos, daño a los aisladores, etc., es muy grande. Una de las principales causas de interrupción del suministro continuo, es la falla en derivación o cortocircuito, que ocasiona un cambio súbito y a veces violento en la operación del sistema.

El interruptor debe ser capaz de interrumpir tanto las corrientes normales como las corrientes de falla, de esta manera se aísla con la mayor rapidez el material defectuoso del sistema. Se puede estar en reposo durante períodos largos y luego estar destinado a interrumpir en una fracción de segundo.

Si se intenta interrumpir una corriente eléctrica separando contactos se observa la formación de un arco eléctrico, que sigue sosteniendo la corriente, presentando simultáneamente cierta diferencia de potencial entre contactos.

Debido a su gran importancia dentro de la red, es preciso asegurar que los interruptores de potencia de cualquier subestación eléctrica se encuentren en buen estado para asegurar su correcto funcionamiento, con base a esto se practican en los interruptores diversos planes de mantenimiento, dentro de los cuales se incluyen diversas pruebas.

Para realizar con éxito las funciones anteriores, es necesario que el interruptor tenga un buen diseño mecánico para cumplir los requerimientos de apertura y cierre de sus contactos y un buen diseño eléctrico para asegurar que el interruptor soporte los esfuerzos eléctricos y térmicos a los que se somete durante su operación. El interruptor se vuelve más complejo conforme se incrementan las corrientes de corto circuito y las tensiones y, al mismo tiempo, cuando se reducen los tiempos de liberación de fallas. Este último requerimiento es con el propósito de mantener una estabilidad adecuada en el sistema eléctrico.

ÍNDICE

CAPITULO I EL FENÓMENO DEL ARCO ELÉCTRICO	1
1.1 INTRODUCCIÓN	2
1.2 FENÓMENO DEL ARCO ELÉCTRICO.....	2
1.2.1 Ionización	4
1.2.2 Mantenimiento del arco.....	4
1.2.3 Comportamiento térmico	4
1.2.4 Perdidas de calor del plasma.....	4
1.2.5 Propiedades esenciales del arco	5
1.2.6 Métodos para la extinción del arco.....	6
1.3 TEORÍAS PRINCIPALES DE INTERRUPCIÓN DE CIRCUITOS.....	8
1.3.1 Teoría de Slepian	9
1.3.2 Teoría del equilibrio de energía	9
1.4 CONSTANTES Y CONDICIONES DE LOS CIRCUITOS.....	10
1.4.1 El voltaje después de la corriente cero final	11
1.4.2 Efecto del factor de potencia del circuito	12
1.4.3 Efecto transitorio del voltaje de restablecimiento o tensión transitoria de restablecimiento (TTR)	12
1.4.4 Características del voltaje de restablecimiento (TTR).....	13
1.4.5 Factores que determinan las características del voltaje de restablecimiento.....	14
1.5 FUNCIONES DEL INTERRUPTOR.....	15
1.5.1 Interrupción en cortocircuito	16
1.5.2 Interrupción de corrientes inductivas pequeñas	16
1.5.3 Interrupción por capacitores.....	17
1.5.4 Interrupción asíncrona	18
1.5.5 Interrupción de falla de línea corta	18
CAPITULO II EL INTERRUPTOR DE POTENCIA Y SU CLASIFICACIÓN.....	20
2.1 EL INTERRUPTOR DE POTENCIA	21
2.2 CARACTERÍSTICAS Y ESPECIFICACIONES DE UN INTERRUPTOR DE POTENCIA	21
2.2.1 Voltaje nominal y voltaje nominal máximo.....	22
2.2.2 Corriente nominal	22

2.2.3 Frecuencia nominal	23
2.2.4 Capacidad interruptiva simétrica y asimétrica.....	23
2.2.5 Tensión de aislamiento	25
2.2.6 Capacidad de cierre.....	25
2.2.7 Ciclo de operación.....	26
2.2.8 Corriente nominal de tiempo cortó	27
2.3 PRINCIPIO DE OPERACIÓN	27
2.3.1 Proceso de apertura.....	27
2.3.2 Proceso de cierre.....	28
2.4 PARTES PRINCIPALES DE UN INTERRUPTOR DE POTENCIA.....	29
2.4.1 Cámaras interruptivas.....	29
2.4.2 Mecanismo de accionamiento o mando.....	31
2.4.3 Control.....	41
2.5 CLASIFICACIÓN DE LOS INTERRUPTORES DE POTENCIA	41
2.5.1 Clasificación de los interruptores por lugar de instalación.....	42
2.5.2 Clasificación por la ubicación de las cámaras.....	42
2.5.3 Clasificación de interruptores por el medio de extinción de arco	44
2.6 INTERRUPTORES EN ACEITE	45
2.6.1 Desarrollo de los interruptores en aceite	45
2.6.2 Interruptores en gran volumen de aceite	47
2.6.3 Cámaras para el control del arco	48
2.6.4 Interruptor en pequeño volumen de aceite	49
2.6.5 Cámaras de extinción usadas en interruptores de pequeño volumen de aceite	49
2.7 INTERRUPTOR NEUMÁTICO	51
2.7.1 Factores que influyen en el funcionamiento de los interruptores neumáticos.....	52
2.7.2 Desarrollo de los interruptores neumáticos	53
2.8 INTERRUPTORES EN VACÍO	55
2.8.1 Comportamiento del arco en el vacío	56
2.8.2 Estabilidad del arco en el vacío	56
2.8.3 Interrupción en vacío	58
2.8.4 Interrupción prematura o Corte de corriente.....	60
2.8.5 Materiales de los contactos	61
2.8.6 Construcción de los interruptores de vacío	61

2.8.7 Aplicación de los interruptores en vacío	62
2.9 INTERRUPTORES EN GAS HEXAFLUORURO DE AZUFRE (SF6)	63
2.9.1 Partes esenciales de un interruptor de SF6	65
2.9.2 Tipo soplador	66
2.9.3 Autosoplado	68
CAPITULO III EL INTERRUPTOR 145kV TIPO TANQUE MUERTO	70
3.1 INTERRUPTOR 145 kV TIPO TANQUE MUERTO	71
3.1.1 Características y ventajas clave	71
3.2 COMPONENTES PRINCIPALES DEL INTERRUPTOR 145 KV	72
3.2.1 Tanques de polo horizontales	73
3.2.2 Transformadores de corriente	74
3.2.3 Bujes de entrada	75
3.2.4 Cámara de extinción.....	76
3.2.5 Varillaje Interpolar	78
3.2.6 Mecanismo con gabinete	78
3.2.7 Manivelas de transmisión	79
3.2.8 Gabinete de Control	79
3.3 DIMENSIONES Y BASE.....	80
3.4 OPERACIÓN DEL INTERRUPTOR	81
3.4.1 Interrupción a corrientes altas.....	82
3.4.2 Interrupción a corrientes bajas	82
3.4.3 Operación de cierre de la cámara de extinción	83
3.5 CARACTERÍSTICAS FÍSICAS Y QUÍMICAS DEL GAS SF6	83
3.5.1 Propiedades de enfriamiento del SF6	85
3.5.2 Comportamiento del gas SF6 en el arco	86
CAPITULO IV PRUEBAS DE RUTINA Y PROTOTIPO EN LOS INTERRUPTORES DE POTENCIA.....	87
4.1 INTRODUCCIÓN	88
4.2 PRUEBAS DE FÁBRICA.....	89
4.2.1 Pruebas de prototipo	89
4.2.2 Pruebas de rutina	90
4.2.3 Pruebas opcionales	90

4.3 PRUEBAS DIELECTRICAS	90
4.3.1 Prueba de potencial aplicado.....	90
4.3.2 Prueba de impulso por rayo.....	90
4.3.3 Condiciones del interruptor durante las pruebas dieléctricas.....	91
4.3.4 Criterios para pasar la prueba.....	91
4.3.5 Pruebas de contaminación artificial.....	92
4.4 PRUEBA DE VOLTAJE DE RADIO INTERFERENCIA (R.I.V.)	92
4.5 MEDICIÓN DE LA RESISTENCIA DE CIRCUITOS	94
4.6 PRUEBA DE ELEVACIÓN DE TEMPERATURA.....	94
4.7 PRUEBA DE CORRIENTE PICO Y DE CORRIENTE INSTANTÁNEA	97
4.8 PRUEBAS DE HERMETICIDAD	98
4.8.1 Sistemas sellados de presión.....	98
4.9 PRUEBA DE COMPATIBILIDAD ELECTROMAGNÉTICA (EMC).....	98
4.10 PRUEBA DE OPERACIÓN MECÁNICA	99
4.11 PRUEBAS DE CORTOCIRCUITO	100
4.12 PRUEBAS DE FALLA A TIERRA	101
4.13 PRUEBAS DE FALLA DE LÍNEA CORTA.....	102
4.14 PRUEBAS DE INTERRUPCIÓN DE CORRIENTES INDUCTIVAS (REACTORES).....	102
4.15 PRUEBAS DE INTERRUPCIÓN DE CORRIENTES CAPACITIVAS.....	102
4.16 VERIFICACIÓN VISUAL Y DEL DISEÑO	103
4.17 VERIFICACIÓN DEL GRADO DE PROTECCIÓN	103
4.18 PRUEBAS DE TEMPERATURAS EXTREMAS	104
4.19 PRUEBA DE HUMEDAD.....	105
4.20 PRUEBAS DE CAMPO	105
4.20.1 Medición de resistencia de polo	105
4.20.2 Medición de humedad en el gas	105
4.20.3 Chequeo de fugas.....	106
4.21 Pruebas operaciones y de temporización	106
CONCLUSIONES	107
ANEXO 1	108
BIBLIOGRAFÍA.....	109

CAPITULO I EL FENÓMENO DEL ARCO ELÉCTRICO

1.1 INTRODUCCIÓN

En los sistemas eléctricos de potencia los valores tanto de voltaje como de corriente son en su mayoría elevados. Los métodos de interrupción del flujo de corriente son dos; reduciendo a cero el potencial que lo genera y separando físicamente los contactos, por motivos de maniobrabilidad el segundo método es más usual. A causa de esto, llevar a cabo una interrupción de las líneas bajo condiciones de carga, cualquiera que sea el motivo (mantenimiento, maniobra en las líneas, cortocircuito, etc.) nos genera el fenómeno conocido como arco eléctrico.

La generación del arco eléctrico se debe a la ionización del medio (creación de iones libres) el cual se vuelve conductor. Sin embargo el arco puede depender de distintos factores como la forma y separación de los electrodos, el voltaje, la presión, etc. El arco eléctrico genera una gran cantidad de energía manifestándose en forma de calor principalmente, el cual favorece a la ionización.

Para extinguir el arco es necesario llevar a cabo una desionización. Se puede lograr la desionización mediante la apertura del interruptor en el instante del cruce por cero de la onda de corriente así como disminuyendo la temperatura y aumentando la resistencia de este.

Se necesita conocimiento de los fundamentos de la teoría del arco para entender el proceso de interrupción de corriente en un interruptor de potencia.

1.2 FENÓMENO DEL ARCO ELÉCTRICO.

En los interruptores de potencia se presenta el fenómeno del arco eléctrico al separarse los contactos energizados, es decir, bajo flujo de corriente o carga conectada. La generación del arco se debe a la ionización del medio entre los contactos cuando estos se separan, haciendo al medio conductor, lo cual facilita la circulación de corriente.

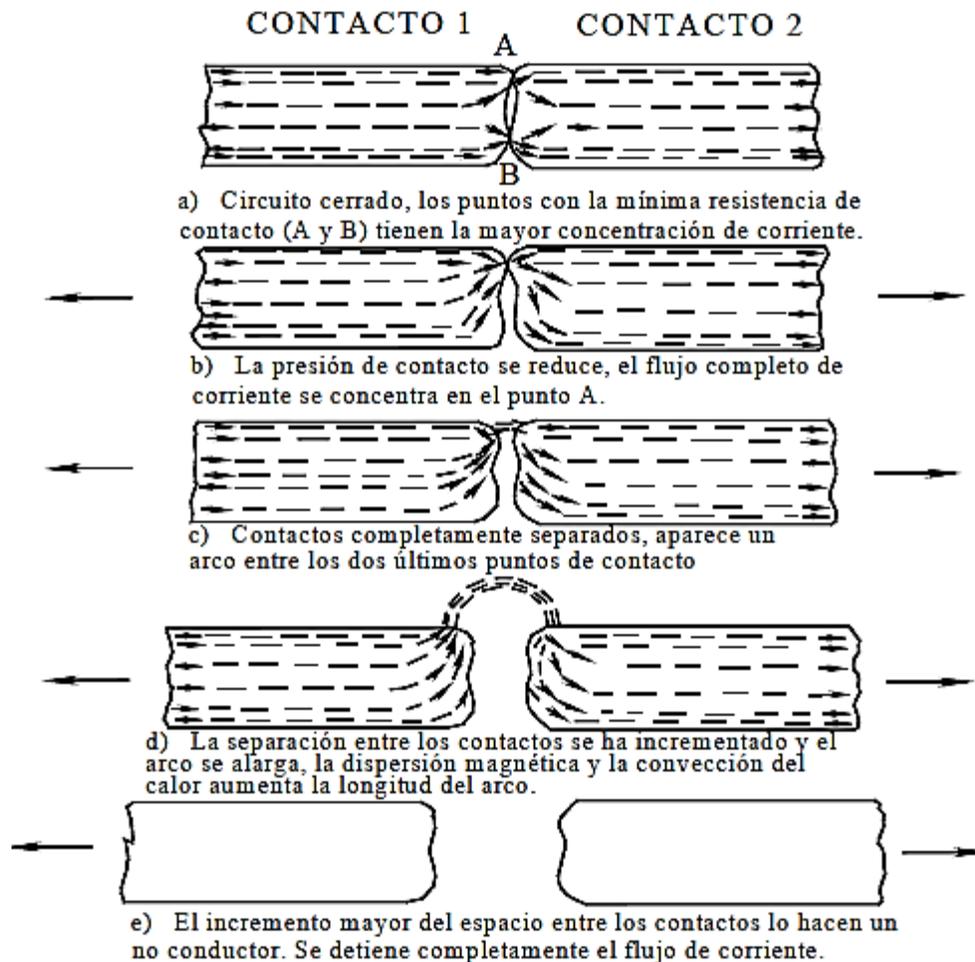


Fig. 1-1 Proceso de apertura de un circuito en aire.

Existen dos formas para interrumpir el flujo de la corriente: reduciendo a cero el potencial que lo genera y separando físicamente el conductor del flujo de corriente. Esta última, es la más usada para lograr dicha interrupción.

El estudio de este fenómeno es de gran importancia para el diseño y las características de operación de los interruptores.

Se sabe que el fenómeno del arco eléctrico depende de:

- 1) La naturaleza y la presión P del medio.
- 2) Los agentes externos presentes, ionizantes y deslizantes.
- 3) El voltaje V entre los electrodos y su variación con el tiempo.
- 4) La naturaleza, forma y separación de los electrodos.
- 5) La naturaleza y forma del recipiente y su posición con relación a los electrodos.

1.2.1 Ionización

La ionización es un proceso donde se desprenden uno o más electrones de un átomo o molécula, esto provoca la descomposición de los átomos eléctricamente neutros, en iones con carga positiva y electrones con carga negativa. El arco eléctrico genera una descarga capaz de producir por sí misma la cantidad de iones y electrones necesarios para mantener la circulación de corriente en el seno de una masa gaseosa.

1.2.2 Mantenimiento del arco

Con la iniciación del arco entre los electrodos se liberan suficientes electrones del cátodo y que al moverse hacia el ánodo hacen que el medio se ionice, la ionización del medio provoca una rápida creación de electrones que sirven para mantener el arco después de haber cesado, en gran parte, la emisión de campo. En consecuencia, cada electrón emitido se multiplica en número derivando energía del campo, el proceso de difusión y recombinación continúa reponiendo al ánodo los electrones perdidos; finalmente, si la corriente es alta, la descarga toma la forma de un arco, con temperatura lo suficientemente elevada como para convertirse en la fuente principal de conductividad eléctrica.

1.2.3 Comportamiento térmico

Durante el proceso de interrupción, se genera una descarga de arco entre los contactos del interruptor y se libera una gran cantidad de energía, la mayor parte en forma de calor. Esta energía puede ser muy grande y ocasionar daños a los contactos del interruptor, vaporización del medio interruptivo, aumento de la presión en el interior de las cámaras, etc. Para evitar los daños que puede sufrir un interruptor, se requiere reducir el tiempo de arqueo.

En los interruptores de corriente alterna esto se logra con la desionización de la trayectoria del arco, mediante la apertura del interruptor en el instante del cruce por cero de la onda de corriente.

Si el arco de C.A. se interrumpe bruscamente, se genera un transitorio de tensión entre los contactos del interruptor, debido a la inductancia del circuito. La interrupción o extinción del flujo de corriente en el circuito ocurre en el instante en el que la corriente llega a cero. En otras palabras, el arco de C.A. sincroniza el instante de apertura del circuito con el cruce por cero de la corriente, independientemente del instante en que se separan los contactos.

El proceso de interrupción termina cuando el plasma conductor pierde su conductividad.

1.2.4 Perdidas de calor del plasma

Hay tres formas en que pierde calor una columna de arco:

- Conducción.
- Convección.
- Radiación.

Las pérdidas que ocurren en un interruptor son únicamente por conducción y por convección, ya que por radiación es despreciable. En los interruptores en aceite se forman arcos en las toberas o tubos y en las ranuras angostas, por lo que casi todas las pérdidas son por conducción. Para interruptores de soplo de aire, la pérdida de calor es por conducción y convección, al igual que en arcos que se forman en aire.

1.2.5 Propiedades esenciales del arco

Si se trazan los valores instantáneos del voltaje e_b entre los electrodos de un arco en acción, en confrontación con los valores correspondientes de la corriente, se obtienen las características del arco; al aumentar la corriente del arco la temperatura se eleva y el proceso de ionización se vuelve más activo aumentando con ello la conductividad del medio y, como consecuencia, disminuye el voltaje del arco. El incremento de la corriente en el intervalo superior aumenta la conductividad, pero tiene un efecto menos marcado sobre el voltaje; el corte inicial del entrehierro, requiere un alto voltaje de ignición e_z o corriente cero. Se ve también que, cambiando el régimen de variación de la corriente, la característica se desplaza; si la corriente cambia rápidamente en función del tiempo, se dice que las características son dinámicas, y si el régimen de cambio de la corriente es pequeño, las características se conocen como estáticas.

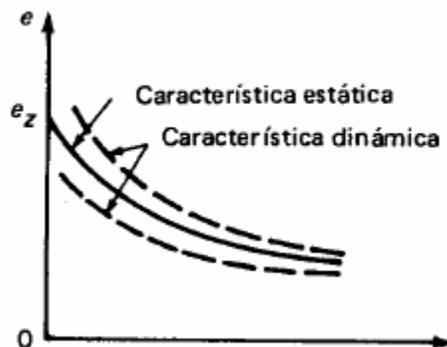


Fig. 1-2 Características estáticas y dinámicas.

Sí la corriente que pasa por el arco cambia súbitamente, se encuentra que el voltaje entre los extremos del arco no toma el valor correspondiente al nuevo valor de la corriente, siendo las características estáticas, en consecuencia, sí la corriente aumenta súbitamente se encuentra que el valor del voltaje entre los extremos del arco es más que el valor dado por las características estáticas. La razón es que, a cualquier corriente dada, el arco y sus alrededores tienen un contenido de calor, representado por el gas calentado, ionizado y disociado.

Cuando la corriente desciende desde un valor lo suficientemente alto, la transición es enteramente un efecto de la temperatura. Esto significa que, con la temperatura en descenso, la transición puede efectuarse a diversos valores instantáneos de la corriente, dependiendo del régimen de descenso de la corriente.

En consecuencia, cuando la corriente está en descenso rápido, el valor al que ocurre la transición puede ser mucho menor que cuando la corriente está en descenso lento, esta es una razón por la que generalmente no se observan tales transiciones en los interruptores de alterna para corrientes altas; la distribución del voltaje a lo largo del arco no es lineal.

Se sabe que muy próxima al cátodo existe una carga positiva y negativa cerca del ánodo; ambas producen gradientes de alto voltaje en comparación con el de la corriente principal del arco, y los descensos fuertes de voltaje correspondientes son e_k y e_a respectivamente. El descenso de voltaje a lo largo de la corriente principal del arco e_1 , es proporcional a la longitud y depende de la propiedad del gas y de las condiciones en las cuales existe el gas, los gases con mayores gradientes de voltaje a lo largo de la corriente principal del arco tienen mejores propiedades para la extinción del arco.

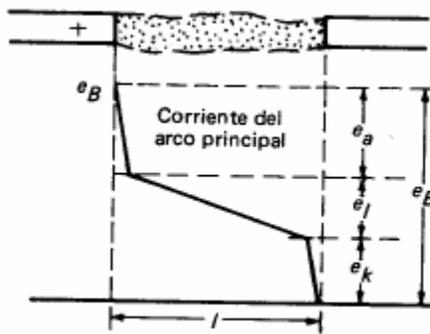


Fig. 1-3 Distribución del voltaje a lo largo del arco.

1.2.6 Métodos para la extinción del arco

La interrupción de un circuito de C.D. y de C.A. implica procesos distintos debido a la naturaleza de las corrientes. En el caso de circuitos de C.D. no existen valores de corriente cero, ni tiempos donde la corriente sea cero. Por lo tanto, para lograr la interrupción, la corriente debe ser forzada hasta alcanzar un valor de cero. Esto se logra aumentando la resistencia del arco hasta que su caída de tensión sea igual a la tensión del circuito, lo que se efectúa con la elongación del arco o la reducción forzada del arco.

Para el caso de circuitos de C.A. sí ocurren valores de corriente cero. Por lo tanto, para lograr la interrupción, sólo es necesario impedir el reencendido del arco después de un valor de corriente cero. Esto, se logra con la desionización del entrehierro formado entre los contactos del interruptor.

En términos generales, se conocen dos métodos de extinción del arco eléctrico en los interruptores:

- Interrupción por alta resistencia.
- Interrupción por baja resistencia.

Interrupción por alta resistencia.

En este caso, el objetivo es incrementar la resistencia del arco en función del tiempo y reducir la corriente hasta lograr la extinción. La desventaja principal de este método de interrupción es la gran cantidad de energía disipada, por lo tanto, sólo se usa en interruptores de baja y mediana tensión, así como en interruptores de corriente directa.

Para incrementar la resistencia del arco se emplean las técnicas siguientes:

Alargamiento del arco. En este caso la resistencia es proporcional a la longitud de arco, alargando el arco su resistencia aumenta.

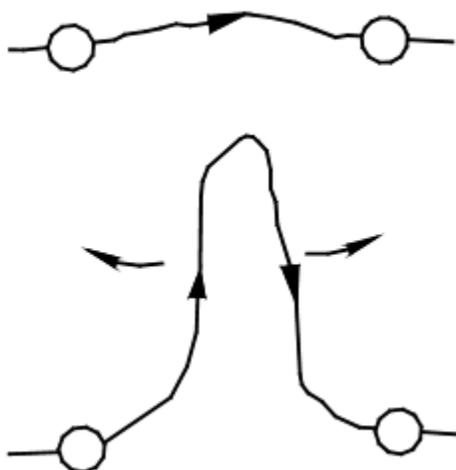


Fig. 1-4 Representación del alargamiento del arco.

Enfriamiento del arco. La tensión requerida para mantener la ionización aumenta cuando la temperatura del plasma disminuye, por lo que enfriándolo su resistencia aumenta.

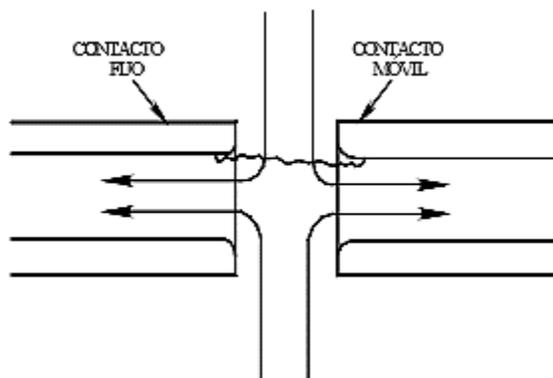


Fig. 1-5 Representación de enfriamiento del arco.

División del arco. La cámara de arqueo está formada por varias láminas paralelas aisladas entre sí. El arco se divide en pequeños arcos en serie, estos se enfrían por alargamiento mientras ascienden en dos cámaras contiguas.

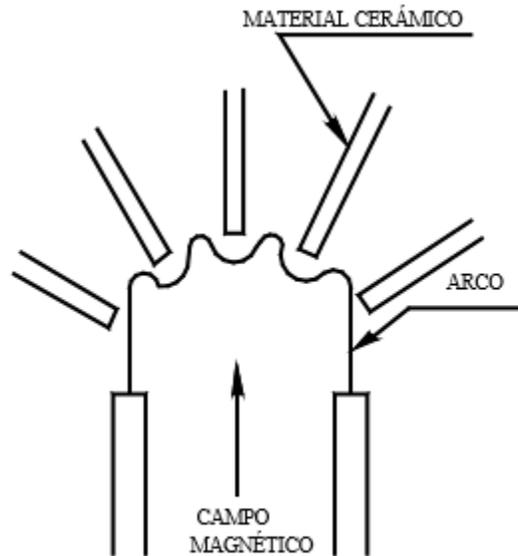


Fig. 1-6 Representación de la división de arco.

Constricción del arco. A medida que a un gas ionizado se le va forzando a pasar por un ducto que se va estrechando, se requiere un incremento en la tensión para mantener el arco.

La principal desventaja de este tipo de interrupción es que la energía disipada es alta, y por lo tanto, solo se usa en interruptores de potencia baja y media, y en interruptores de c.d.

Interrupción por baja resistencia o de corriente cero.

Este método se emplea para la interrupción de arcos de corriente alterna aprovechando que el arco se extingue por sí solo, 120 veces por segundo en un sistema de 60 Hz, cada vez que la corriente cruza por cero. Este fenómeno es más conocido como histéresis del arco. El fenómeno del arco es muy complicado y puede explicarse por distintas teorías.

1.3 TEORÍAS PRINCIPALES DE INTERRUPCIÓN DE CIRCUITOS

La complejidad del comportamiento del arco durante el proceso de interrupción, ha provocado el desarrollo de modelos que describen este proceso. Los primeros modelos estaban concentrados en la región de corriente cero. Los modelos recientes se enfocan en calcular el

diámetro del arco en la corriente máxima. Estos modelos son una aproximación del fenómeno de interrupción. A continuación se presenta un resumen de las principales teorías.

1.3.1 Teoría de Slepian

La teoría Slepian, también conocida como teoría de carrera, establece que la interrupción se logra siempre que la fuerza dieléctrica del entrehierro se incremente más rápidamente que la tensión del sistema.

Este proceso inicia inmediatamente después del cruce por cero, cuando los electrones son forzados a alejarse del cátodo creando una zona o capa de iones positivos en la región del cátodo.

La Fig. 1-7 muestra la representación gráfica de esta teoría, en donde se presentan dos casos. El primero donde la fuerza dieléctrica del entrehierro se incrementa más rápido que la tensión del sistema y no ocurre el reencendido. En el segundo caso, la tensión del sistema crece más rápido que la fuerza dieléctrica del entrehierro y por lo tanto ocurre el reencendido.

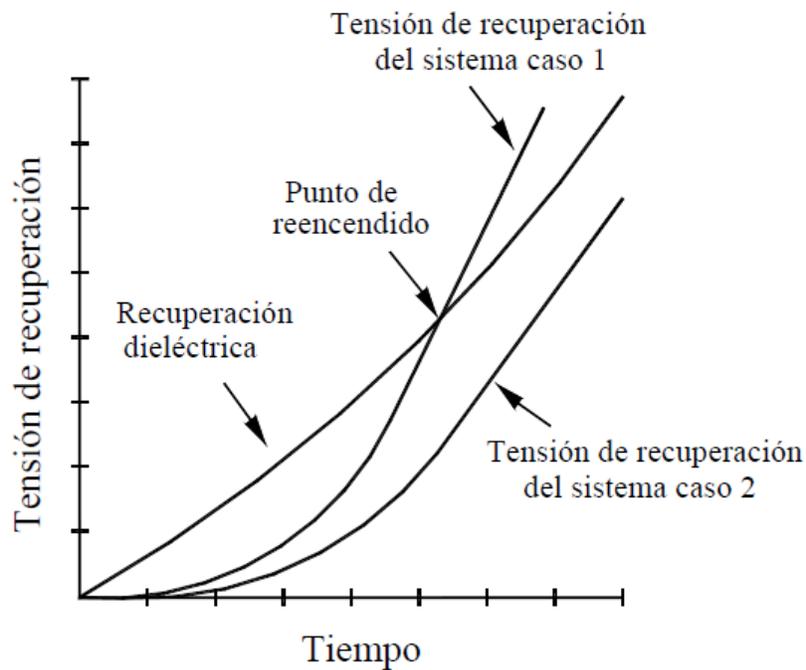


Fig. 1-7 Representación gráfica de la teoría de Slepian.

1.3.2 Teoría del equilibrio de energía

Con el desarrollo de los interruptores de soplo de gas, en los que podían existir cantidades muy grandes de conductividad post-arco, pudiéndose todavía interrumpir el circuito, los altos regímenes de elevación del voltaje de restablecimiento no tenían un efecto tan marcado en el interruptor como

era de esperarse. Esto condujo a la consideración de que el período post-cero podía explicarse mejor en función de un equilibrio de energía, que como una carrera por el logro de resistencia eléctrica.

Cassie sugirió que, fundamentalmente, el restablecimiento o la interrupción del arco es un proceso de equilibrio de energía. Si la alimentación de energía al arco subsecuente a la corriente cero, continúa aumentando, el arco se restablece y si no, se interrumpe el circuito. La interrupción eficaz del arco, seguida de una corriente cero, implica el incremento del voltaje de reiniciación a un valor que rebasa cualquier voltaje que pueda producir el circuito entre los extremos del arco. El equilibrio posterior a la corriente cero no es la única manera en la que pueden operar los interruptores, al tratar el problema de la conductividad post-arco, es necesario adentrarse en el funcionamiento de los interruptores de soplo de gas.

Durante la interrupción del arco, aparecen los siguientes fenómenos:

- a) Altas temperaturas debido al plasma creado por el arco.
- b) Altas presiones debido a la alta temperatura del plasma.
- c) 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.
- d) Masas metálicas en movimiento (contacto móvil) que se aceleran en pocas milésimas de segundo hasta adquirir velocidades del orden de 10 metros entre segundo.
- e) Esfuerzos mecánicos debidos a la corriente de cortocircuito.
- f) Esfuerzos dieléctricos debidos a la tensión de restablecimiento.

1.4 CONSTANTES Y CONDICIONES DE LOS CIRCUITOS

Mientras se cierra o se abre un interruptor, las constantes del circuito L , C y R tienen una función muy importante, en la práctica se ha observado que en un interruptor que funciona correctamente en un punto del sistema, puede no hacerlo en otro, lo cual demuestra que las condiciones del sistema tienen cierta incidencia sobre su comportamiento.

Las acciones de interrupción y ciertas fallas, producen sobrevoltajes. En la Fig. 1-8 se muestran las magnitudes típicas de los sobrevoltajes. Estas son ocasionadas por la energía residual (ya sea eléctrica, electromagnética o de ambas clases), es decir, la energía almacenada en la capacitancia o en la inductancia o en ambas cuando hay por la interrupción del circuito, un cambio de un estado estable a otro.

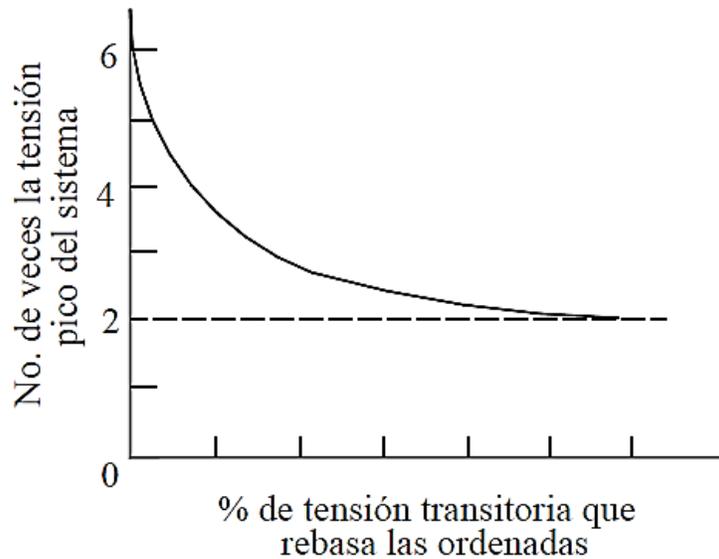


Fig. 1-8 Magnitudes de los sobrevoltajes debidos a interrupción y fallas.

1.4.1 El voltaje después de la corriente cero final

El funcionamiento de los interruptores en la interrupción de las corrientes de cortocircuito depende de varios factores que se consideran como condiciones severas.

La corriente y el voltaje de cortocircuito muestran que al efectuarse la interrupción al cruce por cero de la corriente, el voltaje que aparece en las terminales del interruptor tiene una influencia importante en su funcionamiento. De hecho, la interrupción exitosa de la corriente depende de este voltaje, como se ve en la fig. 1-9, tiene dos componentes: la primera (inmediatamente después de la interrupción), llamado voltaje de restablecimiento y la segunda (después de que se amortiguan las oscilaciones) que alcanza el voltaje de 60 Hz, llamado voltaje de recuperación. A continuación se definen ambos:

- *Voltaje de recuperación:* Se define como el voltaje rms de frecuencia normal que aparece entre los polos del interruptor después de la extinción final del arco.
- *Voltaje de restablecimiento:* Se define como el voltaje transitorio que existe en la pausa de corriente cero o en gran proximidad al alcance de dicha pausa, durante el tiempo de arqueo.

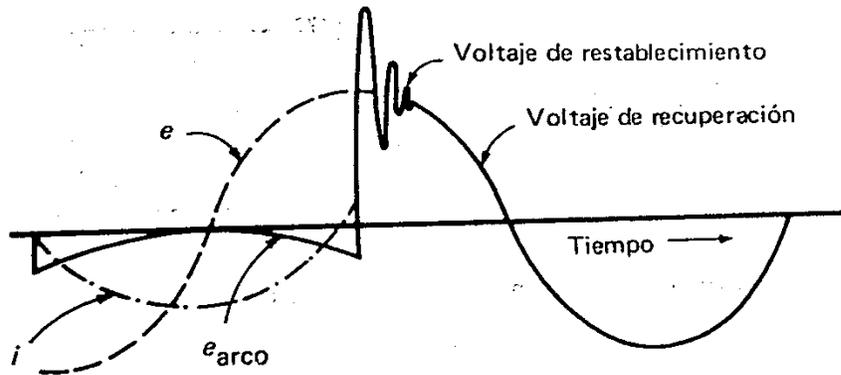


Fig. 1-9 Formas de las ondas del voltaje de restablecimiento.

1.4.2 Efecto del factor de potencia del circuito

El valor instantáneo del voltaje de recuperación depende del factor de potencia, es claro por lo tanto, que un cortocircuito reactivo es mucho más difícil de interrumpir que un cortocircuito resistivo de la misma corriente y el mismo voltaje, en vista que el voltaje instantáneo de recuperación es alto en el primer caso (ver Fig. 1-10), en comparación con el del último caso.

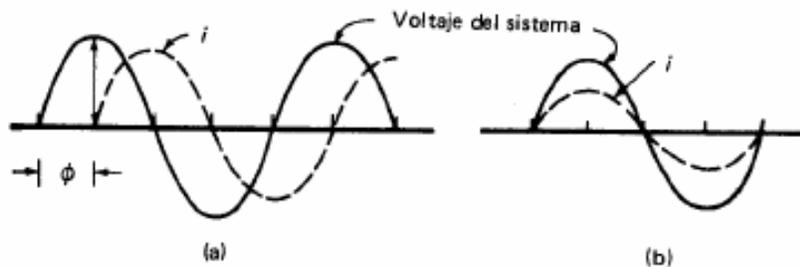


Fig. 1-10 Efecto del factor de potencia.

1.4.3 Efecto transitorio del voltaje de restablecimiento o tensión transitoria de restablecimiento (TTR)

Eléctricamente, un sistema de fuerza es una red oscilatoria, por lo que es de esperar que la interrupción de la corriente de falla dé origen a una magnitud transitoria cuya frecuencia depende de las constantes del circuito.

Este voltaje transitorio se conoce como voltaje de restablecimiento y que ocurre inmediatamente después de la extinción del arco. El voltaje del arco entre los contactos, en este instante, es normalmente bajo, mientras que el voltaje de la frecuencia de fuerza que priva en el circuito, está en su valor máximo o cerca de él.

El voltaje de restablecimiento v_c , que se desarrolla entre los contactos abiertos del interruptor, está dado por:

$$v_c = \frac{E_{m\acute{a}x}}{L} \left[\frac{1}{\rho(p^2 + \omega^2)} \right]$$

en donde $\omega = 1/\sqrt{LC}$ y $E_{m\acute{a}x}$ = valor máximo del voltaje de recuperación.

Transformado de nuevo a una función del tiempo,

$$v_c = E_{m\acute{a}x}(1 - \cos \omega t)$$

El valor máximo del voltaje de restablecimiento v_c es $2E_{m\acute{a}x}$ y ocurre en el momento $t = \pi/\omega$, que es igual a $\pi\sqrt{LC}$. El voltaje oscilatorio transitorio tiene una frecuencia de $1/2 \pi\sqrt{LC}$ hertz.

1.4.4 Características del voltaje de restablecimiento (TTR)

Las características más importantes del voltaje de restablecimiento las cuales influyen en el funcionamiento del interruptor, son: a) el factor de amplitud, b) el régimen de elevación del voltaje de restablecimiento (REVR).

- a) *Factor de amplitud*: El factor de amplitud se define como la relación del valor máximo del voltaje transitorio al valor máximo del voltaje de frecuencia del sistema BS 116 especifica la norma para evaluar el factor de amplitud.

$$S = \frac{V_R}{E\sqrt{2}}$$

Donde:

$$V_R = SE\sqrt{2}$$

S = Factor de amplitud

$E\sqrt{2}$ = Valor eficaz de la onda fundamental

Teóricamente, puede alcanzar el valor de 2; pero por lo regular, en la práctica no suele exceder de 1.5.

- b) *Régimen de elevación del voltaje de restablecimiento (REVR)*: El REVR se define como la pendiente de la tangente, de pendiente más pronunciada a la curva de voltaje de restablecimiento. Se expresa en voltios por microsegundo. Para un voltaje de restablecimiento que tenga una componente transitoria de una sola frecuencia, el REVR se obtiene dividiendo la amplitud máxima de la oscilación entre la duración de la primera media onda, los valores mayores de la frecuencias naturales pueden relacionarse con regimenes de elevación del voltaje de restablecimiento más altos. El servicio del interruptor es mucho más intenso cuando se usa en una red de frecuencia natural alta, y no en una red de frecuencia natural baja, porque el REVR promedio es mucho mayor en el primer caso, en el último caso, el voltaje entre los contactos del interruptor se eleva lentamente, dando por ello más tiempo para la acumulación de la resistencia dieléctrica.

1.4.5 Factores que determinan las características del voltaje de restablecimiento

La razón de crecimiento del voltaje de restablecimiento y su valor máximo ocasionan esfuerzos en el entrehierro de los contactos que dependen de la configuración de la red, de su frecuencia natural y de la posición relativa de las resistencias (conectadas en paralelo o en serie con la capacitancia principal del circuito), como se ilustra en la Fig. 1-11.

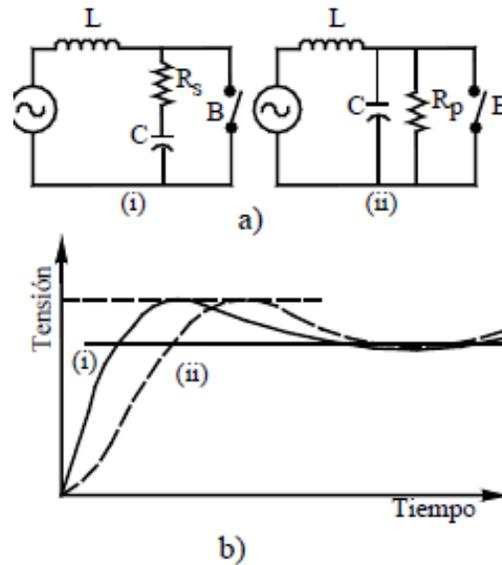


Fig. 1-11 a) Circuitos típicos de interrupción con resistencias en serie y en paralelo con la capacitancia del circuito. b) Curvas de la TTR de los circuitos.

La presencia de resistencias en el sistema amortiguan esta razón de crecimiento. También existen otros factores que tienen influencia directa, éstos son: resistencia del conductor, pérdidas en el entrehierro, pérdidas dieléctricas, etc. Tales factores varían en función de la frecuencia y la tensión. En una red formada por generadores, transformadores, reactores y líneas de transmisión, cada elemento ejerce su propio amortiguamiento. Por lo general, la atenuación debida a estos elementos es pequeña. Cuando se esperan valores altos del REVR, se emplean interruptores con resistencias en paralelo, el valor de tales resistencias R_p necesaria para lograr el amortiguamiento crítico es de $1/2 \sqrt{LC}$.

La resistencia conectada en paralelo con terminales del interruptor, modifica la TTR en una onda periódica (curva V_c). La incorporación de la resistencia en paralelo incrementa la capacidad interruptiva del interruptor.

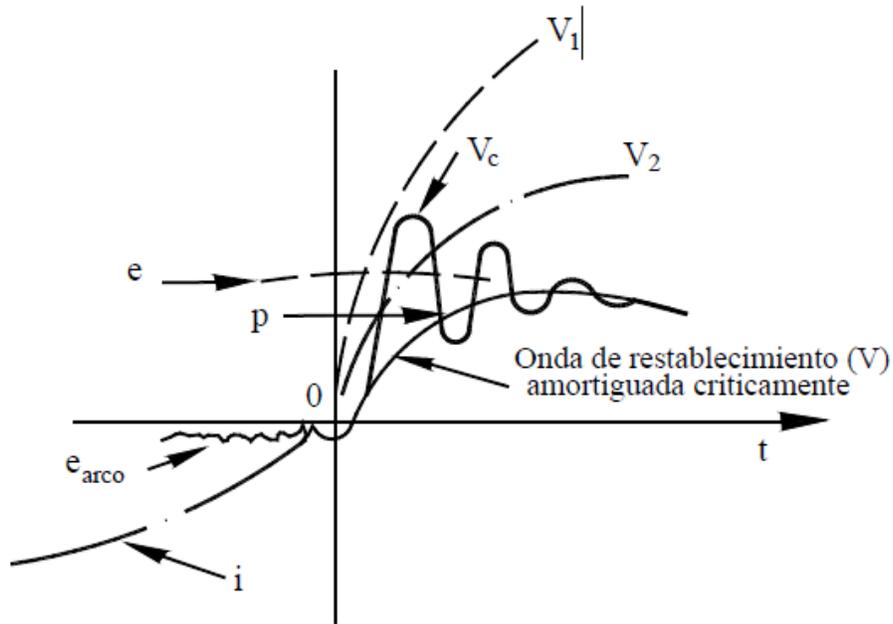


Fig. 1-12 Voltaje de restablecimiento amortiguado críticamente.

1.5 FUNCIONES DEL INTERRUPTOR

Los interruptores normalmente trabajan bajo diferentes circunstancias, estos pueden estar sujetos a esfuerzos sumamente variables. Las variaciones de corriente son desde unos cuantos amperes, debido a la corriente en vacío de un transformador, hasta las corrientes más intensas de cortocircuito, las cuales pueden ser hasta centenares de kiloamperes. La impedancia del circuito puede cambiar en la primera fracción, de 10^{-4} a 10^{-3} segundos, a causa de que las líneas abiertas o los cables conectados a las barras de distribución en el interruptor se comportan inicialmente como resistencias (teniendo los valores de sus impedancias de fluctuación), pero más adelante como capacitores. Si las corrientes de carga son más o menos óhmicas, las corrientes de cortocircuito son puramente inductivas, y las corrientes de las líneas no cargadas son principalmente capacitivas.

Los interruptores no solo deben abrir, también deben cerrar el circuito. Esto conlleva ciertos problemas, principalmente cuando el interruptor cierra sobre un cortocircuito. En este caso, el voltaje de interrupción que puentea al entrehierro de los contactos antes de que se toquen, produce un arco de alta corriente que funde los contactos antes de su cierre. Esta situación no es conveniente debido a que el interruptor debe de poder abrir los contactos nuevamente.

Las principales funciones que debe realizar un interruptor, además de satisfacer las capacidades nominales de interrupción y los tiempos nominales de logro e interrupción del contacto, son:

- Interrupción en cortocircuito
- Interrupción de corrientes inductivas pequeñas
- Interrupción por capacitores

- d) Interrupción asincrónica
- e) Interrupción de fallas de líneas cortas

1.5.1 Interrupción en cortocircuito

La corriente de cortocircuito depende del voltaje E y de la reactancia en serie X , después de que se extingue el arco en el cero natural de la forma de corriente de frecuencia nominal, el circuito se recupera y se imprime un voltaje transitorio de restablecimiento, o voltaje transitorio de recuperación (VTR) entre las terminales del interruptor. La magnitud y la forma de la onda del VTR son muy importantes para el interruptor.

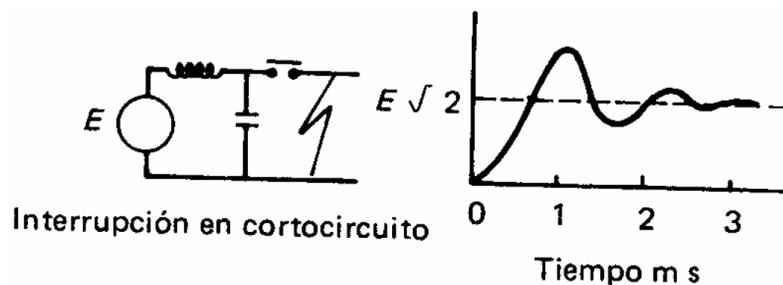


Fig. 1-13 Interrupción de un cortocircuito.

1.5.2 Interrupción de corrientes inductivas pequeñas

La corriente magnetizante del transformador es bastante pequeña, por lo que su interrupción no constituye problema alguno para el interruptor.

La supresión de estas corrientes antes del cero natural, ocasiona peligrosos sobrevoltajes hasta de 3.0 pu entre los extremos de la inductancia.

Es necesario proveer algunos dispositivos de protección tales como resistencias paralelas al interruptor, a través de las cuales pueda descargarse la energía del transformador sin ocasionar sobrevoltajes excesivos, o bien, apartarrayos.

Cierto tipo de interruptores pueden restablecer la conexión eléctrica cuando el voltaje en terminales del interruptor se deprime a cero, el voltaje en la inductancia reaparece subsecuentemente y a menudo es más pequeño que el voltaje si no se ha efectuado la reconexión (curva punteada).

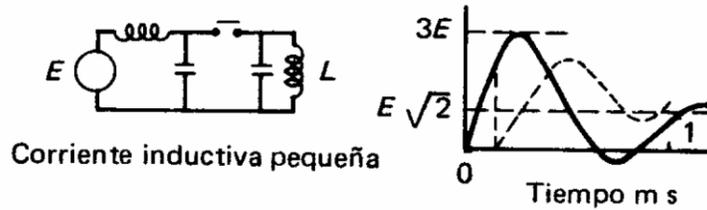


Fig. 1-14 Corrientes inductivas pequeñas.

1.5.3 Interrupción por capacitores

La interrupción de las líneas de transmisión no cargadas, o la de bancos de capacitores, impone a los interruptores la función de interrumpir corriente capacitiva con factor de potencia en adelante, esto puede ocasionar voltajes anormalmente altos entre las terminales del entrehierro del interruptor si éste restablece la conexión. En la fig. 1-15 puede verse que en **A**, cuando se alcanza la corriente capacitiva cero, la línea de transmisión está al voltaje máximo, de manera que, cuando ocurre la interrupción de la línea se deja en una condición de carga completa hasta este valor máximo del voltaje generado; después del instante **A**, el entrehierro del interruptor queda sujeto a diferencias de voltaje V_c y V_g . Después de un intervalo de medio ciclo a partir de **A**, es decir, en el instante **B**, el voltaje entre las terminales del interruptor es igual al doble del valor máximo de V_g , dentro de este corto intervalo de medio ciclo, el interruptor ha estado sujeto a una condición severa y puede restablecer la conexión. Si se presenta esta condición, el voltaje entre las terminales del interruptor descende casi instantáneamente desde 2 veces el valor máximo de V_g hasta cero, al suceder esto, se establecen oscilaciones de alta frecuencia que van haciendo ascender el voltaje hasta -3 veces el valor máximo de V_g .

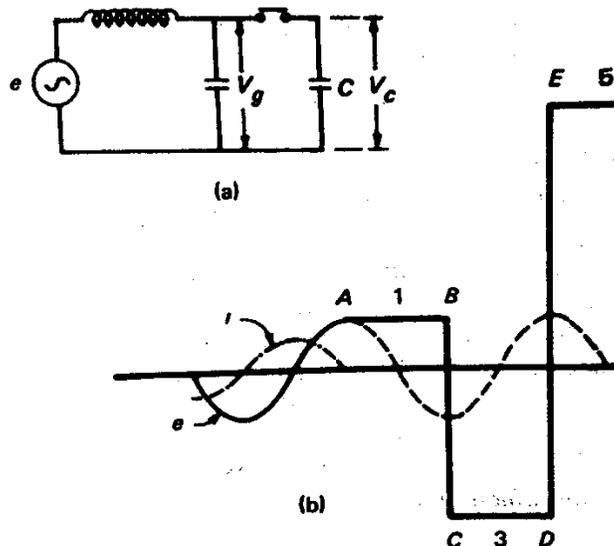


Fig. 1-15 Interrupción de la corriente de capacitancia.

La corriente de restablecimiento alcanza el valor cero, el cual proporciona una oportunidad para interrumpir; la línea se carga a un voltaje de -3 veces el valor máximo de V_g a tierra, después de la interrupción de la corriente de restablecimiento, en esta etapa, inmediatamente después de C , el voltaje entre las terminales del interruptor es sólo del doble valor máximo de V_g , debido a que el voltaje generado es máximo negativo. El voltaje entre los extremos del entrehierro continúa creciendo y, en D , alcanza un valor igual a 4 veces el valor máximo de V_g ; si el interruptor restablece nuevamente en este punto, los eventos de B se repetirán en una escala aún más grande, ya que la oscilación del voltaje será ahora de 8 veces el valor máximo de V_g y la línea puede dejarse aislada a un potencial de 5 veces el valor máximo de V_g a tierra. Teóricamente, este fenómeno puede continuarse indefinidamente, aumentando el voltaje por incrementos sucesivos de 2 veces el valor máximo de V_g , y sólo está limitado por las fugas y las pérdidas por corona o por la rotura del aislamiento el sistema, la única causa de este tipo de sobrevoltaje es la incapacidad del interruptor para proveer resistencia dieléctrica adecuada en el entrehierro después de la interrupción.

1.5.4 Interrupción asíncrona

Puede haber oposición de fases si el disyuntor hace el restablecimiento después de una pausa relativamente larga, durante la cual los generadores E_1 y E_2 se salgan de sincronismo, cuando el interruptor abre, el valor de pico del voltaje transitorio de recuperación lo determina la suma de E_1 y E_2 , y se aproxima a dos veces el valor de la interrupción de cortocircuito.

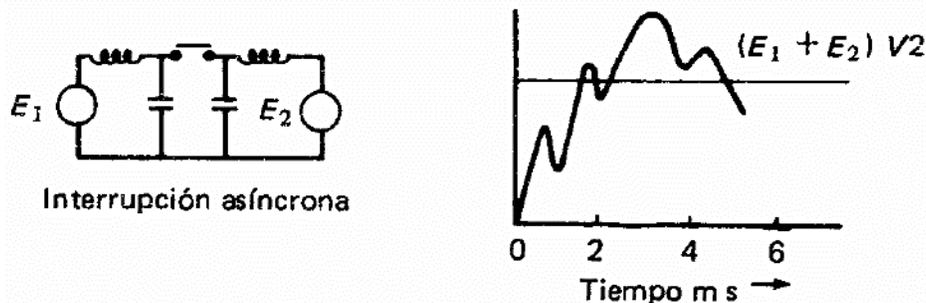


Fig. 1-6 Interrupción asíncrona.

1.5.5 Interrupción de falla de línea corta

La interrupción de la corriente de cortocircuito debida a fallas en los primeros kilómetros de líneas aéreas, impone un intenso trabajo al interruptor, y esto sucede porque el voltaje transitorio de recuperación que obra entre las terminales del interruptor, va acompañado de una componente de alta frecuencia, del lado de la línea, mientras que la reducción de la corriente de cortocircuito debida

a la inductancia de la línea que se encuentra en cortocircuito, es solo ligeramente menor que la de una falla terminal.

El voltaje transitorio de la línea en cortocircuito es proporcional a la magnitud de la corriente de cortocircuito y la frecuencia es inversamente proporcional a la longitud de la línea que está en cortocircuito. Después de la interrupción de la corriente de cortocircuito, se deja el descenso de voltaje a lo largo de la línea en forma de carga lineal, esta carga se desvanece en la forma de onda viajera oscilando a su frecuencia natural; el régimen de elevación de estas oscilaciones es bastante elevado debido a la impedancia efectiva cambiante de la línea en cortocircuito, el REVR está expresado por la relación siguiente.

$$REVR = \sqrt{2I\omega Z}$$

En la cual:

I = corriente de cortocircuito

ω = frecuencia angular de servicio

Z = impedancia efectiva fluctuante de la línea en cortocircuito

CAPITULO II EL INTERRUPTOR DE POTENCIA Y SU CLASIFICACIÓN

2.1 EL INTERRUPTOR DE POTENCIA

Un interruptor es un dispositivo que conecta o desconecta los circuitos eléctricos durante condiciones normales y anormales de trabajo (corto circuito). Sirve para insertar o retirar de cualquier circuito energizado máquinas, aparatos, líneas aéreas o cables. El interruptor es junto con el transformador el dispositivo más importante de una subestación.

El interruptor debe ser capaz de interrumpir corrientes eléctricas de intensidades y factores de potencia diferentes, pasando desde las corrientes capacitivas de varios cientos de amperes a las inductivas de varias decenas de kiloampers (cortocircuito).

El interruptor de potencia es uno de los equipos más importantes dentro de un sistema eléctrico.

Tiene una doble función vital para la conexión y desconexión de circuitos, dado que su comportamiento en estado cerrado es la de un conductor con muy baja resistencia, en estado abierto su comportamiento debe ser la de un aislante ideal. Si bien se sabe estos equipos son capaces de operar en condiciones de normales así como en condiciones de falla. Sin embargo el principal objetivo es su operación en condiciones anormales o de corto circuito ya que de ellos depende la seguridad del resto del sistema.

Los interruptores que se utilizaban primitivamente en los circuitos eléctricos eran, generalmente de accionamiento manual y del tipo seccionador o cuchilla, sin embargo a lo largo de los años los interruptores han incorporado varios medios diferentes para disipar la energía, tales como el agua, aceite, gases inertes, alto vacío, y aire comprimido. El uso de interruptores que operan usando distintas tecnologías, se debe a la necesidad de apertura de circuitos que trabajan con grandes potenciales y corrientes, minimizando el tiempo de arqueo y evitando el daño a los equipos así como al interruptor mismo.

2.2 CARACTERÍSTICAS Y ESPECIFICACIONES DE UN INTERRUPTOR DE POTENCIA

Un interruptor debe realizar tareas muy arduas en diferentes circunstancias. El funcionamiento del interruptor depende, en gran parte, de la naturaleza del circuito al que esté conectado. Por ello es indispensable conocer las características nominales de la interacción entre el interruptor y el circuito al que se conecta. A continuación, se definen algunas de ellas:

De acuerdo a normas IEC 56-1 las normas ANSI un interruptor de corriente alterna debe cumplir con los siguientes conceptos de capacidad nominal:

- Voltaje nominal
- Corriente nominal
- Frecuencia nominal
- Capacidad nominal de interrupción simétrica y asimétrica
- Capacidad nominal de restablecimiento
- Corriente nominal de tiempo corto o máxima duración de corto circuito
- Servicio nominal de operación

2.2.1 Voltaje nominal y voltaje nominal máximo

Es el valor eficaz de la tensión entre fases del sistema en que se instala el interruptor. En condiciones de operación, el voltaje no es constante en ningún punto del sistema de fuerza por lo cual el fabricante garantiza el correcto funcionamiento del interruptor a un voltaje nominal máximo, que es un poco mayor que el voltaje nominal. Es valor máximo de la tensión para el cual está diseñado el interruptor y representa el límite superior del voltaje, al cual debe de operar, según normas.

La Comisión Electrotécnica Internacional (IEC) recomienda los niveles de tensión expresados en la Tabla 2-1, que son los comúnmente usados en México.

TENSIÓN NOMINAL DE OPERACIÓN (kV)	TENSIÓN MÁXIMA DE DISEÑO ANSI (kV)	TENSIÓN MÁXIMA DE DISEÑO IEC (kV)
2.2	--	3.6
4.16	4.76	7.2
13.8	15.5	17.5
23.0	25.8	24.0
34.5	38	36.0
69.0	72.5	72.5
115.0	121	123.0
138.0	145	145.0
230.0	242	245.0
400.0	--	420.0

Tabla 2-1 Tensiones nominal y máxima de diseño.

2.2.2 Corriente nominal

La corriente nominal es la característica que establece los límites de elevación de temperatura del interruptor. Es la corriente en valor eficaz de la corriente, expresada en amperes que el interruptor de potencia es capaz de conducir continuamente, a la frecuencia nominal, sin sufrir deterioro y sin exceder los valores de elevación de temperatura que soportan las diferentes partes y componentes. El interruptor puede retener su capacidad nominal siempre que se le dé suficiente mantenimiento para conservar la elevación de la temperatura dentro de sus límites especificados.

Los límites de temperatura están dados en términos de la temperatura total y de la elevación de la temperatura sobre la temperatura máxima de operación. Se establece el valor de elevación de

temperatura para simplificar las pruebas del interruptor siempre y cuando la temperatura ambiente esté en el rango de 10°C a 40°C para no aplicar factores de corrección.

Los valores de corriente nominal establecidos por IEC son; 630 A; 800 A; 1 250 A; 1 600 A; 2 000 A; 3 150 A; y 4 000 A. Los valores correspondientes especificados por ANSI son; 600 A; 1 200 A; 1 600 A y 2 000 A.

2.2.3 Frecuencia nominal

Este parámetro relaciona sólo la frecuencia del sistema de corriente alterna y tiene una influencia significativa cuando se relaciona con otras características de los interruptores. La frecuencia nominal es un factor relevante durante la interrupción de la corriente, debido a que en muchos tipos de interruptores, la razón de cambio de la corriente en el cruce por cero es un parámetro más significativo que el valor de la corriente *rms* o el valor pico.

Alrededor del mundo se utilizan frecuencias de 50 Hz ó 60 Hz según la norma IEC-62271-100. En México se tenían dos sistemas, uno operando a 50 Hz, en la región central del país y otro a 60 Hz. Sin embargo, a partir de 1976 se unificó la frecuencia a 60 Hz, valor que continúa vigente.

2.2.4 Capacidad interruptiva simétrica y asimétrica

Es la cantidad de corriente que el interruptor puede interrumpir con seguridad. Se define como máxima intensidad de corriente (corriente de interrupción), medida en el instante en que se separan los contactos, que el interruptor puede cortar con un voltaje de recuperación de frecuencia fundamental (el voltaje de recuperación es el valor eficaz de la onda fundamental, a la frecuencia del sistema del voltaje entre fases que reaparece en el circuito, después de que se han extinguido los arcos en todos los polos del interruptor).

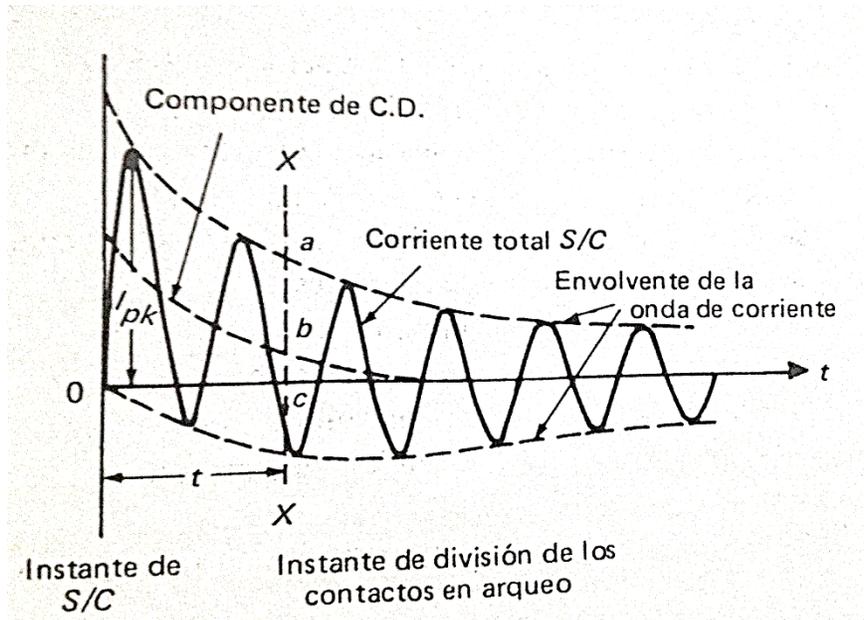


Fig. 2-1 Onda de una corriente de cortocircuito.

En la figura anterior se puede observar que el valor rms de la corriente varía con el tiempo por la presencia de una componente de c.d. que disminuye de valor con el tiempo.

Después del instante de falla la corriente de cortocircuito comienza a decender desde un valor inicial alto hasta un valor sostenido. Además, debido al tiempo de relevación, el interruptor comienza a abrir sus contactos en arqueo solo un poco después de la iniciación del cortocircuito. Por lo tanto la corriente real que interrumpe es menor que la inicial de la corriente de cortocircuito.

Es importante mencionar que las distintas capacidades interruptivas derivan de la corriente de interrupción la cual es la corriente de un polo es la corriente que pasa por ese polo en el instante de separación de los contactos.

- Corriente simétrica de interrupción. Este es el valor rms de la componente de c.a. de la corriente que pasa por el polo en el instante de separación de los contactos.

$$I_s = \frac{ab}{\sqrt{2}}$$

- Corriente asimétrica de interrupción. Esta es el valor rms de la corriente total, que comprende las componentes de c.a. y c.d. de la corriente que pasa por ese polo en el instante de separación de los ontactos.

$$I_{As} = \sqrt{\left(\frac{ab}{\sqrt{2}}\right)^2 + (bc)^2}$$

Convencionalmente la capacidad interruptiva en MVA es igual a $\sqrt{3}$ por el voltaje nominal en kV por la corriente nominal de interrupción en KA. Sin embargo las capacidades interruptivas pueden definirse:

- Capacidad interruptiva simétrica es el valor de la corriente simétrica de interrupción que puede interrumpir el interruptor a un voltaje dado de restablecimiento, como valor de referencia, bajo condiciones prescritas.
- La capacidad interruptiva asimétrica es el valor de la corriente de interrupción asimétrica que puede interrumpir a un voltaje dado de recuperación y aun voltaje dado de restablecimiento, como valor de referencia bajo condiciones prescritas.

Un interruptor normal responde a las siguientes características:

Para tensiones inferiores a la tensión nominal, el interruptor debe ser capaz de interrumpir su valor de cortocircuito nominal.

Para tensiones superiores a la tensión nominal, no se puede garantizar ninguna corriente interruptiva de cortocircuito.

El valor eficaz de la componente alterna de la corriente de interrupción de cortocircuito debe elegirse entre los valores siguientes:

6.3, 8, 10, 12.5, 16, 20, 25, 31.5, 40, 50, 63, 80 y 100 kA

2.2.5 Tensión de aislamiento

Es el valor que lo define y al que se refieren los ensayos dieléctricos, las distancias de aislamiento y las líneas de fugas.

2.2.6 Capacidad de cierre

La capacidad de cierre o de conexión nominal de un interruptor se define como la intensidad de corriente máxima que el interruptor puede establecer con una tensión dada. El caso más severo para el interruptor se presenta cuando éste cierra contra un cortocircuito en el instante del cruce por cero de la tensión, de manera que la corriente total de cortocircuito alcanza su valor máximo. La capacidad de cierre está dada por el valor de la primera cresta de la onda de corriente I_{MC} .

De acuerdo con la norma IEC-62271-100, la primera cresta de la onda de corriente puede alcanzar un máximo de 1.8 veces el valor de cresta I_{ca} de la onda de corriente simétrica, por lo que la capacidad de cierre en amperes eficaces (valor de cresta) I_{MC} es igual a:

$$I_{MC} = 1.8\sqrt{2}I_S$$

$$I_{MC} = 2.55I_S$$

2.2.7 Ciclo de operación

El servicio de operación de un interruptor es el número prescrito de operaciones unitarias a intervalos establecidos, de acuerdo con las recomendaciones del IEC para el servicio nominal de la operación de interruptores cuya utilización no es para autorrestablecimiento, existen dos alternativas.

1. **O-t-CO-t'-CO**
2. **O-t''-CO**

O = operación de apertura

C = operación de cierre

CO = cierre seguido de apertura

t, t', t'' = intervalos de tiempo

Los interruptores con autorrestablecimiento tienen un servicio de operación como sigue:

O-0-CO

0 es el tiempo muerto del interruptor expresado en ciclos.

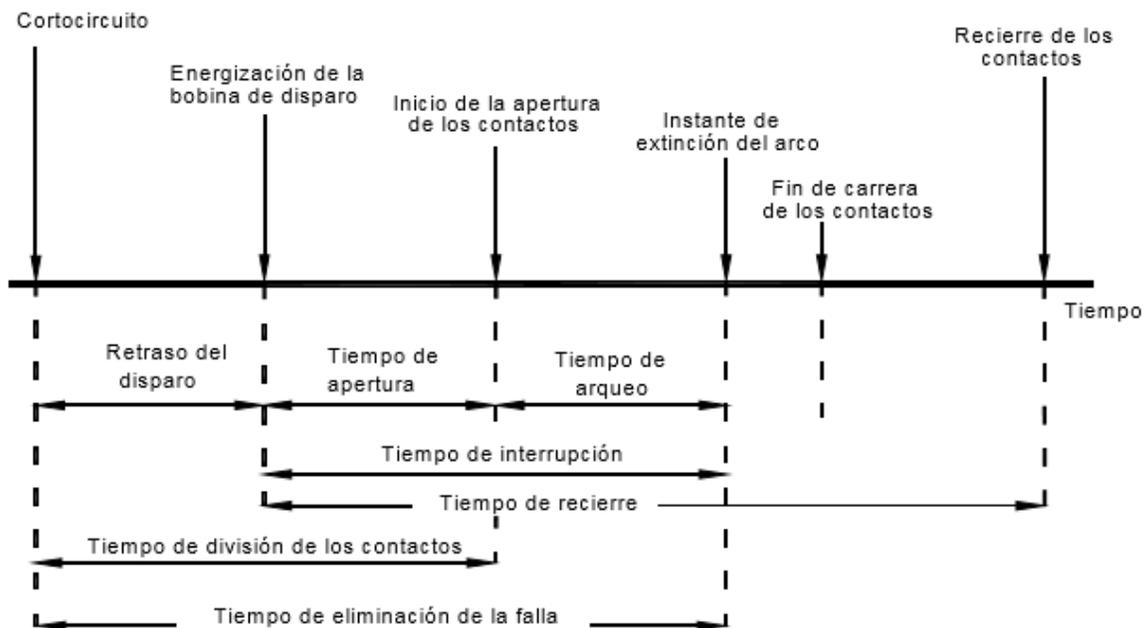


Fig. 2-2 Componentes del tiempo de operación de un interruptor.

2.2.8 Corriente nominal de tiempo cortó

El propósito de este requerimiento es asegurar que no se rebase la capacidad térmica de tiempo corto de las partes conductoras.

Por definición, la corriente nominal de tiempo corto es el valor rms de la corriente que el interruptor puede conducir en la posición de cerrado, sin sufrir daño, para un intervalo de tiempo especificado. A la corriente nominal de tiempo corto también se le denomina corriente sostenida de corta duración.

La magnitud de esta corriente es igual a la corriente simétrica de cortocircuito nominal que se asigna para un interruptor en particular y que normalmente se expresa en kA para un período de 1 segundo (IEC) ó 3 segundos (ANSI). La IEC, también recomienda un valor de 3 segundos si se requieren periodos mayores a 1 segundo. También se le conoce como capacidad nominal a 1 segundo y como capacidad nominal a 3 segundos, respectivamente.

A pesar de que ANSI requiere un aguante de 3 segundos, el máximo retraso del disparo establecido es de dos segundos para interruptores tipo interior y equipos para intemperie a 72.5 kV o menores, y para interruptores a 121 kV o mayores el requerimiento de tiempo es de 1 segundo. La duración de la corriente de tiempo corto no tiene que ser mayor que el retraso de tiempo máximo permitido en un sistema, por lo que ANSI está en el proceso de adoptar requerimientos de tiempo menores.

2.3 PRINCIPIO DE OPERACIÓN

La operación de los contactos de un interruptor se realiza por medios mecánicos. Los estados de operación de un interruptor son dos:

- a) Abierto. Aislamiento seguro entre terminales, para corriente nominales de operación o incluso de corto circuito según sea el caso.
- b) Cerrado. Soporte de esfuerzos térmicos y dinámicos que implica la conexión bajo corrientes nominales de operación

2.3.1 Proceso de apertura

Si estando cerrado el interruptor se desea interrumpir el circuito, se libera el mecanismo de apertura el cual permite que los contactos principales se separen. Cuando los contactos se separan se forma un entrehierro entre ellos, constituido de un medio dieléctrico e interruptivo (aire, gas, SF6, vacío, aceite). En este medio se forma el arco eléctrico, a través del cual la corriente fluye de un contacto a otro. En este entrehierro es donde el circuito es vulnerable a ser interrumpido, ya que la corriente abandona su trayectoria original (contactos) para formar un arco en el medio aislante e interruptivo, cuando se logra disminuir la conductividad de esta trayectoria hasta extinguir el arco, la corriente deja de fluir.

Por lo tanto, la interrupción de un circuito eléctrico comprende dos pasos consecutivos:

En el primero se consigue intercalar un entrehierro a la trayectoria original, y el segundo, consiste en eliminar la conductividad del entrehierro. El principio fundamental de este proceso es la velocidad de restablecimiento del medio dieléctrico en el entrehierro.

Para un entrehierro con un medio aislante gaseoso, el gas es semiconductor a altas temperaturas y en función de su enfriamiento se vuelve aislante. Por ejemplo, el aire cambia de un buen conductor (10mho/cm), a un aislador confiable (10-12 mho/cm), solamente con variar la temperatura de 10,000 a 1,000 °K.

El tiempo de interrupción está dado desde el momento en que se energiza la bobina de apertura hasta la extinción del arco eléctrico. Este tiempo consta de 2 partes: el tiempo propio desde la energización de la bobina de apertura hasta la separación física de contactos y el tiempo de arco y se expresa en milisegundos o en ciclos.

2.3.2 Proceso de cierre

Los interruptores deben cerrar e interrumpir los circuitos, esto puede ocasionar ciertos problemas, particularmente, si el interruptor cierra en condiciones de falla. Cuando el interruptor está abierto, la tensión en sus terminales es la tensión del sistema, a esta tensión se le denomina *tensión de cierre*.

Al valor máximo de la corriente que fluye al cerrar el interruptor se le llama *corriente de cierre*. La *potencia de cierre* es el producto de la tensión de cierre por la corriente de cierre.

El tiempo de cierre de un interruptor es el que transcurre desde el momento de energizar la bobina de cierre hasta la conexión física de los contactos principales.

Durante el cierre, existen esfuerzos eléctricos entre los contactos a medida que éstos se acercan, estableciéndose arcos de pre encendido que ocasionan desgaste adicional de los contactos. El caso más crítico se presenta cuando el interruptor cierra en condiciones de falla de máxima asimetría.

2.4 PARTES PRINCIPALES DE UN INTERRUPTOR DE POTENCIA

El interruptor se puede considerar formado por tres partes principales: cámaras interruptivas, mecanismo de accionamiento y control.

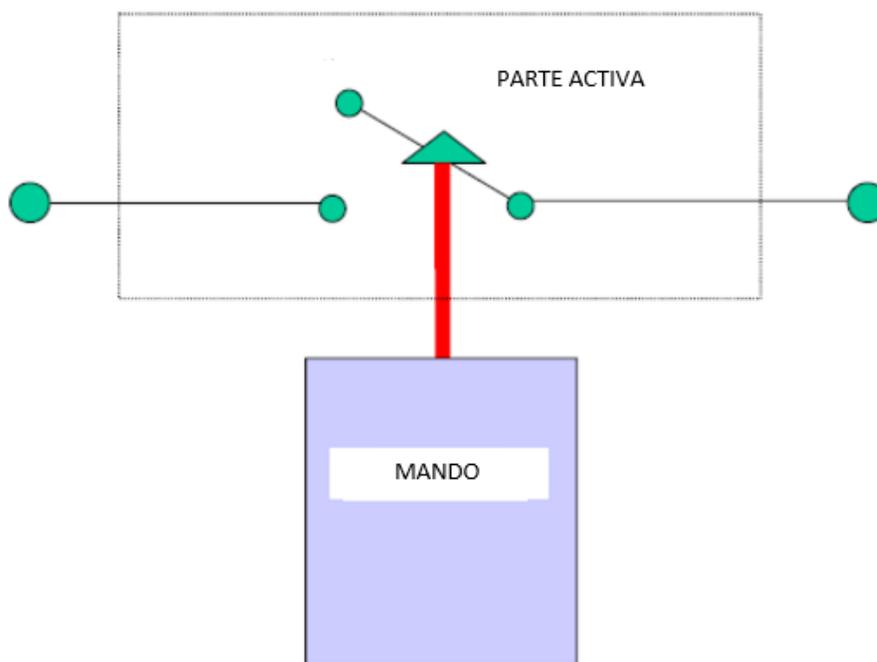


Fig. 2-3 Partes principales de un interruptor de potencia.

2.4.1 Cámaras interruptivas.

Las cámaras interruptivas también conocidas como parte activa, es la parte primordial de cualquier interruptor eléctrico. La cámara de arco es un volumen cerrado que contiene un contacto fijo, un contacto móvil y un medio de interrupción, se establece una corriente cuando el contacto móvil toca al contacto fijo y se interrumpe cuando éstos se separan.

Dichas cámaras deben soportar los esfuerzos electrodinámicos de las corrientes de cortocircuito, así como los esfuerzos dieléctricos que aparecen al producirse la desconexión de bancos de reactores, capacitores y transformadores. Se pueden conectar varias cámaras en serie para soportar mayores niveles de voltaje; en este caso se instala un condensador de mayor capacidad en paralelo con cada cámara para balancear el voltaje a través de los contactos cuando éstos se separan.

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.

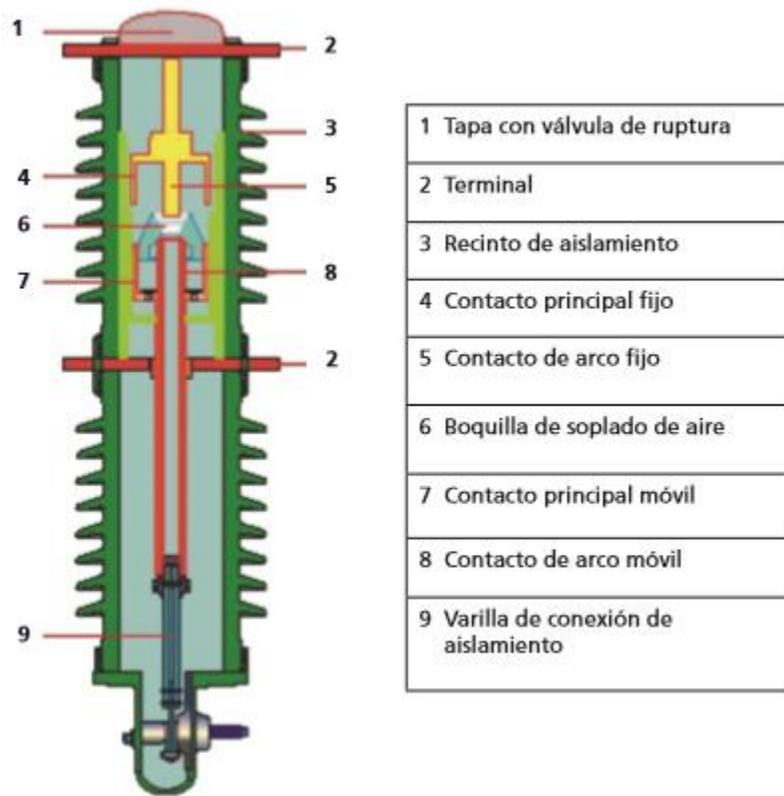


Fig. 2-4 Diseño simplificado de un interruptor en SF6.

Contactos principales. El contacto principal en un interruptor es el elemento que conduce la corriente entre la parte estacionaria y la móvil del interruptor, y de esta manera, una gran superficie con muy baja resistencia (menor de $100 \mu\Omega$) es vital para una vida de servicio prolongada. El cobre recubierto con plata es el material más común utilizado para los contactos principales

Contactos de arco. El contacto de arco es un contacto en paralelo con el contacto principal y se encarga del arco durante la separación. Este tipo de contacto es común en muchos tipos de interruptores. El contacto de arco se libera más tarde que el contacto principal. Un interruptor sufre desgaste del contacto de arco durante la operación normal así como cuando interrumpe corrientes de cortocircuito. Si el contacto de arco es demasiado corto o de alguna manera está en malas condiciones, el interruptor se hace poco confiable. Las superficies del contacto principal se pueden degradar por la formación del arco, lo que produce una mayor resistencia, calor excesivo y en el peor caso, una explosión. Los contactos de arco en parte se fabrican con materiales más duros como tungsteno o grafito, para hacerlos más fuertes.

Boquilla. La boquilla es una parte en un interruptor de SF6 que separa el contacto principal del arco así como también guía el gas por el lugar correcto a través de la cámara a fin de obtener un apagado eficaz del arco.

Material absorbente. Cuando se produce una severa formación de arco en el interruptor, el SF6 se descompone y se crean subproductos tales como el dióxido de azufre y fluoruros de azufre. Estos subproductos se combinan con la humedad que haya en el gas y producen ácido sulfúrico que es altamente corrosivo y puede dañar el interior del interruptor. Con el uso de desecantes, que absorben estos subproductos y la humedad, se puede proteger al interruptor.

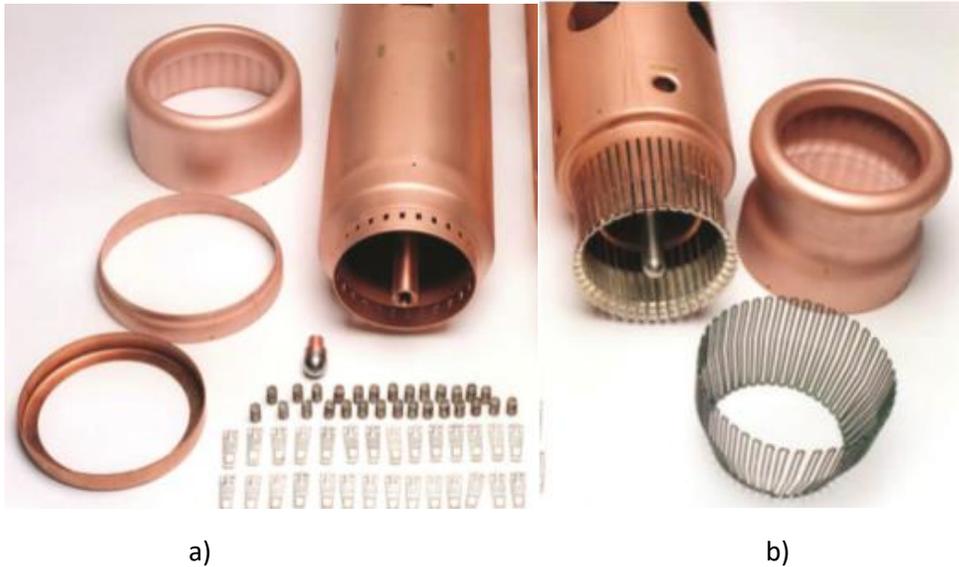


Fig. 2-5 Partes conductoras de corriente de un interruptor de potencia con dedos de contacto integrados, a) Diseño anterior, b) Diseño nuevo.

2.4.2 Mecanismo de accionamiento o mando

Esta sección tiene la tarea de crear la energía requerida para ejecutar la operación mecánica del interruptor automático, para las operaciones de apertura y de cierre.

En principio esta función se ve muy sencilla, pero si se considera que cuando los interruptores se ponen en servicio, permanecen en posición de cerrado por largos periodos de tiempo y que cuando se requiere que abran y cierren, deben de ser muy confiables, sin retrasos o lentitud. Una falla en el mecanismo puede tener consecuencias muy serias. Debido a esto, el mecanismo debe ser extremadamente confiable y consistente para cualquier condición de operación

El número de mecanismos que se utilizan en los interruptores de potencia son dos: monopolar y tripolar. El tipo monopolar es básicamente cuando sólo se abre una sola fase del sistema eléctrico por lo que se utilizan interruptores independientes para cada fase lo contrario a lo que pasa cuando son tripolares, ya que independientemente de en qué fase se detecte la falla, el interruptor tripolar habrá las tres fases.

Las normas eléctricas (NRF-022-CFE) especifican el tipo de mecanismo que se ha de utilizar en el sistema eléctrico de potencia, dependiendo de la tensión que se maneje:

- a) Tripolar para tensiones menores a 72.5 kV.
- b) Tripolar para tensiones de 72.5 kV y mayores.

Los mecanismos de accionamiento deben ser intercambiables entre los polos del interruptor de potencia o entre interruptores del mismo tipo y características.

A continuación se mencionan algunos lineamientos que se deben cumplir:

- a) La carga de energía almacenada debe ser por medio de un motor eléctrico que accione un resorte o un compresor.
- b) La liberación de la energía, para cerrar o abrir el interruptor, debe ser por medio de un dispositivo de operación electromecánico.
- c) En el caso de que se suministre mecanismo de operación neumática, con un tanque de almacenamiento por polo, estos deben estar conectados en paralelo o serie. Cada polo debe contar con una válvula de aislamiento, que permita trabajar sobre el polo, sin perder todo el volumen de aire almacenado.

El accionamiento de los dispositivos de control puede ser de tipo:

- Neumático
- Hidráulico
- Resorte
- Combinado

Mecanismo neumático

Los mecanismos neumáticos son los usados comúnmente en interruptores de soplo de aire, debido a que usan aire comprimido como medio aislante e interruptivo. Esto no significa que este tipo de mecanismos se usen sólo en este tipo de interruptores, ya que también se usan para operar interruptores en aceite y en SF6. Las partes principales de un sistema de accionamiento neumático son las siguientes:

- Fuente de energía formada por un grupo de motor-compresor.
- Tanque para almacenamiento de aire comprimido.
- Conjunto principal de accionamiento: válvulas de conexión, válvulas de desconexión, émbolo de accionamiento.
- Solenoides de conexión y desconexión.
- Elementos de control y protección.
- Elementos para señalización de posición del interruptor.

Para el cierre se aplica aire a alta presión a través de una válvula de tres vías. El pistón se mueve hacia arriba transmitiendo la fuerza de cierre a través del varillaje del mecanismo. Al momento de cerrar el émbolo queda en la parte superior del cilindro, mientras que para la apertura se aplica igualmente aire a alta presión quedando el émbolo en la parte inferior.

En algunos casos, el mecanismo está compuesto por un sistema de resortes en el cual para el cierre se aplica aire a alta presión, pero al mismo tiempo el mecanismo carga un juego de resortes de

apertura y una vez que los contactos están cerrados, un trinquete de disparo es enclavado para mantener el interruptor en la posición de cerrado.

La apertura del interruptor se realiza a través de la energización de un solenoide de disparo que libera el trinquete de disparo provocando la descarga de los resortes de apertura que hacen que los contactos se abran.

Según el tipo de tensión utilizado en la subestación. Para interruptores de potencia con tensiones hasta 145 kV, la energía almacenada del mecanismo de operación no puede ser de tipo neumático.

La Fig. 2-6 muestra un ejemplo típico de un mecanismo neumático, el cual usa un embolo para mover la barra de accionamiento de cierre y apertura. Estos mecanismos tienen un tanque para almacenar aire a alta presión que es utilizado para realizar al menos 5 operaciones sin necesidad de recargarlo entre operaciones.

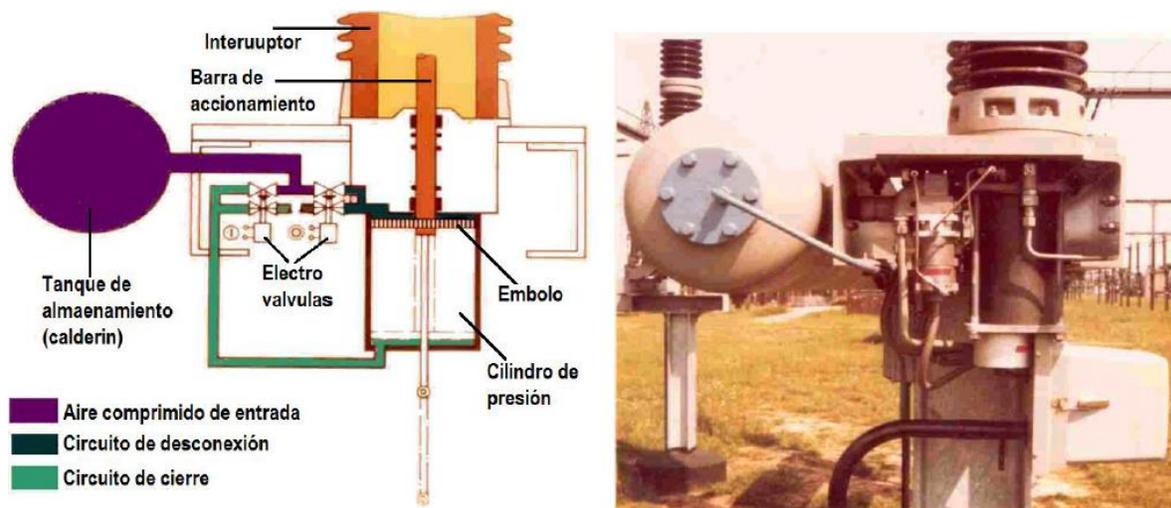


Fig. 2-6 Dibujo esquemático de un mecanismo neumático de un interruptor en SF6 marca AEG de 230kV de tensión nominal.

Maniobra de conexión. La orden de conexión se transmite eléctricamente a la bobina de conexión de la válvula de accionamiento (19). En dicha válvula, el impulso eléctrico se transforma en una orden neumática, la cual se transmite por medio de la unión por tubo corto directamente hasta el accionamiento (16). De esta forma el émbolo (20) del accionamiento se desplaza desde la posición de desconexión hacia la posición de conexión y el interruptor queda cerrado. Durante el recorrido del émbolo y en el lado opuesto del mismo, el espacio existente queda vacío de aire, por medio de la válvula de desconexión (21). Simultáneamente, el dispositivo de contactos auxiliares se acciona de forma directa y mecánica por el émbolo de accionamiento (20) y se sitúa señalizando la posición mediante la varilla en la posición de conectado. A través del movimiento de los contactos de dicho

dispositivo de contactos auxiliares, se interrumpen los circuitos eléctricos del accionamiento de conexión. De igual manera, la válvula de accionamiento desconexión se cierra y de esta forma apoya y refuerza la maniobra mediante acoplamiento neumático. Inmediatamente después del cierre de la válvula de accionamiento de conexión, el aire de accionamiento restante que permanece en el cilindro de accionamiento se evacua mediante la válvula de descarga que existe en la válvula de accionamiento de desconexión.

Maniobra de desconexión. La orden de desconexión se da de forma eléctrica a la bobina de desconexión de la válvula de accionamiento (22). En dicha válvula, el impulso eléctrico se transforma en una orden neumática que se transmite a la válvula de amplificación (23). Dicha válvula de amplificación se abre y descarga la presión en el espacio de accionamiento de la válvula de desconexión (21), de tal forma que el émbolo de la válvula de desconexión se desplaza hacia abajo y simultáneamente cierra la salida de evacuación. A través de la válvula de desconexión (21) abierta, el aire comprimido que se encuentra en el calderín llega de forma simultánea al accionamiento (16) de las columnas, así como al accionamiento de la válvula de evacuación (24) y, mediante el acoplamiento de retorno a la válvula de amplificación (24). El émbolo (20) del accionamiento se mueve desde la posición de conexión hacia la posición de desconexión y el interruptor queda desconectado. Durante el recorrido del pistón y en el lado opuesto del mismo, el espacio existente queda vacío de aire por medio de la válvula de evacuación (24) de sección amplia. Simultáneamente, el dispositivo de contactos auxiliares cambia su posición por medio de la varilla que se utiliza para señalización de posición, la cual es accionada de forma directa y mecánica. Al modificarse la posición de los contactos del dispositivo de contactos auxiliares se interrumpe eléctricamente el circuito del accionamiento de desconexión, provocando el cierre de la válvula de accionamiento de desconexión. Mediante el acoplamiento de retorno se comanda la válvula de amplificación (23) de forma rápida. La válvula de descarga de la válvula de desconexión (21) evacúa el aire del espacio situado por encima del pistón de accionamiento, asimismo actúa el mando para la válvula de evacuación (24).

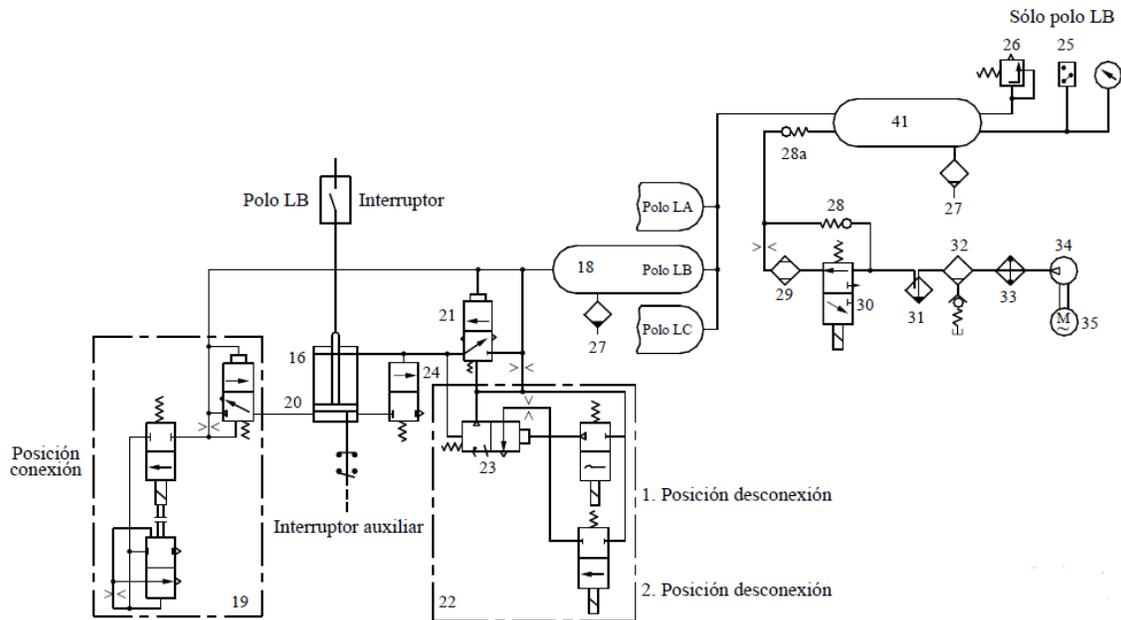


Fig. 2-7 Esquema de un interruptor desconectado y sin presión.

Mecanismo hidráulico

Los circuitos hidráulicos se han usado por muchos años en mecanismos para interruptores. Estos operan a presiones mucho mayores de fluido que los cilindros neumáticos y por lo tanto el diámetro del cilindro, el paso del fluido y la mayoría de las partes son más pequeñas. El aspecto de las fugas es más importante que en los mecanismos neumáticos, debido a que el fluido tiene que ser conservado y reciclado. Es por eso que las tolerancias en muchas de las partes son más críticas. El fluido utilizado en los mecanismos hidráulicos es nitrógeno. El mecanismo del tipo hidráulico es sólo una variación del mecanismo neumático. En el mecanismo del tipo hidráulico la energía es almacenada en un acumulador de nitrógeno y el fluido hidráulico se vuelve un eslabón operado por fluido interconectado entre el acumulador y el sistema de varillaje, el cual es muy similar al usado con los mecanismos neumáticos.

Un sistema de accionamiento hidráulico consta de los siguientes elementos según la fig. 2-8:

- Cilindro de doble efecto diferencial (2); en el cual el lado de menor superficie está en permanente comunicación con el acumulador de energía (1).
- Fuente de energía compuesta por grupo moto-bomba hidráulica (4).
- Acumulador de energía (1).
- Válvula principal de conmutación (3) para control de la posición del interruptor.
- Conjunto de solenoides de cierre y disparo Y1, Y2 / Y3.
- Recipiente de aceite (5).
- Sistema de control y protección (6) del accionamiento hidráulico, así como para la integridad misma del interruptor.
- Señalizadores ópticos de posición.

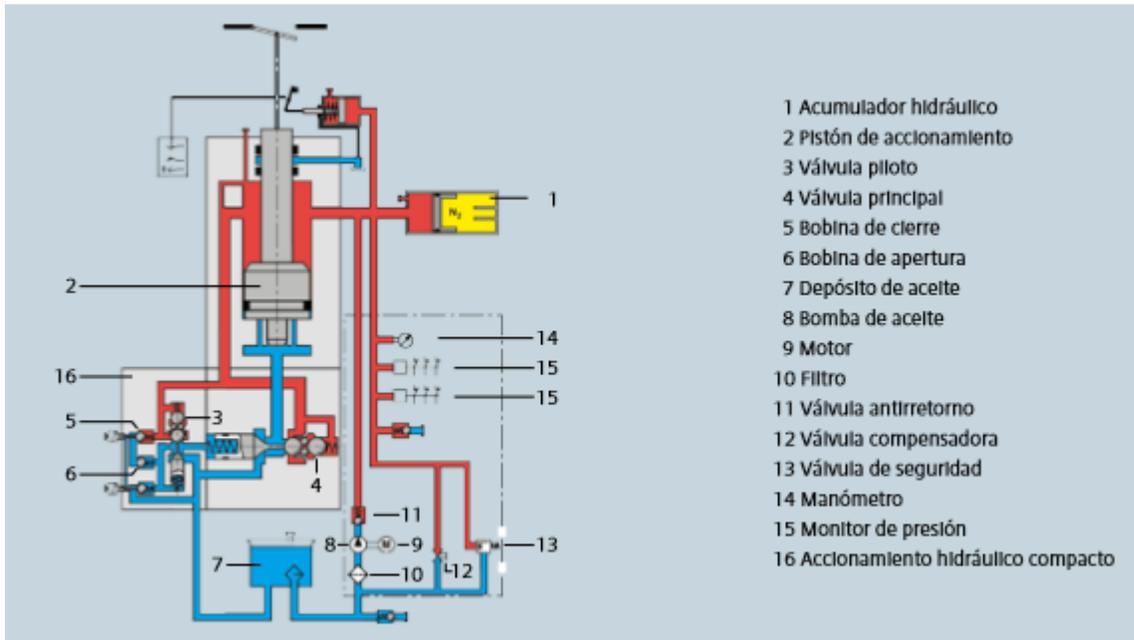


Fig. 2-8 Accionamiento electrohidráulico.

Maniobra de conexión. Al energizarse el solenoide Y1, se abre la válvula auxiliar (4), actuando sobre la válvula de retención (10) y abriendo la válvula auxiliar de mando (5). Esta última queda autoretenida hidráulicamente por medio del canal (6) y conmuta la válvula principal (3), y así se cierra la comunicación del lado conexión del émbolo de accionamiento con el recipiente de aceite y, al mismo tiempo, abre la cámara de presión (7) correspondiente a dicho lado conexión y por lo tanto, el accionamiento conecta al interruptor.

Maniobra de desconexión. Al energizarse el solenoide Y2 o Y3, se retira la autoretenencia de la válvula auxiliar de mando (8). La cámara de presión (9) en la válvula principal abre la comunicación del cilindro del accionamiento con el recipiente de aceite. Por la caída de presión que se produce en el lado conexión del émbolo, el accionamiento desconecta al interruptor.

Existe una variación en este tipo de mecanismo, donde el acumulador de nitrógeno es sustituido por un ensamble de resorte de disco el cual actúa como un acumulador mecánico. La Fig. 2.9 muestra un mecanismo típico de este tipo. Con esta modificación, el mecanismo es más confiable ya que elimina las fugas de gas del acumulador y los efectos de la temperatura ambiente sobre la energía acumulada. La operación del mecanismo mostrado se describe a continuación:

Una cantidad de aceite hidráulico es filtrado y almacenado a baja presión en un tanque (12), donde es comprimido por una bomba de aceite (11). El aceite a alta presión se almacena después en otro tanque (5). El pistón (3) que está dentro del tanque a alta presión (5) está conectado a un resorte (1). Los resortes están soportados por unos pernos de enlace (2). Una varilla de control (15) verifica

la carga de los resortes y activa los contactos de un interruptor (16) que controla el motor de la bomba (10) conforme se requiera para mantener la presión adecuada.

Con el interruptor en la posición de cerrado el pistón de operación (7), que está conectado al varillaje convencional del interruptor (8), tiene alta presión aplicada en ambas caras.

Para abrir el interruptor la bobina de apertura (17 a) es energizada causando que la válvula conecte la parte inferior del pistón de operación a baja presión (6) ocasionando que el pistón se mueva a la posición de abierto. El cierre del interruptor se inicia mediante la energización del solenoide de cierre (17 b) y admitiendo alta presión en la parte interior del pistón de operación. La pieza (4) es el cilindro de almacenamiento, (9) es el seguro mecánico, (13) es la válvula de drenado y (14) es una válvula de liberación de presión.

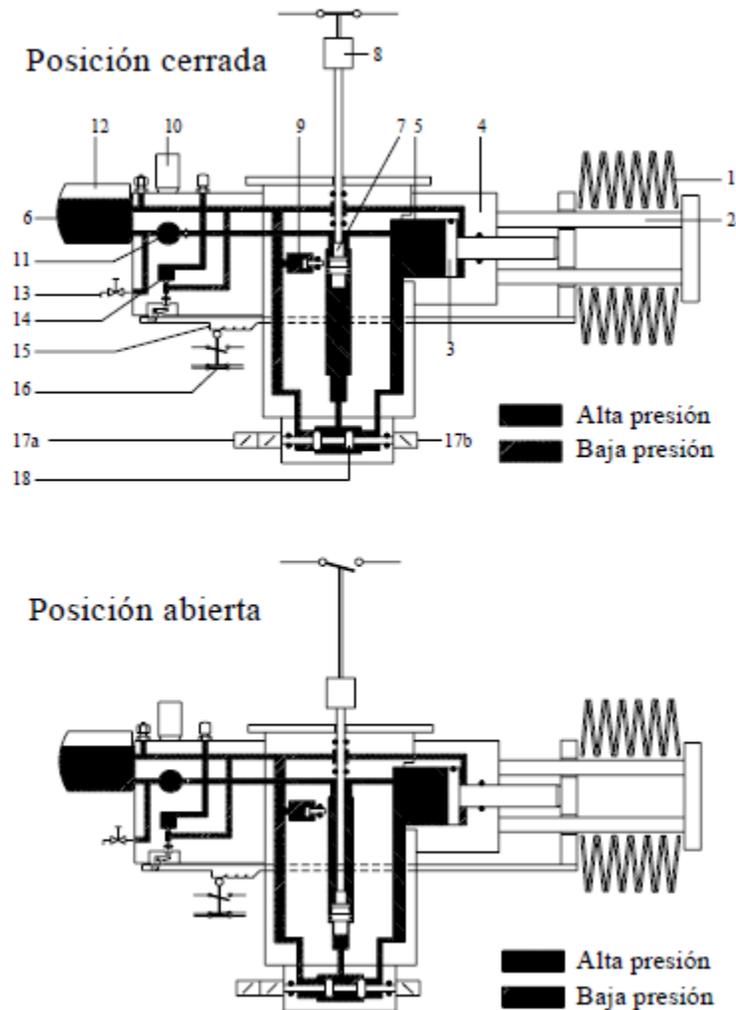


Fig. 2-9 Diagrama funcional operativo de un mecanismo hidráulico.

Mecanismo de resortes

Los mecanismos operados por resortes se han usado por muchos años en la aplicación de interruptores. La energía de este tipo de mecanismo, es almacenada en resortes de cierre. Esta energía es utilizada para cerrar el interruptor por medio de una señal que libera un trinquete de cierre. Básicamente, consiste de un motor de carga y una rueda dentada de carga, una leva de cierre, resortes de cierre, resortes de apertura y un varillaje. El motor y la rueda dentada cargan automáticamente los resortes de cierre, lo cual genera la secuencia de cierre de contactos. Los resortes cargados son mantenidos en esa posición por un trinquete que evita rotación de la leva de cierre. Para liberar la energía de los resortes se opera una bobina o solenoide de cierre o una palanca de cierre manual. Después de la activación de la bobina de cierre se libera un seguro de cierre secundario, mientras que el seguro primario gira hacia abajo debido a la fuerza ejercida por los resortes de cierre cargados, permitiendo la rotación de la leva de cierre que está conectada a las varillas de operación. Conforme la leva gira, acciona el varillaje que a su vez gira la flecha principal de operación provocando el movimiento de los contactos que están conectados a la flecha por medio de barras aislantes. El movimiento del varillaje carga el trinquete de disparo. Este trinquete mantiene al interruptor en posición cerrado. Además de cerrar los contactos, los resortes de cierre proporcionan energía suficiente para cargar los resortes de apertura.

La apertura de los contactos se realiza en forma eléctrica o manual, sin embargo, la apertura manual se utiliza sólo para propósitos de mantenimiento. Cuando se envía una señal de disparo, el seguro de disparo libera el mecanismo de leva. La fuerza producida por el varillaje hace girar el mecanismo de leva liberando los resortes de apertura, los cuales están conectados a la flecha principal de operación, proporcionando la energía necesaria para abrir los contactos del interruptor.

El accionamiento de un interruptor basado en resorte contiene los siguientes elementos principales:

- Fuente de energía a través de motor eléctrico en sistema reductor de velocidad formado por corona y tornillo sinfín.
- Acumulador de energía basado en resortes.
- Dos mecanismos, uno de cierre y otro de apertura, que retienen automáticamente la energía proporcionada por los resortes y la liberan a voluntad, por control local manual o a distancia, eléctricamente mediante solenoides.
- Elemento de protección y control mecánico que impide maniobras falsas, tales como maniobra de cierre durante el periodo de carga de los resortes de mando, inversión de giro de la manivela cuando se desea cargar el resorte manualmente.
- Elementos que automáticamente obligan de nuevo a la carga del resorte (por motor) inmediatamente después del cierre del interruptor, dejando el mando dispuesto en pocos segundos para realizar una maniobra de cierre.

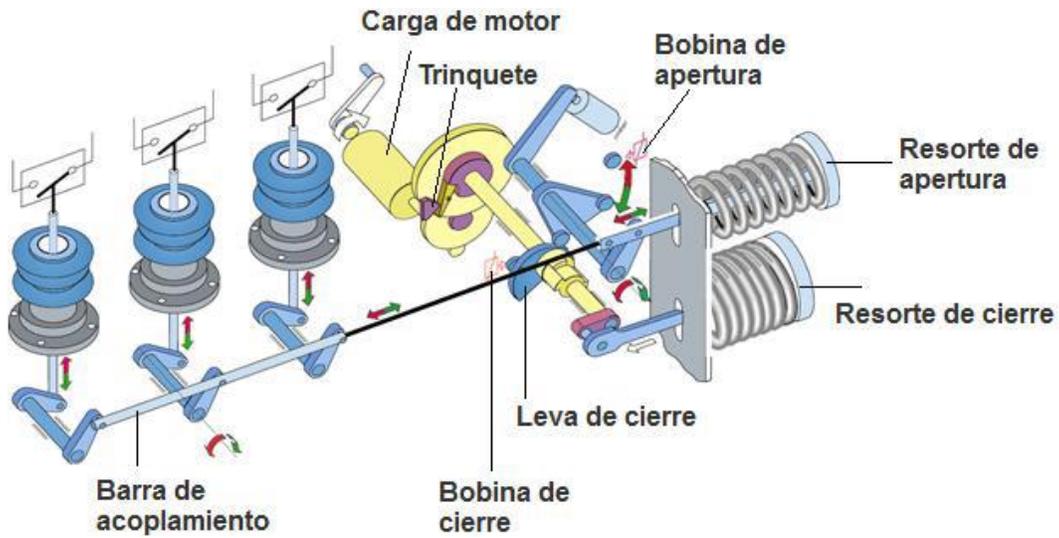


Fig. 2-10 Esquema simplificado de un mecanismo típico de operación de resortes.

El diseño del mecanismo de accionamiento por resorte proporciona el alto rendimiento necesario para un funcionamiento fiable. La palanca acoplada en el dispositivo de bloqueo, que se suelta cuando se excita la bobina de disparo, gira en forma antihoraria por el muelle de disparo (Fig. 2-11).

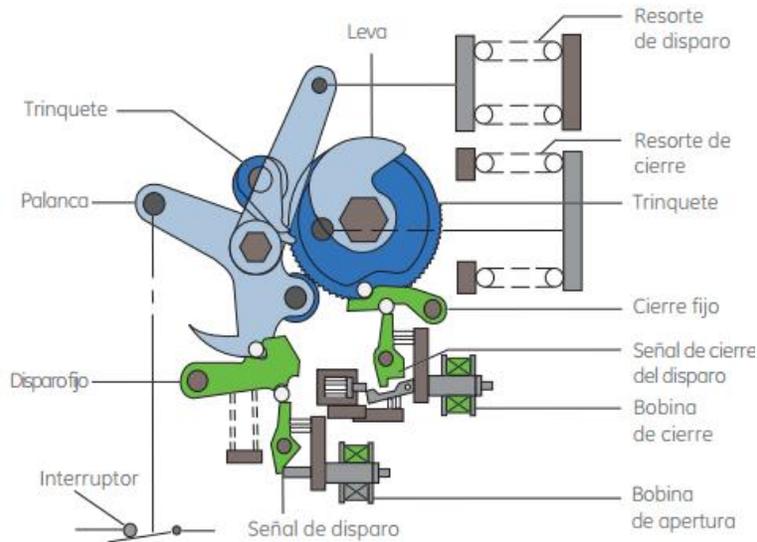


Fig. 2-11 Posición cerrada (resorte de cierre con carga).

La palanca gira en forma horaria, comprimiendo el muelle de disparo por par de torsión desde la leva (Fig. 2-12).

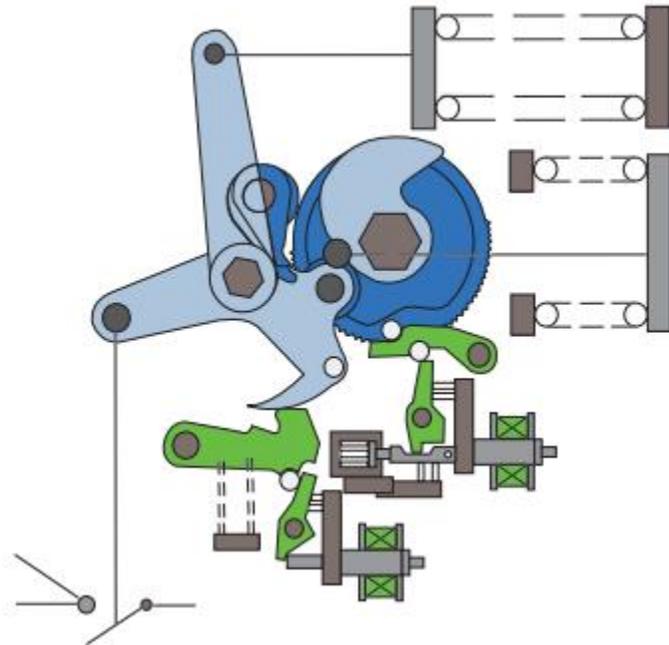


Fig. 2-12 Posición abierta (resorte de cierre con carga).

En cuanto se completa la secuencia de cierre, el muelle de cierre se carga por medio del trinquete conectado al motor (Fig. 2-13).

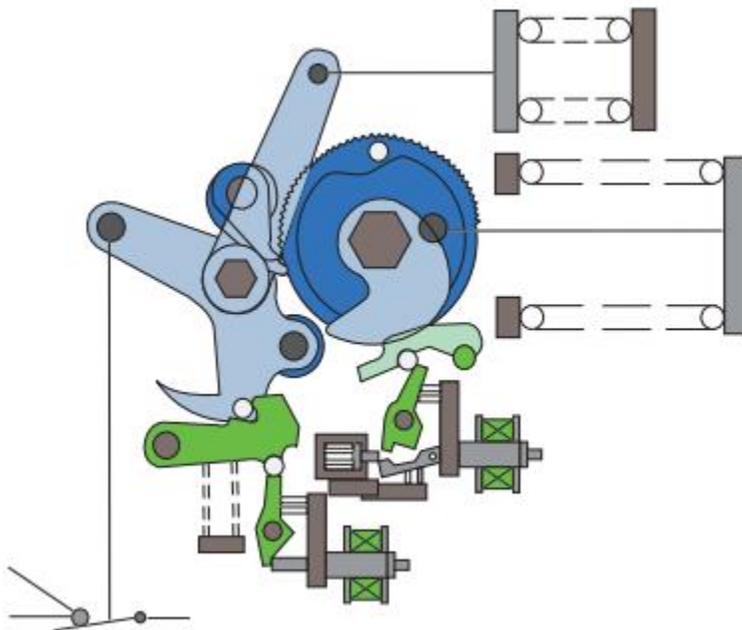


Fig. 2-13 Posición cerrada (resorte de cierre sin carga).

Existen diferentes diseños de mecanismos basados en resortes; por ejemplo, para un interruptor de soplo en SF₆ de 31.5 kA de capacidad interruptiva, 36 kV, se requieren resortes de disparo que entreguen una energía de sólo 250 joules. Sin embargo, para un interruptor de 50 kA de capacidad interruptiva y para tensiones mayores a 123 kV, las fuerzas de soplo y las energías se incrementan considerablemente hasta 3 kJ, por lo que se requieren mecanismos muy potentes.

2.4.3 Control

La orden para operar el interruptor se lanza desde la parte de control del interruptor, en la forma de un impulso eléctrico con una duración de una fracción de segundo, luego la orden es amplificada en el mecanismo de operación para completar la operación del interruptor capaz de interrumpir las corrientes de cortocircuito.

El control incluye:

- Bobinas de cierre y de apertura
- Sistemas de relevadores de control
- Manómetros e interruptores de presión
- Sistemas de vigilancia y de alarmas
- Sistemas de reinflación para restaurar la energía que se consume en la operación.

2.5 CLASIFICACIÓN DE LOS INTERRUPTORES DE POTENCIA

Conforme se han incrementado las tensiones de operación y las capacidades de corto circuito de los sistemas de potencia, los interruptores de potencia en alta tensión han jugado un papel muy importante en dicho crecimiento. Se han desarrollado diferentes tecnologías, algunas que involucran el uso de medios de interrupción avanzados y continúan siendo estudiadas para lograr equipos más eficientes. Para efectuar la interrupción de corriente, algunos de los primeros diseños de interruptores, simplemente alargaban el arco a través de un par de contactos en aire; posteriormente se incorporaron estructuras de arco, incluyendo algunas con bobinas de soplo magnético, mientras que otros dispositivos usaron como medio de interrupción líquidos tales como aceite.

Algunos de esos primeros diseños han sido significativamente mejorados y algunas variaciones de este tipo de interruptores están todavía en uso, especialmente en aplicaciones de baja tensión, donde actualmente los interruptores de SF₆ son el tipo dominante de interruptores.

Para aplicaciones de interiores en tensiones de 5 a 38 kV, los interruptores en soplo de aire magnético fueron los interruptores de elección en los Estados Unidos de Norteamérica en los años setenta, mientras que en Europa y México los interruptores de pequeño volumen fueron muy populares. Por otra parte, para aplicaciones intemperie, para tensiones de 15 a 230 kV fueron muy usados los interruptores de gran volumen y los de soplo de aire.

Con la llegada de las tecnologías de vacío y hexafluoruro de azufre, los diseños antiguos de interruptores han sido rápidamente sustituidos y en la actualidad son considerados como tecnologías obsoletas.

Los interruptores se pueden clasificar de acuerdo: lugar de instalación, características externas de diseño, así como el método y diseño usado para la interrupción de la corriente.

2.5.1 Clasificación de los interruptores por lugar de instalación

Los interruptores de alta tensión pueden ser usados en instalaciones tipo interior y tipo exterior o intemperie. Los interruptores tipo interior son aquellos diseñados para usarse solo en el interior de edificios o en envolventes resistentes a la intemperie. Para media tensión es el rango de 4.76kV a 34.5kV estos son de tipo interior y están diseñados para usarse en el interior de tableros o cubículos metal-clad. La única diferencia entre los interruptores tipo interior y exterior es la envolvente externa o gabinete.

Las partes internas tales como los contactos, las cámaras de interrupción y el mecanismo, en la mayoría de los casos, son los mismos para los dos tipos, siempre y cuando las características nominales de corriente y tensión sean las mismas y que utilicen la misma tecnología para la interrupción de corriente

2.5.2 Clasificación por la ubicación de las cámaras

Desde el punto de vista de su diseño físico estructural, los interruptores para intemperie pueden ser clasificados como interruptores de tanque muerto e interruptores de tanque vivo.

Tanque muerto. Los interruptores de tanque muerto están definidos por las normas ANSI como un dispositivo de desconexión en el cual la envolvente o tanque está sólidamente aterrizada y aloja las cámaras interruptivas y el medio aislante.

Los transformadores de corriente son montados directamente en las boquillas, lo cual elimina los mecanismos de sujeción y cableado requerido como en el caso del montaje externo. Este tipo de interruptores ofrece ventajas particulares si el diseño de protección requiere el uso de varios transformadores de corriente montados por polo, como para un típico sistema americano, la posibilidad de estar disponible para un arreglo de transformadores de corriente enfrente o detrás del interruptor sobre el interruptor actual, permite esquemas de protección para satisfacer de una manera especial ahorro de costos. Además es relativamente simple para reemplazar los transformadores de corriente en el campo, los interruptores de tanque muerto son particularmente resistentes a los sismos debido a su diseño compacto y bajo centro de gravedad.

Los interruptores de tanque muerto presentan ciertas ventajas sobre los interruptores de tanque vivo, entre las cuales se tienen:

- a) Se pueden instalar transformadores de corriente tipo boquilla, tanto en el lado de línea, como en el lado de la carga del interruptor.
- b) Su construcción ofrece una capacidad de soporte sísmico mayor.
- c) Se embarcan ya ensamblados y ajustados desde la fábrica.
- d) Tiene una mejor estética.
- e) Ocupa menor espacio ya instalado.



Fig. 2-14 Interruptor SF6 de tanque muerto de 72.5 kV.

Tanque vivo. El interruptor de tanque vivo está definido como un dispositivo de desconexión, en el cual las cámaras interruptivas se encuentran soportadas en columnas aislantes y éstas quedan aislando la parte energizada del potencial a tierra, colocandola dentro del aislador, el cual puede ser de porcelana o de un material compuesto y está directo al alto potencial, dependiendo el nivel de tensión, se determina la longitud de los aisladores para la cámara del interruptor y la columna del aislador.

Para niveles de tensión más altos, son conectadas en serie varias cámaras de interrupción sobre el interruptor de tanque vivo e instaladas en la columna del aislador.

Los transformadores de corriente son también colocados separadamente en frente o detrás del interruptor; como en los interruptores de tanque vivo no pueden ocurrir corrientes de falla entre la unidad de interrupción y la envolvente, solo es necesario que se coloque un transformador de corriente por polo.

Una característica más de estos interruptores son sus compartimientos de gas relativamente pequeños, la ventaja del bajo volumen de gas es que hay una reducción de la cantidad de gas cuando se le da mantenimiento.

Para asegurar la correcta operación de los interruptores en regiones sísmicas, los interruptores pueden ser montados sobre estructuras antifricción, una solución que ha sido probada a más de 800 kv y ha probado su funcionamiento varias veces.

Los interruptores de tanque vivo comparados con los de tanque muerto, ofrecen las siguientes ventajas:

- a) Costo menor, ya que no incluye los transformadores de corriente.
- b) Utilizan menor cantidad de fluido para interrupción.
- c) Requiere menor espacio en el traslado.



Fig. 2-15 Interruptor SF6 de tanque vivo de 252 kV.

2.5.3 Clasificación de interruptores por el medio de extinción de arco

A lo largo de los años los interruptores han incorporado varios medios diferentes para disipar esta energía, tales como el agua, aceite, gases inertes, alto vacío, y aire comprimido.

Los interruptores que se utilizaban primitivamente en los circuitos eléctricos eran, generalmente de accionamiento manual y del tipo seccionador o cuchilla, con el aumento de las corrientes y de las tensiones requeridas en el sector industrial resultó que el arco que se formaba al abrir el interruptor dañaba o destruía los contactos, entonces se construyeron interruptores que abrían o cortaban rápidamente los circuitos por medio de un resorte o por acción de la gravedad, reduciendo a sí la duración del arco y la magnitud del deterioro del interruptor. Colocando el interruptor en posición vertical, con ruptura horizontal, la corriente de aire por convección, debida al calor del arco, tiende a extender el arco hacia arriba, alejándolo del interruptor, así mismo la acción magnética de la espira formada por el interruptor y el arco tiende a aumentar la longitud del arco extinguiéndolo.

De acuerdo con los elementos que intervienen en la apertura del arco de las cámaras de extinción, los interruptores se pueden clasificar en los siguientes grupos:

1. Gran volumen de aceite
2. Pequeño volumen de aceite
3. Neumáticos (aire comprimido)
4. Hexafluoruro de azufre (SF₆)
5. Vacío

2.6 INTERRUPTORES EN ACEITE

Fueron de los primeros interruptores que se emplearon en alta tensión y que utilizaron el aceite mineral para la extinción del arco.

Este interruptor se utiliza especialmente a la intemperie. Estos interruptores tienen básicamente un recipiente que contiene aceite, dentro del cual se instalan los contactos y el mecanismo de operación. Uno de los contactos es móvil y cuando se separa del contacto fijo se genera un arco eléctrico, la energía del arco se usa para fracturar las moléculas de aceite y producir gas hidrogeno, este se usa para adelgazar, enfriar y comprimir el plasma del arco hasta llegar a la extinción del mismo al pasar la onda de corriente por cero.

Las interrupciones de las altas corrientes de cortocircuito generan presiones extremadamente elevadas que deben atenuarse en forma segura o controlarse correctamente, de hecho estas presiones altas pueden usarse para extinguir el arco mismo, al cual se deben las presiones altas adicionalmente a las fuerzas mecánicas producidas por la presión del gas y el movimiento del aceite, hay también fuerzas electrodinámicas substanciales que actúan sobre el arco; estas tienden a aumentar el área de cualquier rizo o lazo formado por la corriente en el interruptor, por lo tanto desplazan al arco al exterior y lejos de la fuente generadora.

2.6.1 Desarrollo de los interruptores en aceite

En los primeros diseños, el arco era simplemente confinado en las paredes de un tanque con aceite, donde el proceso de extinción estaba acompañado por elongación del arco. Para lograr una interrupción exitosa en esas condiciones, era necesario generar un arco relativamente largo. Sin embargo, eran difíciles de controlar, y en la mayoría de los casos resultaban periodos de arqueo

muy largos. Las combinaciones aleatorias de arcos largos, que se traducen en altas tensiones de arcos acompañados por tiempos largos de arqueo, hacen impredecible la energía de arco que tiene que ser controlada y extinguida por el interruptor.

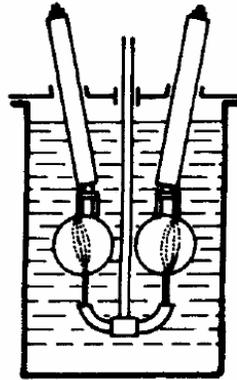


Fig. 2-16 Interruptor en aceite simple.

Desde entonces, este diseño se fue refinando y mejorando, pero mantuvo sus características de simplicidad en la construcción y su capacidad para interrumpir corrientes grandes, diversas modificaciones en los elementos de contacto se fueron introduciendo, poco a poco, para reducir el deterioro de los contactos y para colaborar en la rápida extinción del arco. El comportamiento impreciso de las burbujas de gas y el recorrido del arco en los interruptores de simple ruptura fue superado por diversos sistemas de control del arco, tales como rejilla desionización y dispositivos productores de corrientes de aceite. Tales dispositivos confinaban la presión del gas desarrollado durante la formación del arco, a fin de efectuar la extinción de una forma segura, reduciendo en gran manera su longitud y su duración.

El enfriamiento causado por el hidrogeno (debido a su alta conductividad) es muy efectivo e incrementa el voltaje requerido para la reignicion en forma significativa de 5 a 10 veces más alto que el voltaje de regnicion requerido por el aire.

Ventajas del aceite:

- Durante el arqueo, el aceite actúa como productor de hidrogeno, gas que ayuda a enfriar y extinguir el arco.
- El aceite proporciona aislamiento para los contactos vivos expuestos con respecto a las partes conectadas a tierra del tanque contenedor.
- Proporcionar el aislamiento entre los contactos después de que el arco se ha extinguido.

Desventajas del aceite:

- El aceite es inflamable y por lo tanto se tiene riesgo de explosión.
- Existe la posibilidad de que se forme una mezcla explosiva entre el hidrogeno producido y el aire.

- A causa de la descomposición del aceite se producen partículas de carbón, condición que reduce la resistencia dieléctrica por lo tanto requiere cambiarse periódicamente, lo que eleva costos de mantenimiento.
- Ocupa una gran cantidad de aceite mineral de alto costo.
- Son grandes y pesados.

2.6.2 Interruptores en gran volumen de aceite

Los primeros modelos para alta tensión en los que se usó aceite fueron de interrupción simple, sin ningún sistema especial para la extinción del arco, en este tipo el arco sólo está confinado dentro del tanque del aceite, la desionización del arco se debe enteramente a la turbulencia y al aumento de presión.

Para que la interrupción sea eficaz, es esencial tener un arco de longitud relativamente grande para que la turbulencia que ocasione en el aceite las presiones generadas por el arco la enfríe, a menudo los tiempos de arqueo y la cantidad de energía liberada antes de la interrupción varía sobre un amplio intervalo; por lo tanto en el diseño del tanque se necesita un factor de seguridad grande. El tanque debe ser hermético a la intemperie para evitar la entrada de humedad, en caso de que haya un colchón de aire arriba del aceite el hidrógeno formado puede pasar a través del aceite para mezclarse con el aire y formar una mezcla explosiva, a menos que se mantenga suficiente presión; la carga hidrostática del aceite sobre los contactos debe ser lo suficientemente grande para impedir que el gas escape a la superficie en forma de columna.

Es claro que, si los contactos se separan a alta velocidad puede aumentarse mucho la longitud del arco, debido a que recorren una mayor distancia los contactos móviles entre los ceros de corriente a los que ocurre la interrupción; si el movimiento de los contactos es lento éstos se pueden soldar al haber una interrupción de cortocircuito.

En la mayoría de los casos para tensiones de hasta 72.5 kV los tres polos del interruptor se encuentran dentro del mismo tanque; sin embargo en tensiones y capacidades de ruptura más elevadas se emplea un tanque separado por cada polo, aunque el accionamiento de los tres polos es simultáneo, por medio de un mando común.

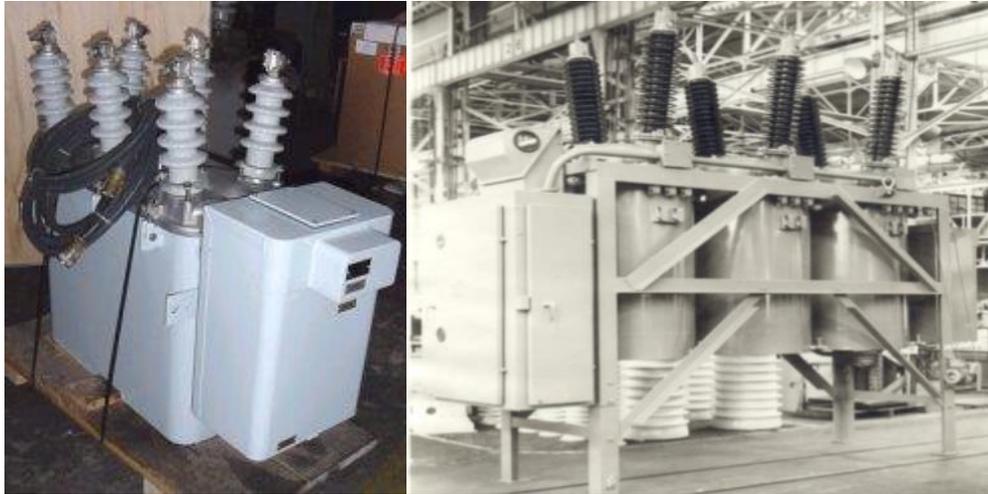


Fig. 2-17 Interruptor de un tanque e interruptor con tanques por cada polo.

Cada polo tiene doble cámara interruptiva, conectadas en serie, lo cual facilita la ruptura del arco a repartirse la caída de tensión según el número de cámaras. Para conseguir que la velocidad de los contactos sea elevada, de acuerdo con la capacidad interruptiva de la cámara, se utilizan poderosos resortes, y para limitar el golpe que se produciría al final de la carrera, se utilizan amortiguadores.

2.6.3 Cámaras para el control del arco

Con la aparición de los interruptores en gran volumen de aceite se generó también un desarrollo continuo de las cámaras interruptivas, cuya función es el control del arco. El funcionamiento de éstas consiste en que la corriente del arco eléctrico generado por la falla, desarrolla la presión necesaria para producir el soplado y extinguirlo. La presión generada está en función de la corriente del arco, es decir, un incremento de corriente genera un aumento de la presión. Debido a este aumento de presión se produce un soplado más potente y una mayor resistencia eléctrica del arco, por lo que la tensión transitoria de restablecimiento puede ser soportada por distancias más cortas entre contactos. En consecuencia, al aumentar la corriente, la extinción del arco se efectúa con arcos cada vez más cortos. Se muestra en la fig. 2-18 las principales cámaras para el control de arco.

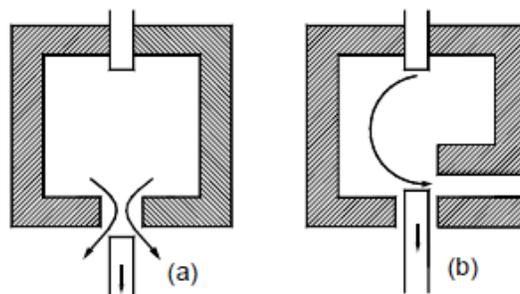


Fig. 2-18 Principales cámaras para el control de arco. a) Cámara de soplado axial; b) Cámara de soplado cruzado.

2.6.4 Interruptor en pequeño volumen de aceite

Tiene forma de columna y fue inventado en suiza por el Dr. J. Landry. Surgieron originalmente como un desarrollo de los interruptores en gran volumen de aceite. Trabaja mediante flujos de aceite como medio de extinción de arco, utilizando la energía propia del arco para generar dichos flujos. Su cámara de extinción tiene la particularidad de que la extinción de arco crece a medida que la corriente que se va a interrumpir crece. La forma de operación puede ser tanto automática como manual. Estos interruptores utilizan aproximadamente el 5 % de aceite de un interruptor de gran volumen de aceite para los mismos valores nominales de tensión y capacidad interruptiva. La principal diferencia entre estos, es que el interruptor en pequeño volumen usa el aceite sólo como medio interruptivo y tiene materiales aislantes sólidos para propósitos dieléctricos, mientras que en los de gran volumen el aceite sirve para ambas funciones.

En el interruptor en pequeño volumen de aceite, cada fase tiene su propia cámara, la cual está a potencial de la línea. La parte viva y tierra están aisladas mediante soportes aislantes, lo cual clasifica a éste como un interruptor de tanque vivo. Debido al pequeño volumen de aceite utilizado en estos interruptores, se presenta una carbonización muy rápida por la interrupción de fallas y por lo tanto, se requiere de un mantenimiento más frecuente que en los de gran volumen. Si el mantenimiento no es efectuado en el tiempo requerido, puede presentarse degradación interna en las superficies aislantes de la cámara interruptiva, lo cual puede provocar una falla catastrófica. Esta es la principal desventaja y una de las razones del uso limitado de estos interruptores.

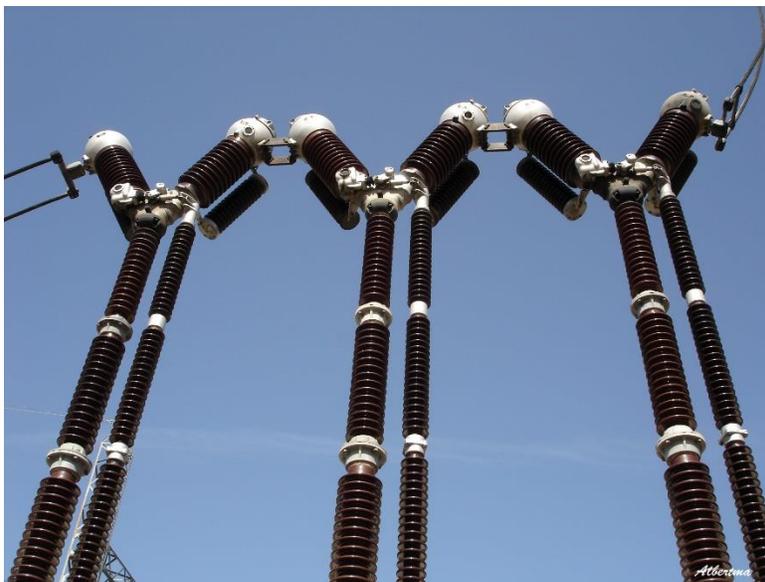


Fig. 2-19 Interruptor en pequeño volumen de aceite.

2.6.5 Cámaras de extinción usadas en interruptores de pequeño volumen de aceite

El tipo de cámara de extinción utilizada por los interruptores en pequeño volumen de aceite es la denominada de extinción por auto-soplado. Se denomina así porque el propio arco eléctrico

suministra la energía necesaria para su extinción. Esta energía crece con la corriente que se ha de interrumpir y su capacidad de ruptura límite está relacionada con su robustez mecánica. En las cámaras de interrupción el soplado puede ser longitudinal o transversal. En las de soplado longitudinal los gases bajo presión aseguran un barrido longitudinal del arco. Debido a la reducida sección de evacuación de gases, la presión en la cámara es normalmente alta, incluso con pequeñas corrientes.

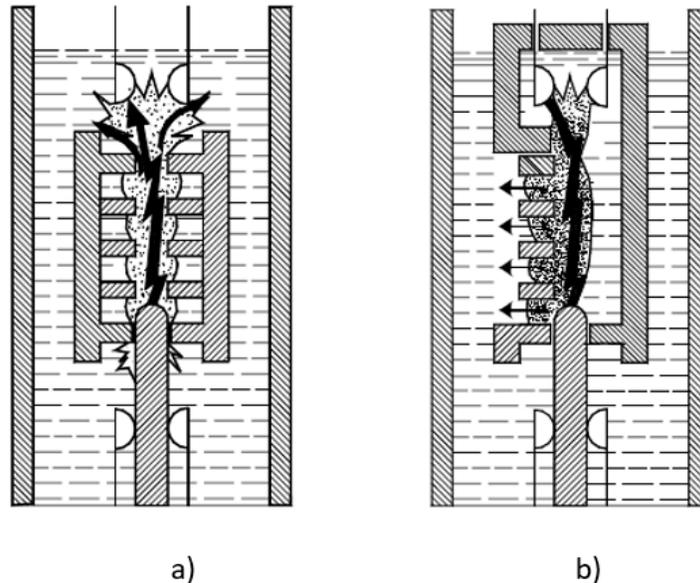


Fig. 2-20 Camaras de extincion en un interruptor en pequeño volumen de aceite a) camara de soplado longitudinal; b) camara de soplado transversal.

En las cámaras de soplado transversal los gases escapan por las aberturas ubicadas en la periferia de la envoltura. Debido a la mayor sección de los orificios, la presión es más débil que en el caso anterior, lo que permite la extinción rápida de grandes corrientes.

Existe una cámara llamada de soplado mixto que reúne las ventajas del soplado longitudinal con las del transversal. En los interruptores provistos con este tipo de cámaras, y a partir del contacto fijo, se sitúan primero las cámaras de soplado transversal y después las de soplado longitudinal.

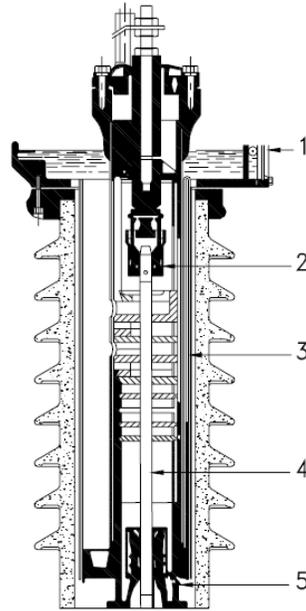


Fig. 2-21 Cámara de soplo mixto. 1. Nivel de aceite, 2. Contacto deslizante superior (fijo), 3. Cubierta aislante, 4. Espiga de contacto móvil, 5. Contacto deslizante inferior (móvil).

2.7 INTERRUPTOR NEUMÁTICO

Este interruptor es también conocido con el nombre interruptor de aire comprimido o de soplo de aire, actualmente es sustituido por la tecnología del SF6 en la mayoría de los casos.

En todos los diseños de interruptores de soplo de aire, el proceso de interrupción se inicia por la formación del arco entre dos contactos y simultáneamente, con el inicio del arco, con la apertura de una válvula neumática que produce un soplo de aire a alta presión, ésta presión es dirigida al arco y empuja el arco a una cámara en donde este se divide en pequeños arcos lo cual permite enfriarlos rápidamente de forma individual y lograr la desionización y por lo tanto extinguir el arco, la extinción se efectúa con la primera corriente cero.

Dependiendo de la dirección del flujo del aire en relación con la columna del arco, existen tres tipos básicos de orientación del soplo, los cuales son: soplo axial, soplo radial y soplo cruzado.

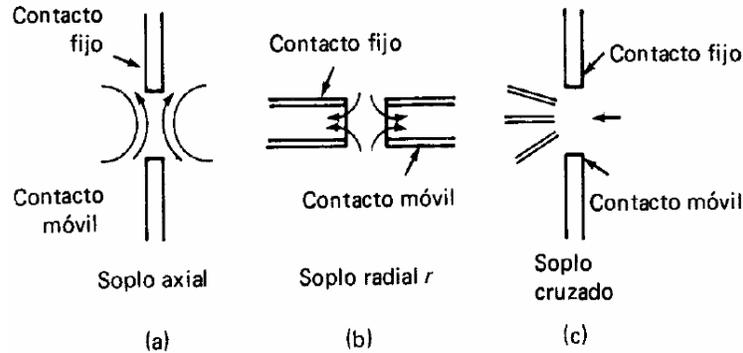


Fig. 2-22 Tipos de soplo en un interruptor neumático.

El interruptor neumático enfría el arco eléctrico por medio de aire seco y limpio a presiones que oscilan entre 15-30 bares, niveles donde el arco eléctrico es altamente extinguido debido a las velocidades del aire en el núcleo del arco eléctrico. Además, tiene la particularidad de ser independiente de la corriente presente en el circuito que se va a desenergizar; por ende, los niveles de presión y masa de aire son constantes.

Este tipo de interruptor tiene una fuente externa de aire a presión (deposito), que se utiliza al momento de operar y comúnmente se libera medio ambiente. Dicho aire a presión se usa también para operar el interruptor.

Tienen la gran ventaja de que pueden ser operados por fase, lo cual es de gran importancia para mantener la estabilidad del sistema cuando se presentan fallas monofásicas en las líneas de transmisión. Al abrir solo una fase dañada, el flujo de potencia continua y la estabilidad se mantiene.

Es un interruptor muy seguro, no tiene riesgos de incendio o explosión, opera muy rápido, y puede usarse en la reconexión automática, pero en razón de su construcción (bombas, motor, compresor) suele ser costoso.

2.7.1 Factores que influyen en el funcionamiento de los interruptores neumáticos

Hay un cierto número de parámetros limitados que influyen en el funcionamiento del disyuntor; a continuación se examinan los más importantes de estos factores:

- Presión del aire.** El aire puede comprimirse con facilidad y se ha demostrado que la capacidad de interrupción dieléctrica aumenta hasta por lo menos 150 atmósferas. Por lo tanto, para la misma estructura de contactos, puede esperarse que el funcionamiento varíe en función de la presión. Los resultados indican que por la presión en el chiflón, hay un incremento lineal de la capacidad interruptiva, alcanzándose el límite inferior cuando el ajuste del entrehierro de los contactos no puede soportar el voltaje. La utilización de gas a alta presión permite tener altas velocidades en el mecanismo y logra un corte rápido del arco.
- Severidad del circuito.** Los interruptores neumáticos son sensibles a las variaciones del régimen de elevación del voltaje de restablecimiento (REVR), el cual se toma normalmente

como una medida de la severidad del circuito. Como el efecto del soplo es constante para todas las corrientes, al aumentar los MVA, disminuye la velocidad con la que el entrehierro recupera su resistencia dieléctrica, la cual varía aproximadamente en razón inversa de la cantidad de ionización, es decir, en razón inversa a la corriente. A valores bajos de MVA, el disyuntor puede aceptar mejores valores del REVR que mayores valores de MVA.

- c) Distancia entre contactos. La mejor condición para la extinción del arco se obtiene con una distancia específica óptima entre los contactos. Si esta distancia se aumenta o disminuye, la extinción del arco se vuelve menos efectiva; es posible obtener una relación que ligue el funcionamiento con la geometría de la estructura de los contactos.
- d) Material de los contactos. El funcionamiento mejora usando metales con un alto punto de ebullición, tales como los compuestos de tungsteno y cobre, con estos metales puede aumentarse la capacidad interruptiva, reducirse considerablemente el quemado y la erosión, y minimizarse la emisión de flama.
- e) Área de la sección transversal del orificio de salida. La capacidad de interrupción aumenta con el área de la sección transversal del orificio a través del cual escapan los gases calientes y descompuestos. Esto lo explica el hecho de que el arco libera grandes cantidades de calor en tiempos muy breves, y que el aire que se encuentra dentro de la cámara se expande súbitamente.
- f) Interrupción por resistencia. La resistencia conectada en paralelo con el interruptor, amortigua las oscilaciones de voltaje. Cuando el voltaje y los MVA de un circuito son fijos, los efectos transitorios se pueden modificar solamente con el aumento de C o con la reducción de R, aumentar C es antieconómico, pero la reducción de R puede lograrse poniendo el interruptor en derivación, usando una resistencia durante el período de interrupción.

2.7.2 Desarrollo de los interruptores neumáticos

El desarrollo de los interruptores neumáticos se realizó en tres etapas, las cuales describimos a continuación:

- a) Interruptores de aire presurizados momentáneamente, con igualador en la atmósfera
- b) Interruptores de soplo de aire presurizados momentáneamente con igualador en cámara separada presurizada.
- c) Interruptor de soplo de aire presurizados permanentemente con igualador en cámaras presurizadas separadas.

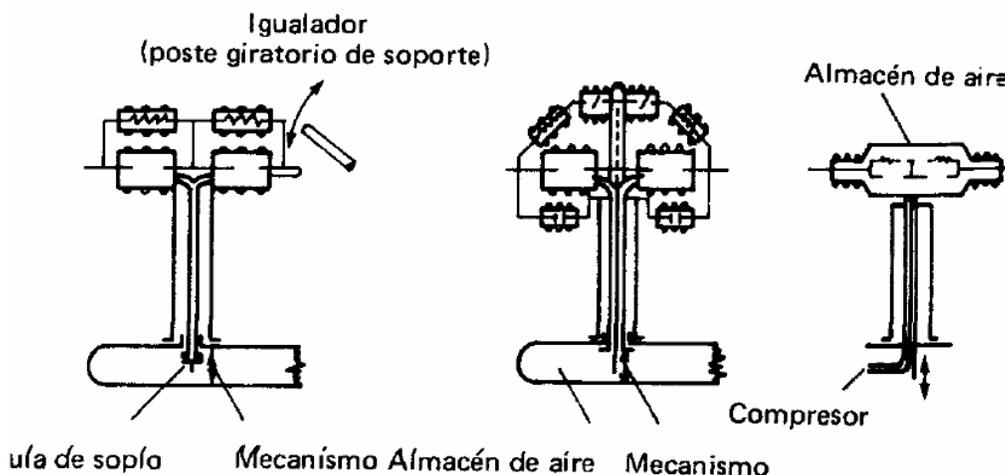


Fig. 2-23 Disposición eléctrica de los interruptores principal y auxiliar, con capacitores y resistencias de graduación.

En el primer diseño, la válvula de soplo del aire se coloca dentro del tanque de almacenamiento a potencial de tierra y los contactos son separados por la presión del aire que actúa contra un resorte, el soplo se elimina después de alrededor de 100 ms y vuelven a cerrarse los contactos. Un brazo, igualador abre en aire libre, alrededor de 40 ms después de que los contactos principales interrumpen la corriente de unos cuantos amperes que pasa por las resistencias de graduación del voltaje.

En la segunda serie de los interruptores neumáticos, la operación de disparo se logra admitiendo aire comprimido dentro del interruptor cuando se abre la válvula principal. El aire activa el pistón haciendo que se abran los contactos y luego extingue el arco, los gases de descarga se expanden hacia la atmósfera y son expulsados por los chiflones; unas cuantas centésimas de segundo más tarde las válvulas se cierran y el aire comprimido ya no puede expulsar más a la atmósfera, los contactos se mantienen abiertos en aire comprimido el interruptor puede permanecer indefinidamente en esta posición.

En la tercera serie de estos interruptores, el aire comprimido siempre se almacena al 100% del valor nominal, la operación de disparo se logra por medio de un relevador auxiliar que primero abre las válvulas de descarga, operación que va seguida por la apertura de los contactos. Unos cuantos ms más tarde se vuelven a cerrar las válvulas de descarga o de alivio, mientras que los contactos se mantienen abiertos; al cerrar, los contactos se cierran por la acción despresurizadora mientras que las válvulas permanecen todavía cerradas.

Ventajas de los interruptores neumáticos:

- No hay riesgos de incendio.
- Operación muy rápida.
- Pueden emplearse en sistemas con reconexión automática.
- Alta capacidad de ruptura.
- Comparativamente menor peso.

Desventajas:

- Poseen una compleja instalación debido a la red de aire comprimido.
- Su construcción es más compleja.
- Mayor costo.

2.8 INTERRUPTORES EN VACÍO

La alta rigidez dieléctrica que presenta el vacío (es el aislante perfecto) ofrece una excelente alternativa para apagar en forma efectiva el arco ya que la interrupción se efectúa en el primer valor cero de la corriente, acumulándose la resistencia dieléctrica entre los contactos a una velocidad miles de veces mayor que la obtenida con los interruptores convencionales, estas propiedades hacen más eficientes a los interruptores de vacío, a la vez que menos voluminosos y más baratos, la vida de servicio es también mucho mayor que la del equipo convencional y difícilmente requieren mantenimiento.

Esta tecnología aparece en el año de 1,960. Son aparatos que, en teoría, abren en un ciclo debido a la poca inercia de sus contactos y a su corta distancia, los contactos están dentro de botellas especiales en las que se ha hecho el vacío casi absoluto; el contacto fijo está sellado con la cámara de vacío y por el otro lado entra el contacto móvil, que también está 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 de latón.

Cuando los contactos principales en un ambiente de vacío se separan, la corriente a ser interrumpida se convierte en un arco que se disipa en forma de un plasma de vapor metálico, al pasar la forma de onda por cero el arco es totalmente extinguido y el vapor se condensa en el orden de los micro-segundos, como resultado de esto podríamos apuntar una alta fortaleza dieléctrica y una velocidad de interrupción muy rápida.

En estos interruptores, el arco se produce a través del vapor metálico, el vapor se obtiene al abrirse las cavidades que se introducen en el metal de los electrodos a la hora de su fundición y se desprende con la fusión del material producida por el arco.

El vapor metálico controla el arco y su dosificación en la aleación regula la intensidad del mismo, evitando que si hay un valor excesivo se provoque un reencendido y si el valor es mínimo se produce una sobretensión elevada, el control del vapor metálico generado es el meollo del diseño de este interruptor.

La separación común de los contactos oscila entre 5 y 10 mm. Tiene alta aplicación en voltajes medios, hasta 38 kV, y con algunos hasta 70 kV.

2.8.1 Comportamiento del arco en el vacío

Cuando la separación se realiza en el aire, las moléculas ionizadas son, probablemente, las principales portadoras de las cargas eléctricas y a ellas se debe el bajo valor de interrupción. Con el arco al vacío, los átomos neutrales, los iones y los electrones, deben provenir finalmente, de los electrodos mismos y no del medio en el que se forma el arco; a medida que se separan los contactos portadores de corriente, la corriente se concentra en unos cuantos sitios altos de las superficies de los contactos.

La conducción normal a través del metal cesa cuando se evapora el último puente entre los dos contactos; los fenómenos que ocurren en los sitios activos de los electrodos de un disyuntor al vacío son semejantes a los fenómenos convencionales de los arcos de alta presión, en los que la densidad de corriente está en el intervalo de 10^5 a 10^6 amperes/cm². En el arco que se forma al vacío, la emisión ocurre solamente en las manchas o regiones del cátodo y no proviene de la superficie entera. Por esta razón, al arco en vacío se le conoce también como arco de cátodo frío.

A corrientes altas, el vapor de metal ionizado se extiende en un volumen bastante grande en torno a los electrodos; a corrientes bajas, la cantidad de vapor que se produce se reduce considerablemente, como el vapor que se desprende de las manchas o regiones del cátodo se expande rápidamente en el vacío, se vuelve crecientemente pequeña la probabilidad de mantener una densidad portadora de carga suficiente para retener la conductividad adecuada en la columna y sostener el proceso de emisión.

2.8.2 Estabilidad del arco en el vacío

Se ha demostrado que la estabilidad del arco depende de 1), el material de los contactos y su presión de vapor, y 2), parámetros del circuito tales como voltaje, la corriente, la capacitancia y la inductancia. En circuitos de corriente baja, la mayor parte de la evaporación se realiza en puntos discretos conocidos como manchas o regiones del cátodo; a corrientes más altas, el gas se evapora en las manchas o regiones del cátodo al ánodo; adicionalmente a estas fuentes, alojamiento de los contactos se le agrega gas cuando éste se obtiene de otras partes de alojamiento debido a la alta temperatura y al choque del vapor del metal.

Mientras mayor es la presión del vapor a temperaturas bajas, mayor será la duración del arco; poniendo en derivación los contactos, con diferentes valores de capacitancia, se demuestra que a mayor capacitancia menor es la vida media del arco. Agregando una inductancia grande en serie se logra un incremento de la duración del arco, el nivel de corte depende de la presión del vapor y de la conductividad térmica del cátodo.

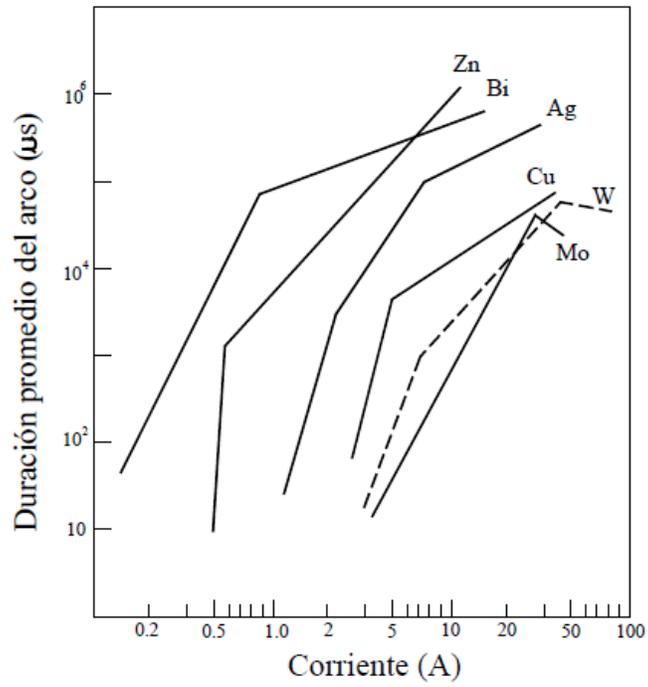


Fig. 2-24 Duración promedio del arco en función de la corriente para algunos metales puros en vacío.

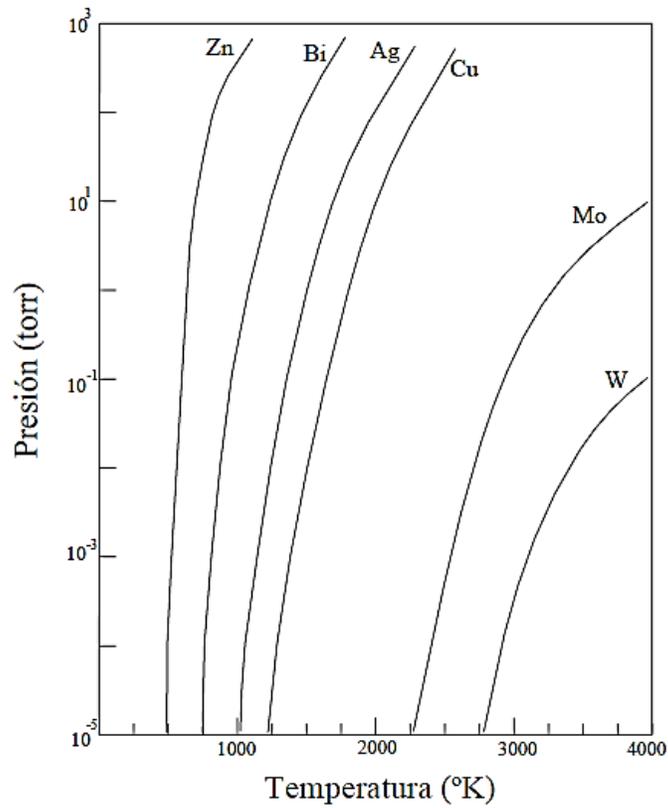


Fig. 2-25 Relación entre la presión del vapor y la temperatura para varios metales en vacío.

2.8.3 Interrupción en vacío

Atmosférico, aceite, SF₆, papel, porcelana, etc., comparados con el vacío, su capacidad de soportar tensión es pequeña. En un entrehierro de 1 cm, sólo unos cuantos electrones por millón llegan a chocar con las moléculas y formar iones. A este hecho es al que se debe la muy alta resistencia a la interrupción del vacío. En este intervalo, la resistencia a la interrupción es independiente de la densidad del gas y varía sólo con la longitud del entrehierro.

La Fig. 2-26 muestra la rigidez dieléctrica de varios materiales aislantes. Típicamente la tensión que puede soportar un entrehierro decrece con una reducción de la densidad (presión y temperatura) a un mínimo y se incrementa rápidamente con una reducción adicional de la densidad del gas. Esto se ilustra en la Fig. 2-27, que muestra la curva de *Paschen* donde se grafica la tensión de ruptura, en función del producto de la presión y distancia del entrehierro.

La iniciación de la interrupción al vacío, como la del arco formado al vacío, debe depender de los productos que se forman bajo la acción de campos altos, desde los electrodos y las paredes, que son bombardeados por los electrones emitidos por el campo; más que del medio en el que están sumergidos los electrodos. El valor real del voltaje de interrupción para un entrehierro dado, depende en alto grado del estado en que se encuentren las superficies de los electrodos; en general la resistencia a la interrupción después del arqueo, puede mejorarse aplicando impulsos en sucesión de alto voltaje.

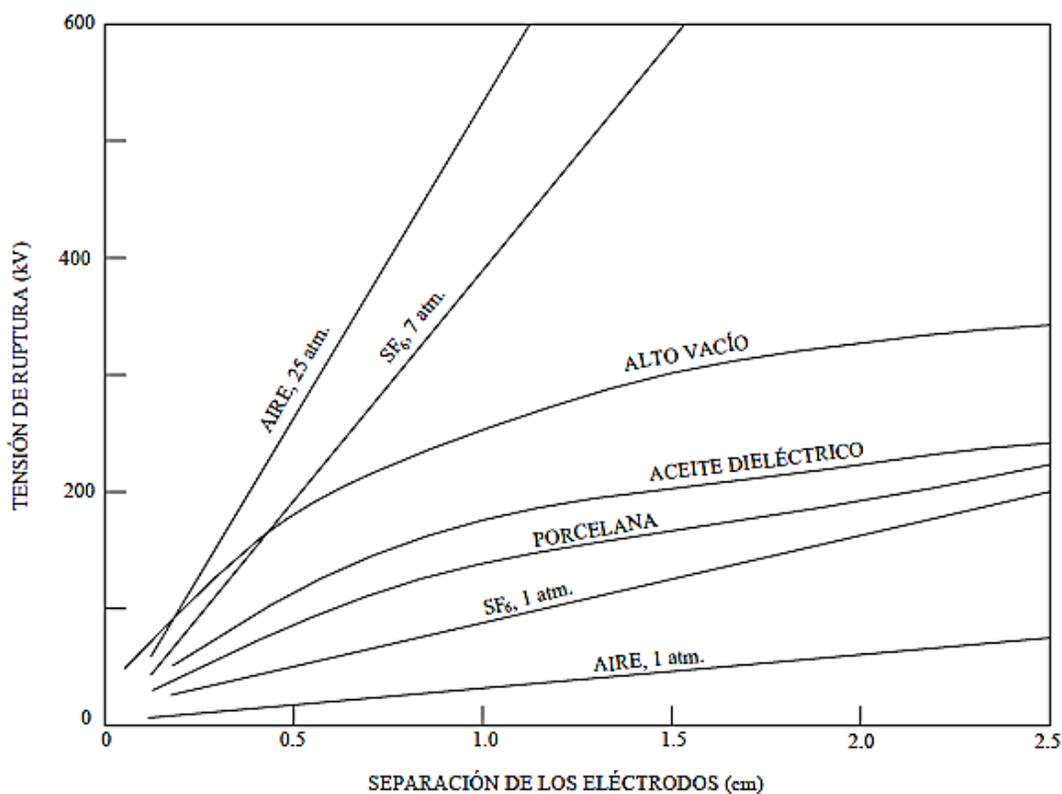


Fig. 2-26 Rigidez dieléctrica de varios materiales aislantes en vacío.

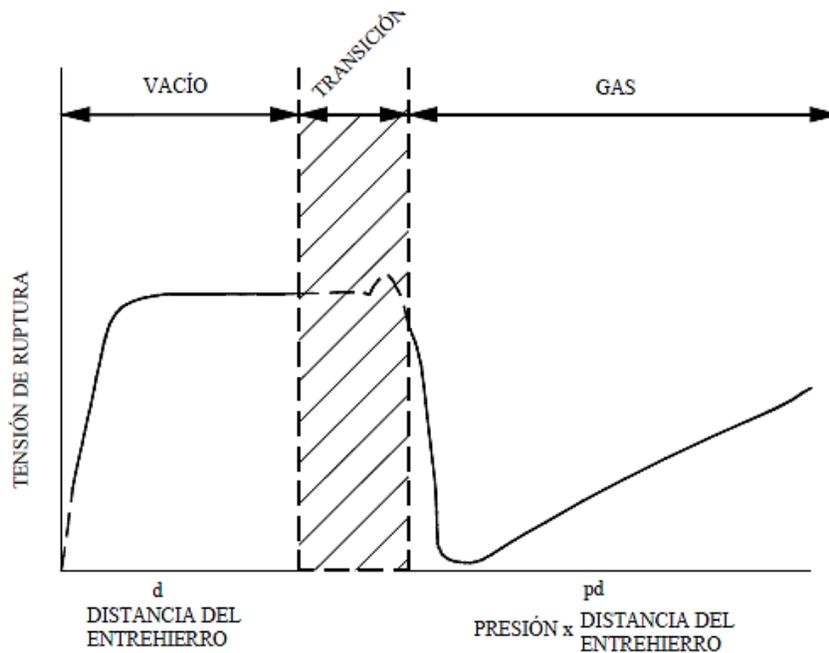


Fig. 2-27 Diagrama esquemático de la curva de Paschen y su relación de tensión de ruptura en vacío en función de la distancia del entrehierro.

La Fig. 2-27 muestra la tensión de ruptura promedio en función de la longitud del entrehierro para diferentes materiales con superficies ásperas en un vacío del orden de 10^{-6} torr. También se muestra información similar del aire para propósitos de comparación. La mayoría de los materiales muestran valores altos de resistencia a la ruptura en longitudes de entrehierro menores a 3 mm para una geometría particular de electrodos. Esta característica permite el uso de entrehierros muy cortos en equipo de interrupción en vacío resultando en mecanismos de operación simples, lo cual resulta en velocidades de operaciones mayores que los equipos de interrupción convencionales.

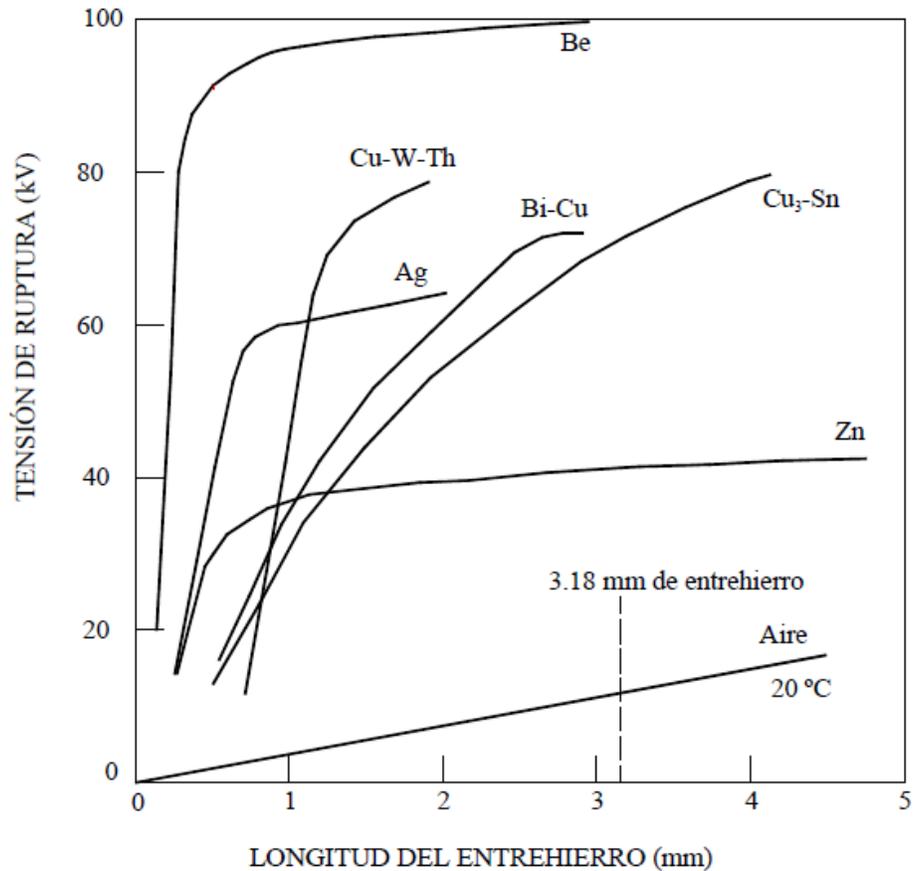


Fig. 2-28 Curvas características de tensión de ruptura para diferentes materiales de contactos en vacío.

2.8.4 Interrupción prematura o Corte de corriente

Al disminuir la intensidad de la corriente, el arco tiende a extinguirse a un nivel finito de la corriente, cuyo valor depende de la presión de vapor y de las características de la emisión de electrones del material de los contactos, a diferencia de lo que sucede en los interruptores de aceite y los neumáticos, donde la interrupción prematura o corte de corriente se origina debido a una inestabilidad en la columna del arco.

El corte conduce a sobrevoltajes excesivos que ponen en peligro el aislamiento del sistema y que ocasionan el reencendido del arco; es conveniente disipar energía en el arco mismo y después del corte.

Sin embargo, básicamente debe evitarse el corte, el nivel de la corriente al que ocurre el corte se puede reducir escogiendo un material para los contactos que dé el suficiente vapor de metal para permitir que la corriente llegue a un valor muy bajo o a cero.

2.8.5 Materiales de los contactos

El requisito más importante del material de los contactos es que ceda la baja presión de vapor en el momento del arqueo; aunque los metales de baja presión de vapor son mejores desde los puntos de vista de la extinción del arco, los metales de alta presión de vapor y de baja conductividad parecen ser más convenientes para limitar las consecuencias desfavorables debidas al corte de la corriente.

Los metales con buenas conductividades térmica y eléctrica tienen, invariablemente, bajos puntos de fusión y de ebullición, alta presión de vapor, alta temperatura, bajas fusiones de electrodos y son considerablemente blandos, los materiales que tienen altos puntos de fusión y de ebullición, tienen bajas presiones de vapor a altas temperaturas pero son malos conductores.

Las consideraciones anteriores indican que la parte más importante de un desconectador en vacío es la selección del material de los contactos. Las propiedades de este material son:

- Buena conductividad eléctrica.
- Buena conductividad térmica.
- Alta dureza al frío y al calor para evitar desgaste al operar.
- Alta densidad.
- Resistencia de los contactos a quedar soldados.
- No debe tener película aislante en la superficie, y si existe, debe ser conductora.
- Bajo contenido de gas.

2.8.6 Construcción de los interruptores de vacío

En este tipo de interruptor van instalados dos contactos dentro de un alojamiento aislado y sellado al vacío, uno está fijo y el otro puede moverse una distancia corta; una protección metálica rodea los contactos y protege el alojamiento de aislamiento, por lo general constan de dos sub-ensambles:

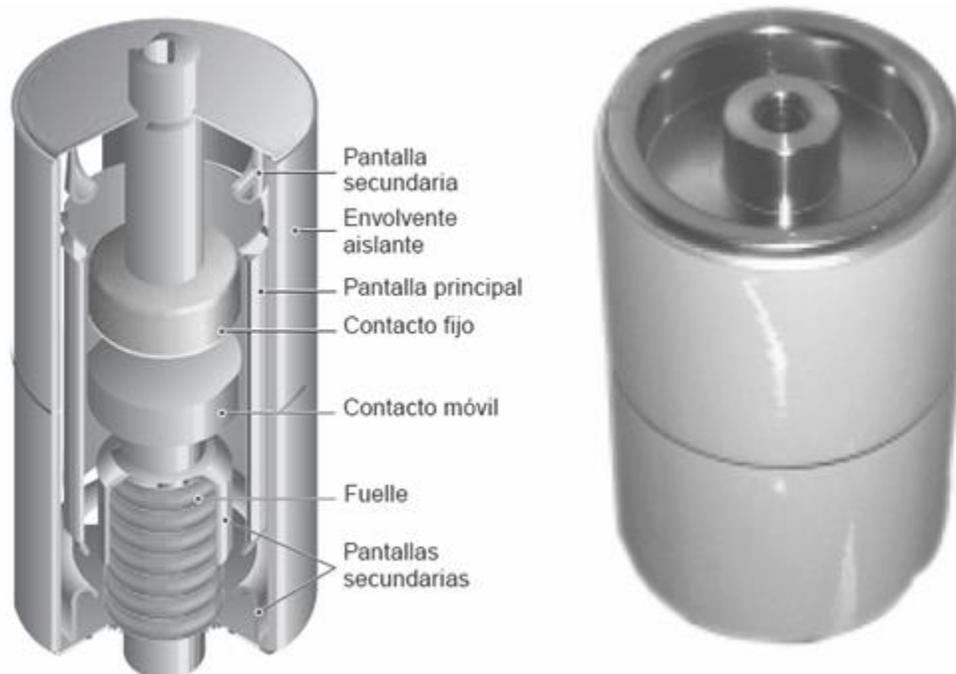


Fig. 2-29 Construcción de un interruptor de vacío.

1. **Cámara de vacío.** Esta se fabrica de un material sintético, la cual se aloja en un tubo exterior de plástico reforzado con fibra de vidrio o, simplemente, de vidrio o de porcelana; dentro de la cámara están los contactos, una protección metálica y un fuelle metálico, estando la cámara sellada.

El fuelle metálico, que generalmente se hace de acero inoxidable, se emplea para mover el contacto inferior y proporciona un entrehierro del orden de 5 a 10 mm que depende de la aplicación del interruptor. El diseño del fuelle tiene una significación particular porque la vida del interruptor depende de la capacidad de esta parte para efectuar satisfactoriamente las operaciones repetidas.

2. **Mecanismo de operación.** El extremo inferior está fijo a un mecanismo accionado por resorte o por solenoide, de manera que el fuelle metálico que está dentro de la cámara se mueva hacia arriba y hacia abajo durante las operaciones de cierre y apertura, respectivamente. El movimiento de los contactos debe ser tal que evite el rebote, sin embargo, debe haber suficiente presión para permitir una limpieza razonable y lograr una buena conexión entre los dos contactos.

2.8.7 Aplicación de los interruptores en vacío

Tiene una aplicación en el campo de la interrupción de alta tensión, en donde se requiera bajo costo y baja capacidad interruptiva de falla, capacidad para un cierto número de operaciones de

interrupción con carga sin mantenimiento y en algunas aplicaciones donde se requiera equipo que pueda interrumpir cargas de línea o corriente de capacitores sin restablecimiento.

Si el costo es bajo, tales interruptores serían ideales para controlar los bancos de capacitores de alta tensión en derivación, que se usan tanto en las subestaciones pequeñas como en las grandes, en las que la interrupción de fallas pueda manejarse mediante otro interruptor; estos son interruptores para conexión a alta velocidad y pueden tener muchas aplicaciones industriales.

Ventajas:

- Tiempo de operación muy rápido.
- Larga vida sin mantenimiento, debido al hermetismo de la cámara de interrupción, no se ven afectados por condiciones atmosféricas como es la oxidación o formaciones de capas extrañas.
- El interruptor no se ve afectado en su funcionamiento por variaciones bruscas de la intensidad de corriente.
- Tasa de recuperación dieléctrica muy elevada.
- Bajos niveles de ruido.

Desventajas:

- Dificultad para mantener la capacidad de vacío.
- Capacidad de interrupción limitada.
- Generación de sobretensiones.

2.9 INTERRUPTORES EN GAS HEXAFLUORURO DE AZUFRE (SF6)

Estos interruptores son los de más reciente desarrollo, ya que datan de la década de los 60's, se denominan así debido a que las cámaras de extinción operan dentro de hexafluoruro de azufre (SF6). Estos interruptores se emplean principalmente en alta tensión y extra alta tensión. En comparación con el aire a la misma presión, presenta hasta tres veces más rigidez dieléctrica. Debido a esta alta rigidez dieléctrica es un excelente aislante, y por esta razón es posible una reducción considerable en el tamaño de las subestaciones, hasta un 50 %.

El gas inerte, hexafluoruro de azufre, ha demostrado ser un excelente medio para enfriamiento de arco y aislamiento para interruptores. Éste se usa en una gran variedad de equipos eléctricos debido a las ventajas que tiene sobre otros medios, tales como el aire y el aceite. Los beneficios de su uso proporcionan un diseño simple, una excelente limpieza y una confiabilidad y compactibilidad de los equipos.

El diseño original de este tipo de interruptores fue una modificación a la tecnología de los interruptores de sople de aire. Esta modificación consistió en agregar una trayectoria cerrada para los gases de escape. El SF6 tiene bajos niveles de presión y solo en caso de operar el interruptor se aumenta la presión en el área cercana al arco.

En los primeros interruptores se usaron dos presiones; la menor de 3 bars, llenando los tanques y la mayor de unos 18 bars, dentro de las cámaras de extinción.

Esto se hizo con el fin de evitar que al abrir el interruptor sus contactos, el soplo de gas produjera enfriamiento y el gas pasara al estado líquido, posteriormente se ha usado una sola presión, con lo cual se disminuye el tamaño de los interruptores en un 40%, y la cámara al abrir los contactos tiene un émbolo unido al contacto móvil, que al operar comprime el gas y lo inyecta sobre el gas ionizado del arco, que es alargado, enfriado y apagado al pasar la corriente por cero.

Los interruptores pueden ser de polos separados, cada fase en su tanque, o trifásicos en donde las tres fases utilizan una misma envolvente. Se fabrican para tensiones de 115kV hasta 800kV y las capacidades de interrupción varían de acuerdo con el fabricante, llegando hasta magnitudes de 80 kA, que es un caso muy especial.

Este tipo de aparatos 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 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 estén 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 de ser bloqueado el circuito de control de apertura para evitar un accidente.



Fig. 2-30 Interruptor en gas SF₆ tipo tanque vivo de 363 kV.

2.9.1 Partes esenciales de un interruptor de SF6

Las partes esenciales de un interruptor de SF6 son: a) el tanque, b) las unidades interruptoras, c) el mecanismo de operación, d) los bushings o casquillos y e) el sistema de gas.

- a) **Tanque.** Debido a que las propiedades aislantes del SF6 son mejores, se reduce mucho la distancia entre las partes que están al potencial de la línea y las partes aterrizadas; no se originan presiones debidas a la operación en SF6, los tanques se diseñan para una presión de casi cuatro veces y se prueban a seis veces la presión. El eje rotatorio que transmite el movimiento mecánico al exterior del tanque, va sellado por anillos de teflón en forma de V, los cuales no son afectados por un cambio en la temperatura ambiente.

- b) **Unidades interruptoras.** Generalmente se emplea teflón, material que es resistente al arqueo y cuya contaminación en el gas es despreciable. Las disposiciones de los interruptores varían desde los contactos de interrupción simple hasta los diseños con sople de gas, por su gran capacidad para la interrupción del arco, la corriente de gas que pasa por el orificio es pequeña y también las presiones que producen dicha corriente y que se requieren para la extinción del arco.

- c) **Mecanismo de operación.** En la operación el resorte de disparo acciona los contactos móviles y abre simultáneamente la válvula del recipiente de presión; el gas a presión fluye hacia las cámaras de interrupción y extingue el arco, al término de la operación el mecanismo libera la válvula del recipiente de presión, la cual se cierra debido a la acción de un grupo de resortes.

- d) **Bushings o casquillos.** Estos contienen SF6 a una presión de 2 kg /cm² y son más sencillos que los bushings o casquillos del condensador; contienen un conductor hueco, una brida de fijación, los aisladores de porcelana superior e inferior y los resortes que mantienen unido al conjunto. El gas que hay en los casquillos se comunica con el tanque a través de pequeños agujeros que hay en la parte superior del conductor hueco, el gas de los casquillos no es afectado por ninguna perturbación que ocurra en el instante en que se interrumpa la corriente, en el fondo del conductor hueco se coloca un filtro que contiene aluminio activado, el cual elimina la probabilidad de contaminación del SF6 dentro del casquillo.

- e) **Sistema de gas.** Un compresor envía de regreso el gas después de cada interrupción al recipiente de alta presión, siendo un circuito cerrado, no escapa gas a la atmósfera; debajo de cada tanque hay un recipiente auxiliar de gas, que contiene suficiente gas para cuatro interrupciones consecutivas sin necesidad de poner en marcha el compresor.

Estos son los dos principios fundamentales que se utilizan en este tipo de interruptores:

- Tipo soplador
- Autosoplado.

2.9.2 Tipo soplador

La característica principal de los interruptores de soplo es que en la cámara interruptiva tienen ensamblado una combinación de pistón y cilindro como parte de la estructura de los contactos móviles.

En posición normal, la corriente pasa sobre los contactos es conducida del portador de corriente superior al inferior a través de los contactos principales y el cilindro soplador (*puffer*). La precompresión del SF₆ gaseoso comienza con la operación de apertura. Se separan los contactos del paso continuo de corriente y se conmuta la corriente a los contactos de arqueo. Cuando el conjunto móvil es empujado hacia la posición abierta, la válvula de relleno es forzada a la posición de cerrado y el gas SF₆ empieza a comprimirse entre el cilindro *puffer* móvil y el embolo fijo. En el instante de separación de los contactos de arqueo, se alcanza la presión que se requiere para extinguir el arco. El arco producido se jala y se expone al gas, el cual escapa a través del espacio anular entre la boquilla de extinción y el contacto móvil de arqueo. Hasta que se alcanza la posición abierta, el SF₆ gaseoso sigue saliendo del cilindro del soplador.

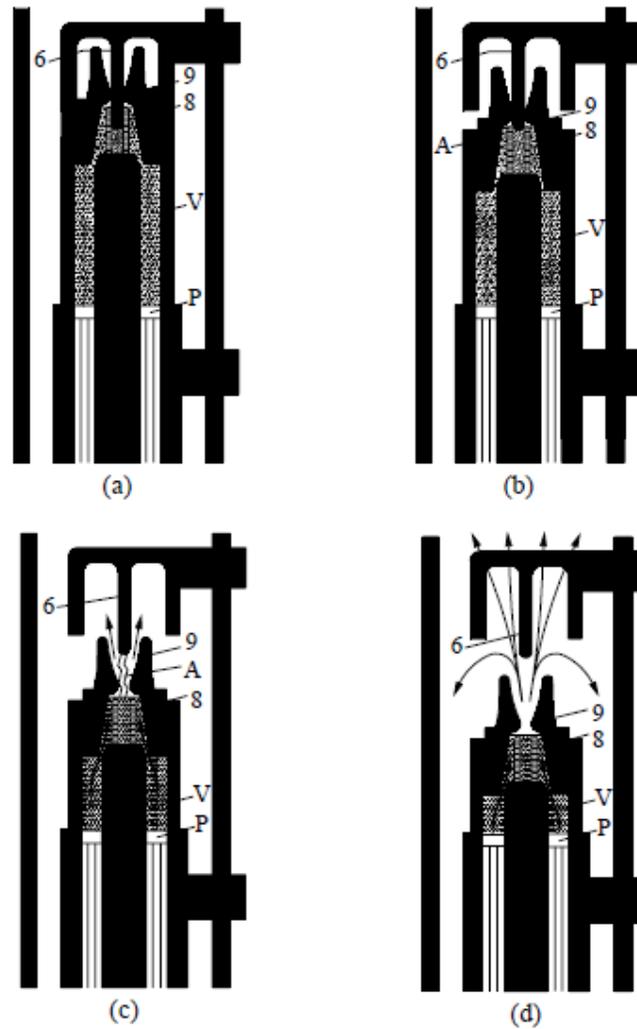


Fig. 2-31 Principio de funcionamiento del interruptor de sopro. (a) Interruptor cerrado, (b) Inicio de la apertura de los contactos principales, (c) Arqueo en la separación de contactos e inicio de flujo de gas, (d) Interrupción completa.

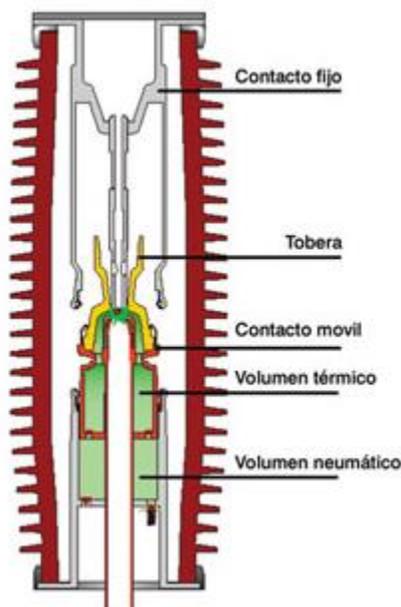
Secuencia de operación. Como puede observarse en la Fig. 2-31 (a) la cámara interruptiva se encuentra en la posición de cerrado, donde puede verse el volumen (V). Durante la apertura, los contactos principales se separan seguidos por los contactos de arqueo, como se ve en la Fig. 2-31 (b). El movimiento de los contactos provoca que el volumen (V) disminuya comprimiendo el gas contenido en él.

2.9.3 Autosoplado

Los interruptores del tipo autosoplado, aprovechan la energía térmica liberada por el arco para calentar el gas e incrementar su presión.

La operación del autosoplado empieza de la misma manera que el soplador. Cuando los contactos de arco se separan, se forma un arco entre el contacto de arco móvil y fijo. El calor del arco comienza a calentar el gas en el volumen de gas de interrupción. De este modo, la presión en el interior de los volúmenes de autosoplado y soplado se incrementa a causa del aumento de temperatura, así como debido a la compresión de gas entre el cilindro de soplado y el embolo fijo.

La presión del gas llega a ser lo suficientemente alta para forzar la válvula de autosoplado a la posición cerrada. La presión del gas en el volumen de soplado alcanza un nivel superior para forzar a abrir la válvula de sobrepresión. Cuando la forma de onda de corriente atraviesa el cero, el arco se debilita relativamente. En ese momento, el gas SF₆ presurizado emana del volumen de autosoplado a través de la boquilla, extinguiendo el arco.



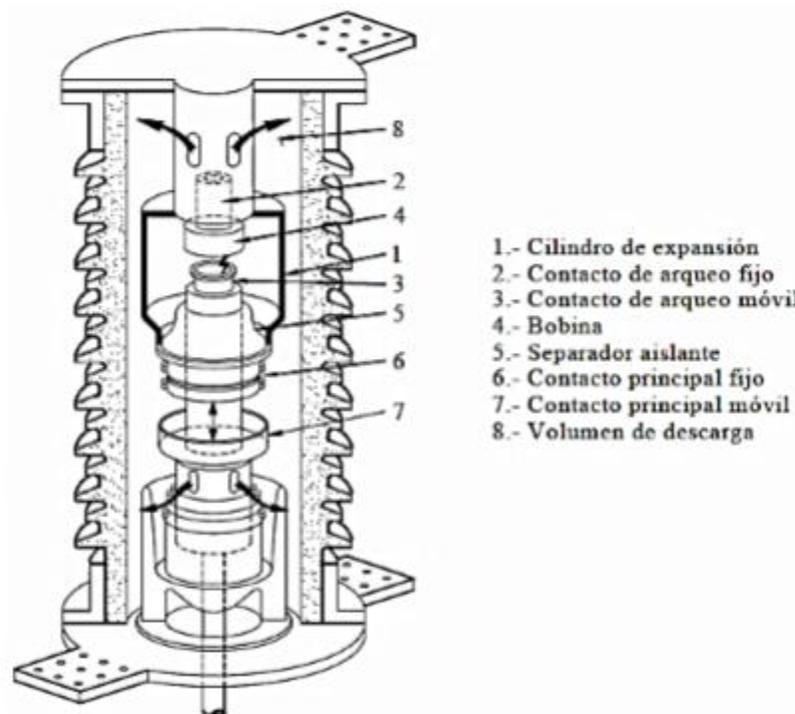


Fig. 2-32 Construcción interna del interruptor.

En algunos diseños, para mejorar el proceso interruptivo en el rango de baja corriente, se incluye un soplado adicional. En otros diseños se opta por incluir una bobina magnética que genera una fuerza que hace girar el arco alrededor de los contactos, proporcionando un enfriamiento adicional del arco conforme éste gira a través del gas SF6 y ayuda a disminuir la tasa de erosión de los contactos de arqueo y, por lo tanto, incrementa la vida útil del interruptor.

CAPITULO III EL INTERRUPTOR 145kV TIPO TANQUE MUERTO

3.1 INTERRUPTOR 145 kV TIPO TANQUE MUERTO

Se trata de un interruptor de circuito. A diferencia de los interruptores de potencia tipo tanque vivo este disponen de una cámara de interrupción encapsulada y el tanque siempre está puesto a tierra, por esta razón se denominan interruptores de potencia tipo tanque muerto.

El tanque muerto ofrece ventajas especiales cuando el concepto de protección requiere varios transformadores de corriente por polo. Los interruptores de potencia tipo tanque muerto pueden equiparse con transformadores de corriente para protección o medición.

El interruptor de tanque muerto es idóneo para zonas en las que se producen terremotos con frecuencia, o tienen gran altura, o una severa contaminación esto debido a un diseño optimizado y una gran resistencia durante el funcionamiento.

3.1.1 Características y ventajas clave

- Menos espacio. Los transformadores de corriente instalados en los aisladores permiten que el espacio requerido para la cimentación e instalación sea menor.
- Construcción y diseño compacto. La avanzada tecnología de extinción de arco reduce de forma significativa el tamaño de los productos e incrementa la confiabilidad.
- Rendimiento sísmico excelente y capacidad de resistencia a la contaminación. El interruptor de tanque muerto es idóneo para zonas en las que se producen terremotos con frecuencia, o tienen gran altura, o una severa contaminación.
- Diseño sin mantenimiento. Mecanismo de accionamiento por muelle modular y mecanismo de funcionamiento hidromecánico integrado que mejora la fiabilidad de los productos, reduce los costes y minimiza los requisitos de mantenimiento.

La mayoría de estos interruptores cubren el rango de temperaturas completo de -55 °C a +50 °C con SF6 puro, de forma que se puede utilizar en todas las zonas climáticas.

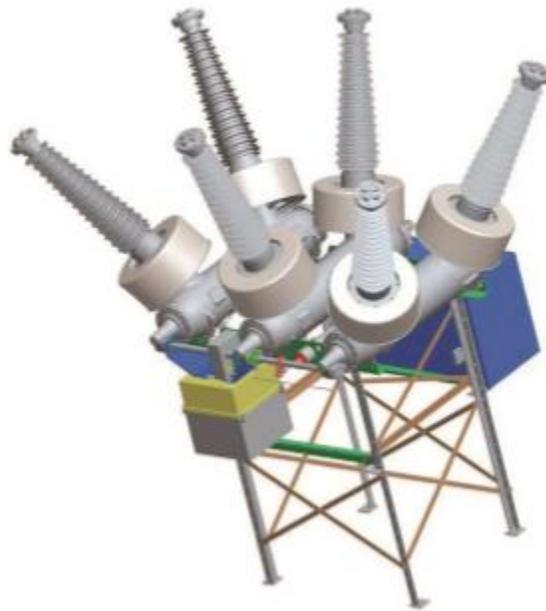


Fig. 3-1 Interruptor 145 kV.

Nomenclatura:

Tensión, kV	145
Soplado en SF6	P
Tanque múltiple	M
Capacidad de interrupción (kA)	40
Corriente continua (AMPS x 100)	31.5

3.2 COMPONENTES PRINCIPALES DEL INTERRUPTOR 145 KV

Los componentes principales del interruptor son:

- a) Tanques de polo horizontales.
- b) Transformadores de corriente.
- c) Bujes de entrada.
- d) Cámara de extinción.
- e) Varillaje Interpolar.
- f) Mecanismo con gabinete.
- g) Manivelas de transmisión.
- h) Gabinete de Control.

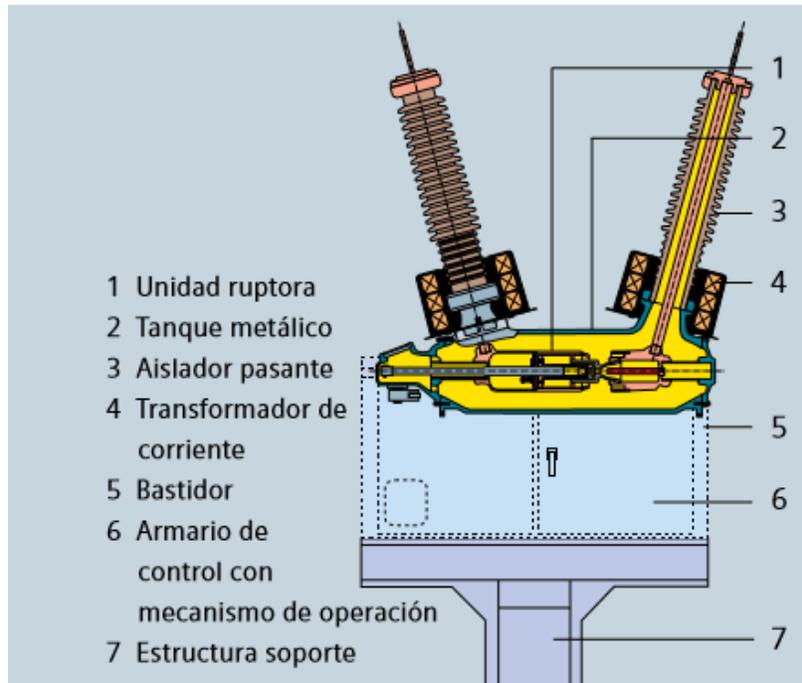
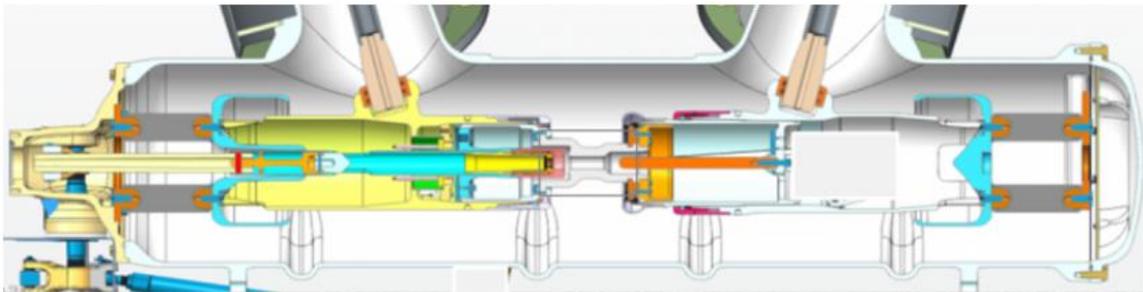


Fig. 3-2 Partes principales del interruptor.

3.2.1 Tanques de polo horizontales

Estos son tres de forma cilíndrica, conectados a tierra y equipados con un disco de ruptura. El disco de ruptura protege contra excesos de presión formados.



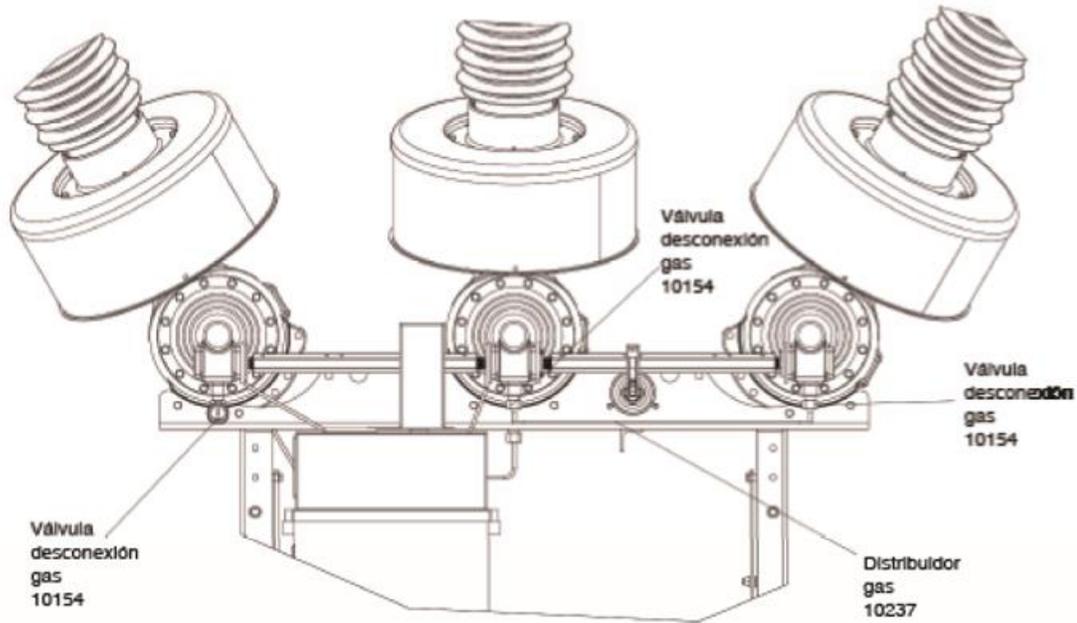


Fig. 3-3 Tanques de polo.

3.2.2 Transformadores de corriente

Estos son de tipo buje según especificaciones del cliente, instalados en la fábrica y cableados a borneras cortocircuitadoras en el gabinete de control.

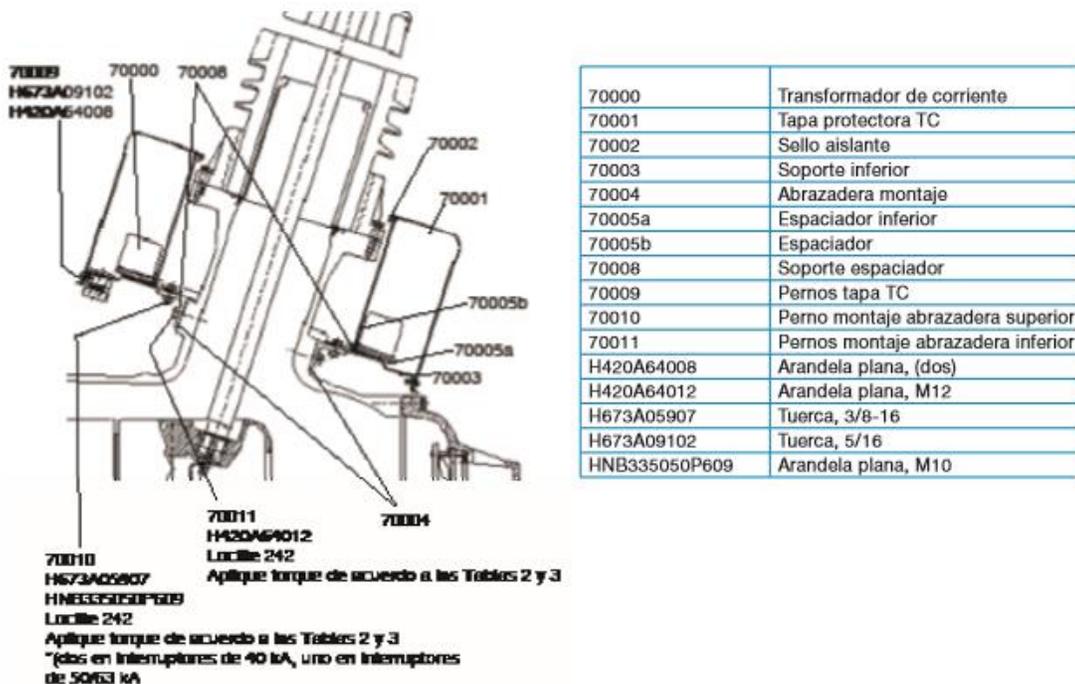


Fig. 3-4 Transformador de corriente.

3.2.3 Bujes de entrada

Los bujes son una parte integral del interruptor y están diseñados específicamente para la conexión a la línea o barra de alta tensión, llevar potencia en alta tensión a la cámara de extinción y proporcionar aislamiento de línea a tierra.

El interruptor cuenta con seis bujes, los bujes en el lado del mecanismo del interruptor son los bujes frontales; los bujes en el lado del disco de ruptura son los bujes posteriores. Los bujes posteriores son idénticos a los bujes frontales excepto que un perno removible está instalado en la punta de la barra conductora del buje para instalación de buje posterior.



Fig.3-5 Bujes de entrada.

Ambos bujes frontales y posteriores son huecos, con aisladores ya sea porcelana o de compuesto de alta resistencia con bridas superiores e inferiores de aluminio cementadas permanentemente en cada extremo. La brida inferior del buje se emperna en una cavidad en el tanque del polo. Una barra conductora de buje (barra pasante) con una tapa superior soldada se acopla a la brida superior del aislador de porcelana, se extiende a través del centro del hueco y se acopla a la cámara de extinción. La barra conductora del buje se enchufa dentro de los anillos de contacto cargados por resorte en cualquier extremo de la cámara de extinción.

Los bujes están llenos de gas hexafluoruro de azufre (SF₆) que actúa como medio aislante. El extremo inferior del buje está totalmente abierto al tanque del polo permitiendo que el gas SF₆ se

mueva libremente entre el tanque y el buje. Anillos-O en la tapa superior y en la brida de la cavidad sellan directamente contra las caras superior e inferior del extremo de tierra del aislador.

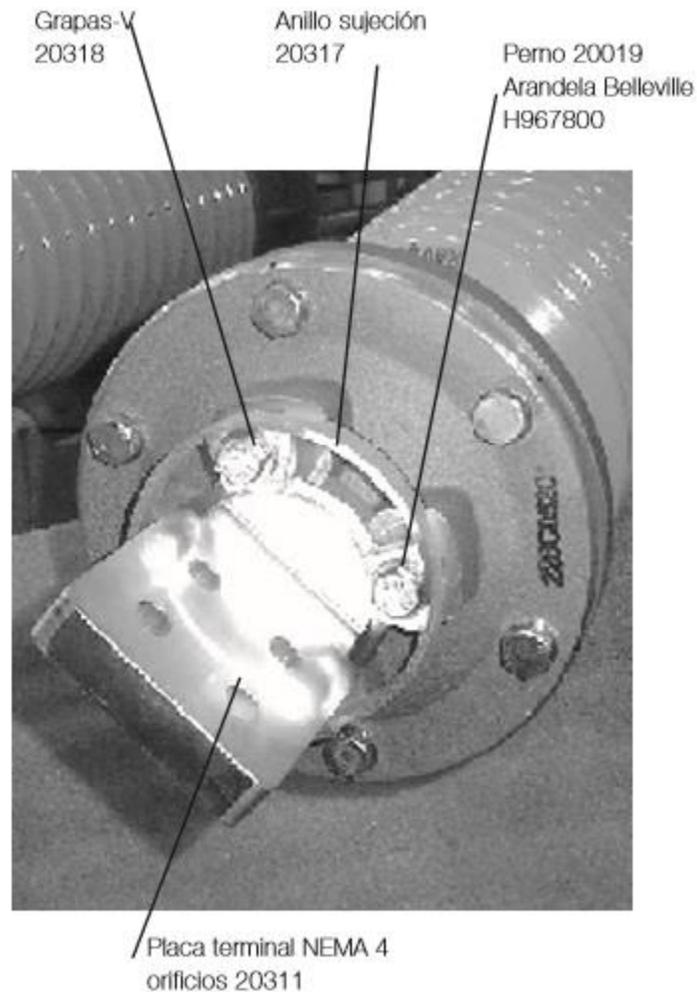


Fig. 3-6 Terminal de tapa superior del buje.

3.2.4 Cámara de extinción

La cámara de extinción es una unidad de presión simple, apertura simple, tipo soplado en gas hexafluoruro de azufre (SF₆), capaz de interrumpir fallas de 40 kA en los terminales y fallas en línea corta del 90% a 40 kA sin la adición de condensadores externos línea a tierra. Cada cámara de extinción consiste de un contacto móvil y contacto fijo, ambos contienen un contacto principal y un contacto de arco.

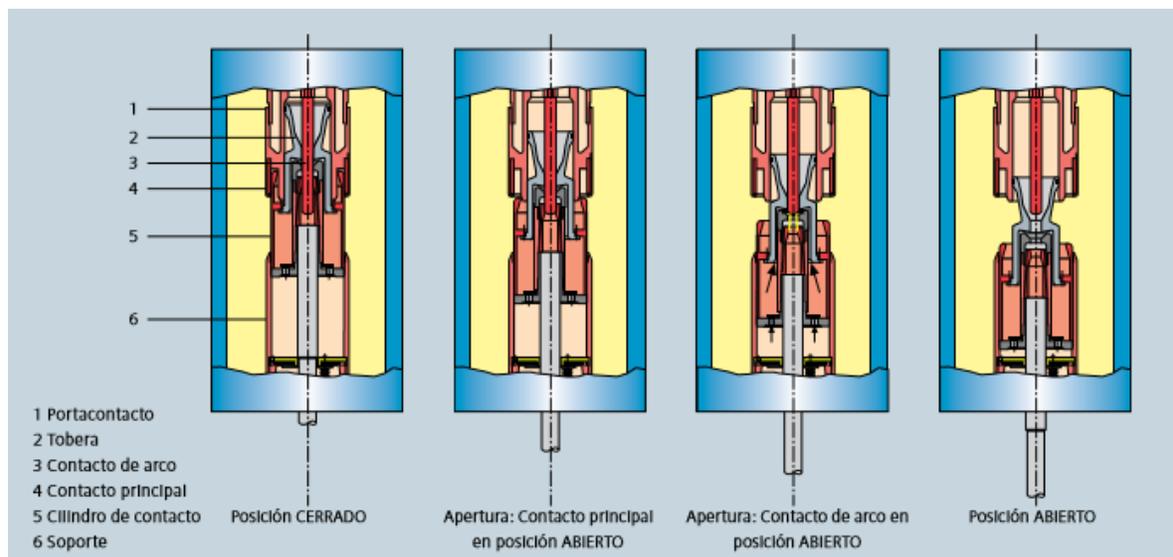
Bajo condiciones normales, los contactos principales están en paralelo con los contactos de arco y conducen corriente continuamente a través del interruptor. Durante interrupción los contactos principales parten primero, luego parten los contactos de arco. Se propaga un arco entre los

contactos de arco y la corriente finalmente es interrumpida. Debido a que el arco es interrumpido en los contactos de arco, se preserva la integridad de los contactos principales conductores de corriente.

Los componentes de interrupción están suspendidos en un tubo de soporte aislante dentro del tanque cilíndrico conectado a tierra de cada polo. En posición OPEN (abierto), los contactos móviles y los fijos están aislados entre sí por un tubo aislante de la cámara de extinción. Los contactos móviles son accionados por el mecanismo de manivelas de transmisión, que convierte el movimiento vertical del mecanismo de operación a movimiento horizontal de los contactos de la cámara de extinción. Una varilla de tracción aislada conecta el mecanismo de manivelas de transmisión a los contactos móviles.

La cámara de extinción usa una combinación de tecnología de soplado y auto-explosión. Los tanques de polo están llenos con gas SF₆ a una presión de 87 psig (600 kPaG) a 68°F (20°C) que sirve como medio aislante y extintor de arco. La interrupción de arco necesita presión más alta de gas SF₆ que se genera durante el recorrido de apertura del interruptor.

En posición CLOSED (cerrado), los contactos están totalmente enganchados y el máximo volumen comprimible de gas SF₆ está dentro del cilindro móvil de soplado. Este gas entra al cilindro móvil de soplado a través de una válvula de retención unidireccional durante el recorrido previo de cierre.



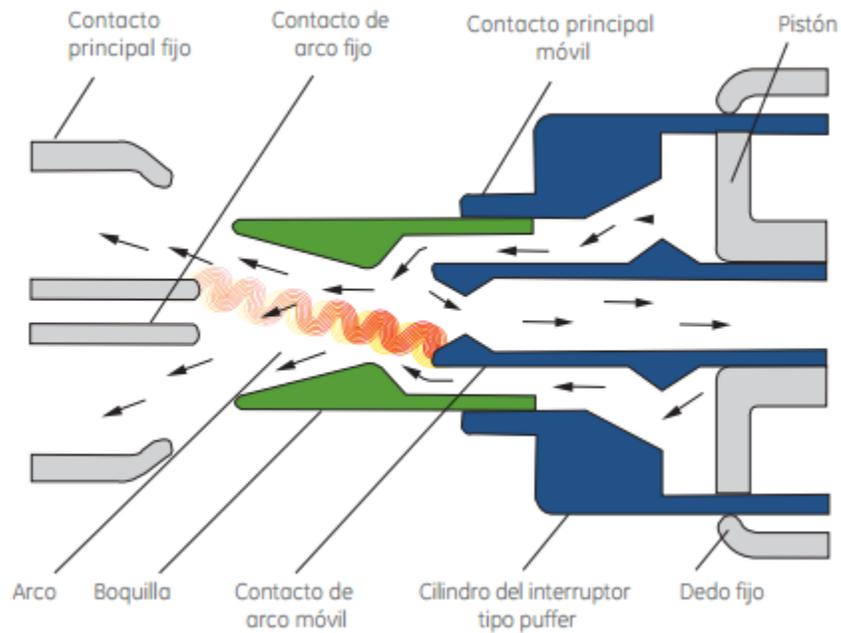


Fig. 3-7 Cámara de extinción.

3.2.5 Varillaje Interpolar

Comprende los ejes interpolares izquierdo y derecho que están acoplados al mecanismo de operación.

3.2.6 Mecanismo con gabinete

Proporciona la fuerza mecánica requerida para abrir y cerrar los contactos de la cámara de extinción durante la operación del interruptor.

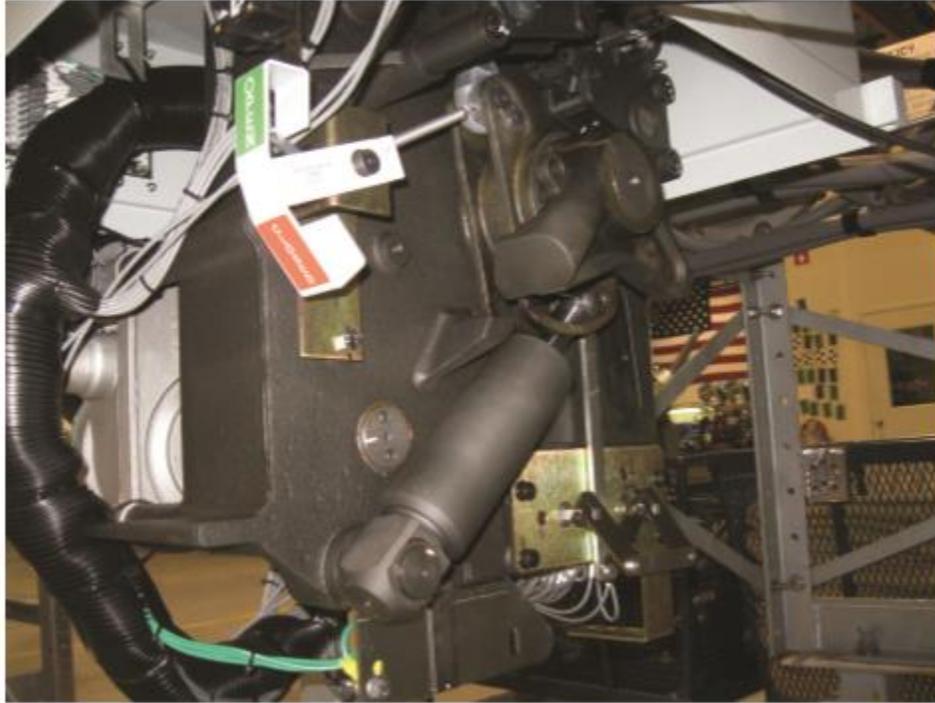


Fig. 3.8 Mecanismo sin cobertura.

3.2.7 Manivelas de transmisión

Una por polo que acoplan la respectiva cámara de extinción al varillaje de operación. El mecanismo de manivelas de transmisión convierte movimiento rotacional del varillaje de resorte de disparo y mecanismo a movimiento accionador horizontal necesario para abrir y cerrar los contactos de la cámara de extinción durante la operación del interruptor.

3.2.8 Gabinete de Control

Se encuentra montado en la estructura de acero del interruptor. Los componentes contenidos en el gabinete de control son:

- Borneras cortocircuitadoras de TC.
- Calentadores anti-condensación.
- Relés de control.
- Panel de control del interruptor de circuito y/o paquetes opcionales especiales de control, tales como Unidad de Control Síncrona (SCU), Unidad de Monitoreo de Condición (CMU), o Unidad de Control de Interruptor (BCU).



Fig. 3-9 Gabinete típico control.

El cableado de campo ingresa al gabinete de control a través de un panel en la base del gabinete y termina en las borneras apropiadas. La circuitería de control del interruptor es cableada y probada en fábrica. Se puede instalar un segundo gabinete de control como opción en la parte posterior de la estructura.

3.3 DIMENSIONES Y BASE

A continuación se presenta una imagen con las medidas aproximadas de diseño las cuales pueden variar dependiendo el fabricante.

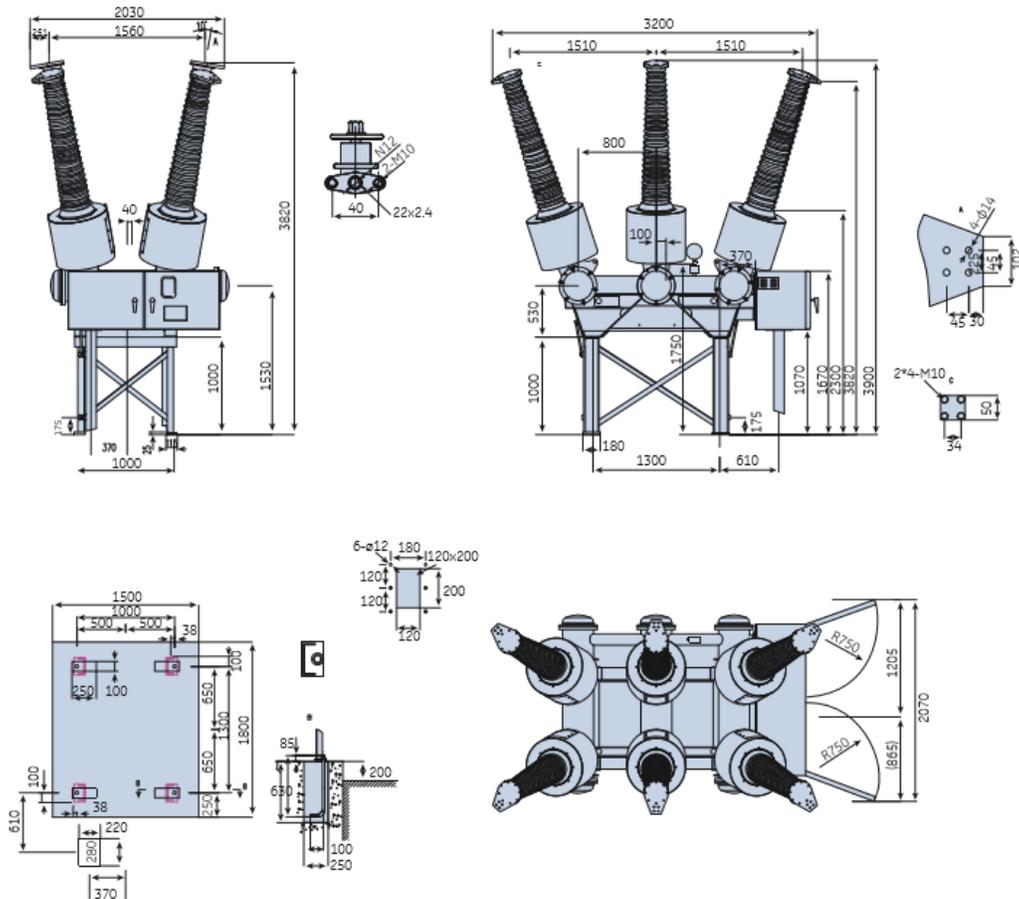


Fig. 3-10 Medidas aproximadas del interruptor.

Nota: Medidas proporcionadas en milímetros

3.4 OPERACIÓN DEL INTERRUPTOR

Bajo condiciones normales de operación, el gas SF₆ presurizado rodea las cámaras de extinción y llena los bujes huecos de entrada dentro de cada polo y en el distribuidor de gas. El gas es un medio aislante y extintor de arco.

La corriente desde las barras conductoras de los bujes circula hacia los ensambles de contactos fijos y móviles en las cámaras de extinción. Ambos ensambles contienen un contacto principal y un contacto de arco. Durante la interrupción el mecanismo libera el resorte de disparo; luego este movimiento se transfiere a movimiento rotacional en el varillaje interpolar. El mecanismo de manivelas de transmisión, acoplado a la cámara de extinción por una varilla de tracción aislada, convierte el movimiento rotacional del varillaje interpolar a la fuerza horizontal requerida para abrir (y cerrar) los contactos de la cámara de extinción.

Consecuentemente, los contactos de arco dentro de los contactos fijos y móviles de la cámara de extinción se separan. Se propaga un arco entre los contactos y finalmente es extinguido por el efecto refrigerante del soplado de gas SF₆ circulando a través de la cámara de extinción.

3.4.1 Interrupción a corrientes altas

Según el interruptor empieza a abrir, los contactos principales parten primero, transfiriendo la corriente a los contactos de arco. Inmediatamente después parten los contactos de arco y se inicia la propagación de un arco entre los contactos de arco que están encerrados dentro de toberas de Teflón. Mientras la corriente está a niveles más altos, o corriente pico, el arco calienta y presuriza al gas SF₆ en el área que rodea a los contactos de arco. Esta presión formada impulsa al gas SF₆ calentado alrededor de los contactos de arco dentro de la cámara de volumen constante de auto-explósión, mientras el diseño único de tobera dirige el flujo.

En virtud del avanzado diseño de la cámara de extinción, el gas caliente, presurizado, es capaz de ser enfriado suficientemente mezclándose con turbulencia mezclándose con el gas frío en la cámara de auto-explósión. Esta acción resulta en una mezcla a alta presión a baja temperatura que es necesaria para conseguir la interrupción.

Según la corriente se acerca a cero, se reduce la intensidad del arco. Como resultado, el flujo de gas se invierte llevando al gas SF₆ presurizado a través de los contactos de arco. Debido a las excelentes propiedades térmicas del gas SF₆, se enfría el arco y finalmente se extingue a corriente cero.

Después que se ha extinguido el arco, los contactos móviles continúan recorriendo a la posición totalmente OPEN (abierta). Durante este tiempo, el área alrededor del entrehierro de contacto es limpiada de gases calientes y productos de descomposición para restablecer la resistencia dieléctrica en la zona de contacto.

Durante la interrupción de corriente alta, la presión formada es suficientemente alta en la cámara de autoexplósión para provocar que la válvula de retención unidireccional entre la cámara de auto-explósión y el cilindro de soplado selle la ruta entre las dos. Una válvula de alivio incorporada dentro del soporte del contacto móvil proporciona un medio para aliviar la presión formada en el cilindro de soplado a un valor predeterminado (menor que la presión en la cámara de auto-extinción durante interrupción de corriente alta).

Para resumir el proceso de interrupción de corriente alta, la energía requerida para presurizar el gas SF₆ usado para extinguir el arco es generada por el arco en sí, de ahí la designación de "auto-explósión". A diferencia de cámaras de extinción de soplado puro, esta cámara de extinción no requiere de un poderoso mecanismo debido a que el diferencial de presión necesario para interrupción de corriente alta, es generado por el arco y no por el mecanismo. La máxima presión formada en el cilindro de soplado es limitada a la presión de alivio de la válvula de alivio.

3.4.2 Interrupción a corrientes bajas

Para la interrupción de corrientes bajas que no pueden generar suficiente presión de gas en la cámara de auto-explósión, un cilindro de soplado ligero proporciona el diferencial de presión necesario para extinguir el arco. La válvula unidireccional entre la cámara de auto-explósión y el cilindro de soplado no sella debido a que la presión formada en la cámara de auto-explósión no

excede el valor de alivio de la válvula de alivio. El gas presurizado fluye del cilindro de soplado a través de la cámara de auto-exposición y dentro de la zona de arco para extinguir el arco.

Este proceso de interrupción suave extingue efectivamente arcos de corrientes bajas para maniobra de carga, maniobra capacitiva y maniobra inductiva. El cilindro de soplado proporciona una explosión suave que minimiza el escarpado de corriente durante la maniobra inductiva.

Después que se ha extinguido el arco, los contactos móviles continúan recorriendo a la posición totalmente OPEN (abierto). Durante este tiempo, el área alrededor del entrehierro de contacto es limpiada de gases calientes y productos de descomposición para restablecer la resistencia dieléctrica en la zona de contacto.

3.4.3 Operación de cierre de la cámara de extinción

Durante una operación de cierre, los contactos de arco cierran antes de los contactos principales de la ruta continua de corriente. Debido al movimiento del cilindro de soplado, la cámara de soplado se llena con gas SF₆ a través de la válvula de retención ubicada en el soporte del contacto móvil.

3.5 CARACTERÍSTICAS FÍSICAS Y QUÍMICAS DEL GAS SF₆

El gas hexafluoruro de azufre es un compuesto químico cuya fórmula es SF₆. Se considera que el SF₆ es un gas superior a cualquier otro medio aislante gaseoso e ideal para usarse en equipo de interrupción. Se trata de un compuesto muy estable, inerte hasta los 500 °C, no inflamable, no tóxico, incoloro y carente de olor.

El gas SF₆ es uno de los gases más pesados con una densidad de 6.139 kg•m⁻³ a una temperatura de 20 °C y 760 mm de Hg de presión, es al menos cinco veces más pesado que el aire con un peso molecular de 146.06, esto es importante ya que la elevación de temperatura en el interior de los equipos es menor cuando se usa SF₆ que cuando se usa aire. Al igual que el dióxido de carbono (CO₂), el SF₆ existe en estado líquido solamente bajo presión.

Su conductividad térmica es inferior a la del aire, como se observa en la Tabla 3-1, pero su coeficiente global de transferencia de calor, tomando en cuenta la convección, es excelente, parecida a la de gases como el hidrógeno y el helio, y es más grande que la del aire.

Gas	Nitrógeno N ₂	Hidrógeno H ₂	Hexafluoruro de azufre SF ₆	Aire
Peso molecular	28.016	2.016	146.07	28.96
Punto triple	Temperatura (°C)	-210.065	- 50.8	--
	Presión del vapor (bar)	95.6	54.75	170
Punto crítico	Temperatura (°C)	- 146.95	- 235.95	45.55
	Presión (bar)	34.1	13.2	37.8
	Densidad (kg•m ⁻³)	310	31	730
Densidad (kg•m ⁻³) a 0°C y 1 bar	1.250	0.089	6.139	1.293
Cp (kcal kg ⁻¹ °K ⁻¹) a presión constante	0.248	3.393	0.216	0.239
Cv (kcal kg ⁻¹ °K ⁻¹) a volumen constante	0.178	2.404	0.165	0.172
Conductividad térmica 10 ³ (Wcm ⁻¹ °K ⁻¹)	0.24	1.68	0.14	0.24
Viscosidad 10 ⁷ (poises)	1580	835	1450	1708

Tabla 3-1 Propiedades termodinámicas de algunos gases comparados con el SF6.

La curva de conductividad térmica del SF6 a alta temperatura, revela las propiedades excepcionales de este gas para extinguir el arco eléctrico mediante enfriamiento térmico, como se ve en la Fig. 3-11. El pico de conductividad térmica corresponde a la temperatura de disociación de la molécula de SF6 (2,100 °K a 2,500 °K) que se acompaña, durante la reformación de la molécula en la periferia del arco, debido a una fuerte absorción de calor, favoreciendo la transferencia rápida de calor de un medio caliente a uno frío.

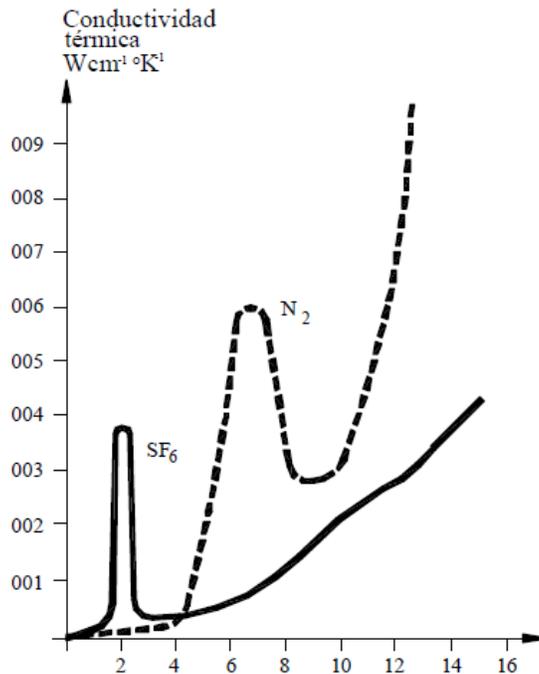


Fig. 3-11 Conductividad térmica del SF6 y del nitrógeno.

Físicamente el gas tiene características electro-negativas lo cual tiene la facilidad en capturar electrones libres, transformando los átomos en iones negativos lo cual provoca en el gas las altas propiedades de ruptura de arco. Ésta solución es aplicada en sistemas de alta y media tensión sin embargo la cantidad de operaciones es limitada. La mayoría de las soluciones en el mercado utilizan un desconectador en aire envuelto por gas SF₆ el cual al abrir un circuito elimina el arco gracias a la rigidez dieléctrica de éste gas. Éste proceso degrada la calidad del gas lo cual va reduciendo la vida útil del sistema.

El proceso industrial de producción del SF₆ se realiza por medio de electrolisis a partir del azufre y del flúor, mediante la siguiente reacción exotérmica:



Durante su producción se forman diferentes fluoruros de azufre tales como SF₄, SF₂, S₂F₂, y S₂F₁₀, así como impurezas debido a la presencia de humedad, aire y carbón en las celdas de electrolisis de fluoruro.

En la presencia de descargas eléctricas (corona, descargas parciales y arcos), el SF₆ se descompone en una variedad de fluoruros de azufre, los cuales reaccionan con los materiales aislantes, materiales de los contactos y las impurezas para formar productos químicamente activos.

Aunque el gas SF₆ es químicamente inerte y ambientalmente aceptable, sus productos de descomposición son tóxicos y corrosivos.

3.5.1 Propiedades de enfriamiento del SF₆

La extinción de un arco de C.A. en el instante del cero de la corriente es influenciado principalmente por la velocidad con la que la resistencia dieléctrica en el entrehierro de los contactos se regenera, inmediatamente antes y después del paso del cero de la corriente. Su eficacia como medio de enfriamiento para un arco puede explicarse por la baja constante dinámica de tiempo de los arcos que se forman en él; en el caso de los arcos cilíndricos, la constante de tiempo (H) es función del cuadrado del radio del arco (r), por lo tanto, debe mantenerse al mínimo el radio de un arco que se aproxima a cero. El SF₆ tiene una característica térmica favorable que es función de la temperatura, es decir, la conductividad térmica es baja entre 2750° C y 6700° C mientras que es alta debajo de 2750° C. La constante de tiempo baja del SF₆ se debe a su capacidad para que las moléculas de este gas capturan a los electrones libres; estos iones rodean el arco y forman una barrera aislante, este reduce el diámetro de la columna del arco y da origen a una reducción de la constante de tiempo, condición que ayuda al enfriamiento del arco.

3.5.2 Comportamiento del gas SF6 en el arco

La alta temperatura del arco hace que el SF6 se descomponga en átomos, electrones y iones, estos componentes atómicos no se recombinan completamente al enfriarse para formar el gas SF6, sino que forman productos gaseosos moleculares bajos, fluoruros de azufre y compuestos con los metales de los contactos, como por ejemplo fluoruros de cobre. Cuando el gas se bombea de regreso al tanque de alta presión, los productos procedentes de las reacciones secundarias de los gases, se separan del circuito mediante filtros que contienen óxido de aluminio activado, los fluoruros se depositan como una delgada película de polvo fino no conductora e inofensiva.

CAPITULO IV PRUEBAS DE RUTINA Y PROTOTIPO EN LOS INTERRUPTORES DE POTENCIA

4.1 INTRODUCCIÓN

Las pruebas eléctricas son la base principal para verificar y apoyar los criterios de aceptación o para analizar los efectos, cuando sucedan cambios o variaciones con respecto a los valores iniciales de puesta en servicio o de la última prueba.

Se consideran pruebas eléctricas, aquellas que determinan las condiciones en que se encuentra el equipo eléctrico, para determinar sus parámetros eléctricos de operación.

Los interruptores son algunos de los componentes más importantes de los sistemas modernos de energía eléctrica. El interruptor tiene que operar dentro de tolerancias extremadamente ajustadas cuando se detecta una perturbación en la red para proteger a componentes sensibles y costosos como los transformadores. Tienen que operar después de meses, o en algunos casos, de años de inactividad. Para garantizar el funcionamiento correcto y optimizar la confiabilidad de la red, se necesitan instrumentos y métodos de prueba confiables y eficaces. Los nuevos desarrollos han hecho posible mejorar y revalorizar los métodos convencionales que a veces llevan mucho tiempo e involucran complicados pasos en el proceso.

La prueba de interruptores de las subestaciones es una tarea importante para cualquier empresa de servicios de energía. Los interruptores están allí para facilitar el flujo de corriente durante la operación normal y para interrumpir el flujo de corriente ante la eventualidad de una falla. Sin embargo, es posible que todos los dispositivos operados con electricidad, tarde o temprano, experimenten algún tipo de falla. Esa falla puede ser ocasionada por muchos factores, incluso el envejecimiento y las fallas externas. El operador de la empresa de servicios tiene que estar preparado y contar con un plan de implementación para manejar cada situación.

En la siguiente tabla se listan las principales pruebas que se aplican a interruptores establecidas en la norma IEC 62271-100-2001.

	PRUEBAS DE RUTINA Y PROTOTIPO OBLIGATORIAS	RUTINA	PROTO-TIPO	INCISO
1	Pruebas dieléctricas	X	X	11.3
2	Pruebas de voltaje de radio interferencia (R.I.V.)		X	11.4
3	Medición de la resistencia de circuitos	X	X	11.5
4	Prueba de elevación de temperatura		X	11.6
5	Pruebas de corriente pico y de corriente instantánea		X	11.7
6	Pruebas de hermeticidad	X	X	11.8
7	Pruebas de compatibilidad electromagnética (EMC)		X	11.9
8	Prueba de operación mecánica	X	X	11.10
9	Pruebas de corto circuito		X	11.11
10	Pruebas de falla a tierra		X	11.12
11	Pruebas de falla de línea corta		X	11.13
12	Pruebas de interrupción de corrientes inductivas (reactores y motores)		X	11.14
13	Pruebas de apertura y cierre de defasamiento (fuera de fase)		X	11.15
14	Pruebas de interrupción de corrientes capacitivas		X	11.16
15	Verificación visual y del diseño	X		11.17
	PRUEBAS PROTOTIPO OBLIGATORIAS CUANDO APLIQUEN			
16	Verificación del grado de protección		X	11.18
17	Pruebas de temperaturas extremas		X	11.19
18	Prueba de humedad		X	11.20
19	Pruebas de carga estática en terminales		X	11.21

Tabla 4.1 Pruebas de rutina y prototipo para interruptores de potencia recomendadas por la norma IEC-62271-100-2001.

4.2 PRUEBAS DE FÁBRICA

Las pruebas de fábrica se clasifican en 3:

- a) Prototipo
- b) Rutina
- c) Opcionales

4.2.1 Pruebas de prototipo

Las Pruebas de Prototipo son las que se realizan a diseños nuevos y tienen por finalidad, cumplir con los valores establecidos en las normas que se aplican y/o especificaciones bajo las cuales fueron fabricados los equipos. En estas pruebas entran en función tanto los materiales utilizados para su fabricación como los criterios de diseño considerados. Cuando se incorporan elementos de diseños anteriores a un nuevo diseño, las pruebas prototipo que verifican estos elementos generalmente no se realizan, ya que se consideran los resultados obtenidos previamente. Las Pruebas de Prototipo incluyen las pruebas de rutina.

4.2.2 Pruebas de rutina

Son pruebas que deben efectuarse a cada uno de los equipos, conforme a métodos establecidos en las normas correspondientes, para verificar la calidad del producto y que están dentro de los valores permitidos. En estas pruebas se determina cual equipo se aprueba o rechaza.

4.2.3 Pruebas opcionales

Estas pruebas son las que se realizan a los equipos, conjuntamente entre el fabricante y usuario a fin de determinar algunas características particulares del equipo.

4.3 PRUEBAS DIELECTRICAS

Dentro de esta categoría existen tres pruebas para verificar la calidad del aislamiento de los interruptores y están relacionadas con los fenómenos que ocurren en la red. Éstas son:

- Tensión de aguante de corta duración o potencial aplicado.
- Impulso por rayo.

4.3.1 Prueba de potencial aplicado

Consiste en aplicar al equipo un voltaje a la frecuencia de operación del sistema, cuyo valor varía de acuerdo a lo indicado en la norma correspondiente para cada nivel de voltaje (de 180% al 300% del voltaje nominal), su duración es de un minuto.

El Procedimiento para prueba de potencial aplicado en condiciones húmedas es el siguiente, el aislamiento externo de un interruptor debe estar sujeto a pruebas de potencial aplicado en condiciones húmedas. El propósito es simular el efecto de la lluvia natural en el aislamiento externo del interruptor y consiste en rociar el objeto bajo prueba con agua a una temperatura y resistividad definidas. El agua debe caer sobre el objeto bajo prueba en forma de gotas (evitando la formación de niebla) en dirección vertical y horizontal con intensidades aproximadamente iguales.

4.3.2 Prueba de impulso por rayo

Consiste en simular en el Laboratorio las condiciones de falla provocadas por descargas atmosféricas en los equipos.

Esta prueba se realiza aplicando al equipo impulsos de onda positiva o negativa, de acuerdo al nivel básico de impulso para cada tensión, en condiciones estándar y de acuerdo a las normas indicadas en las especificaciones.

La curva característica que se asemeja a las condiciones de una descarga atmosférica, es aquella que obtiene su máximo valor de tensión en un tiempo de 1.2 microsegundos y decrece al 50% del valor de tensión en un tiempo de 50 microsegundos, a esta curva se le llama onda completa, ver figura 4-1.

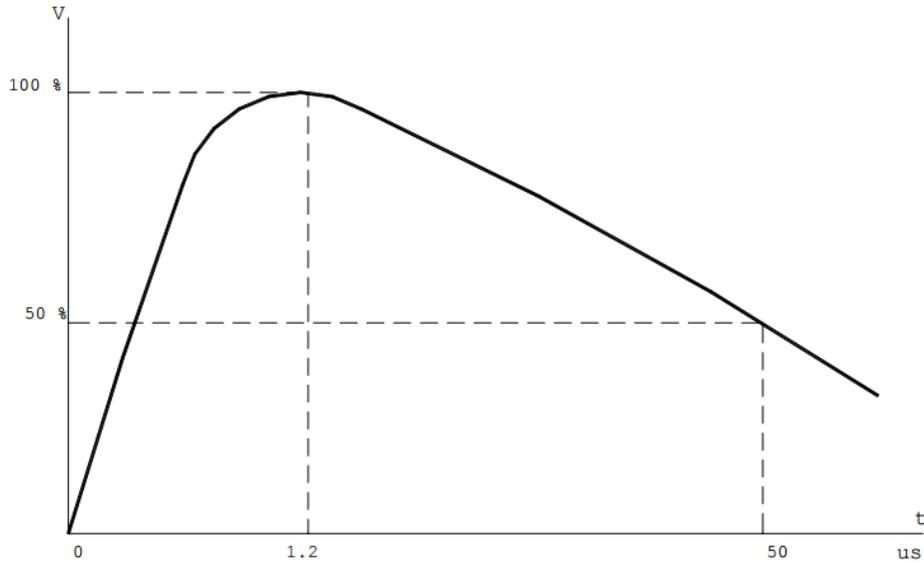


Fig. 4-1 Onda completa, 1.2 x 50 microsegundos.

4.3.3 Condiciones del interruptor durante las pruebas dieléctricas

Las pruebas dieléctricas deberán hacerse en interruptores completamente ensamblados, tal y como están en servicio y con las superficies exteriores de las partes aislantes limpias. Los interruptores deben montarse para las pruebas con las distancias y alturas mínimas especificadas por el fabricante.

Cuando la distancia entre los polos de un interruptor no esté inherentemente fija por diseño, esta para la prueba será el valor mínimo declarado por el fabricante. Sin embargo, para evitar ensamblar interruptores trifásicos grandes para propósitos exclusivos de prueba, las pruebas de contaminación artificial y de voltaje de radio interferencia pueden realizarse en un solo polo.

Para interruptores que usan gas comprimido como aislamiento, las pruebas dieléctricas deberán ser realizadas a la presión funcional mínima (densidad), como lo especifica el fabricante.

En las pruebas dieléctricas de interruptores que incorporen dispositivos de interrupción en vacío, se deberán tomar precauciones para asegurar que el nivel de emisión de rayos X esté dentro de los límites de seguridad.

4.3.4 Criterios para pasar la prueba

1. Pruebas de potencial aplicado.

Se considera que el interruptor pasa la prueba si no presenta rompimiento dieléctrico. Si durante la prueba húmeda ocurre un rompimiento dieléctrico en un aislamiento externo autorecuperable, se debe de repetir la prueba en las mismas condiciones y se considerará aprobada sólo si no ocurren más rompimientos dieléctricos.

2. Pruebas de impulso

Se deben aplicar 15 impulsos consecutivos por rayo o por maniobra a la tensión nominal de aguante para cada condición de prueba y polaridad. Se considera que el interruptor ha pasado la prueba si el número de rompimientos dieléctricos en los aislamientos autorecuperables no son más de dos para cada serie de 15 impulsos y si no ocurre rompimiento dieléctrico en aislamiento no autorecuperable.

Como alternativa a la prueba de aguante a los 15 impulsos, la prueba se realiza aplicando tres impulsos consecutivos para cada polaridad. El interruptor pasa la prueba si no ocurren rompimientos dieléctricos. Si ocurre un rompimiento dieléctrico en un aislamiento autorecuperable, deberán aplicarse 9 impulsos adicionales y si no ocurren más rompimientos dieléctricos, el interruptor pasa la prueba.

Si se prueba que los resultados son más desfavorables para una polaridad, es permisible realizar las pruebas sólo para esta polaridad.

Algunos materiales aislantes retienen carga después de la prueba de impulso, por lo que se deberá descargar el material aislante antes de invertir la polaridad. Para permitir la descarga de los materiales aislantes se recomienda el uso de métodos adecuados, como la aplicación de tres impulsos al 80% de la tensión de prueba con la polaridad inversa antes de la prueba.

4.3.5 Pruebas de contaminación artificial

Las pruebas de contaminación artificial no son obligatorias, cuando las distancias dieléctricas del interruptor cumplen con los requerimientos especificados en normas.

Si las distancias dieléctricas no cumplen estos requisitos, las pruebas de contaminación artificial deben realizarse, utilizando la tensión nominal y los factores de aplicación dados en la normas.

4.4 PRUEBA DE VOLTAJE DE RADIO INTERFERENCIA (R.I.V.)

Esta prueba aplica sólo para interruptores que tienen una tensión nominal de 123 kV o mayor.

La tensión de prueba debe aplicarse como sigue:

- 1) En posición cerrado, entre las terminales y con el tanque aterrizado.
- 2) En posición abierto, entre una terminal y las otras terminales conectadas al tanque y a tierra y luego con las conexiones invertidas si el interruptor no es simétrico.

La envolvente, tanque, estructura y otras partes, normalmente aterrizadas, deberán conectarse a tierra. Se debe tener cuidado con los objetos aterrizados o no aterrizados cerca del interruptor o del circuito de prueba para evitar influenciar las mediciones.

El interruptor debe estar seco, limpio y a la misma temperatura que el cuarto donde se realiza la prueba. El interruptor no debe ser sometido a otras pruebas dieléctricas durante 2 horas antes de la prueba.

Las conexiones de prueba y sus terminales no deben ser una fuente de voltaje de radio interferencia de valores más altos que los que se indican a continuación:

El circuito de medición se muestra en la Fig. 4-2 y debe sintonizarse a una frecuencia dentro del 10% de 0.5 MHz. Sin embargo, se pueden usar otras frecuencias en el rango de 0.5 a 2.0 MHz. Los resultados se expresan en microvolts.

El rango de impedancias de medición deben de estar entre 30 y 600 Ω y el ángulo de fase no deberá exceder de 20°. El voltaje de radio interferencia debe referirse a 300 Ω , considerando que el voltaje medido es directamente proporcional a la resistencia. Por lo tanto, se recomienda una resistencia de 300 Ω para interruptores con boquillas con bridas aterrizadas (por ejemplo en interruptores de tanque muerto).

El filtro F, mostrado en la Fig. 4-2, debe tener una alta impedancia en la frecuencia de medición. Este filtro reduce las corrientes de radio frecuencia circulantes en el circuito de prueba, generadas por el transformador de alta tensión o adquiridas de fuentes extrañas. La impedancia adecuada del filtro debe estar entre 10 a 20 k Ω en la frecuencia de medición.

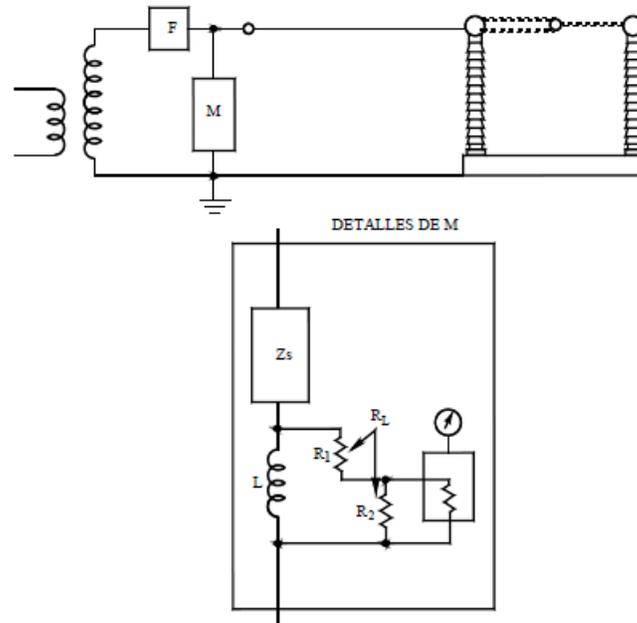


Fig. 4-2 Circuito de prueba para la prueba de voltaje de radio interferencia en interruptores.

Debe asegurarse que el nivel ambiental de radio interferencia sea entre 6 y 10 dB menor al nivel de radio interferencia especificado para el interruptor bajo prueba. Durante esta prueba se deben limpiar los aislamientos externos del interruptor y registrar las condiciones atmosféricas.

El procedimiento de prueba se presenta a continuación:

Se debe aplicar una tensión de $1.1U_r/\sqrt{3}$ y mantenerla al menos por 5 minutos, siendo U_r la tensión nominal del interruptor.

Posteriormente, la tensión se disminuye en pasos hasta $0.3U_r/\sqrt{3}$, posteriormente se incrementa nuevamente en pasos hasta alcanzar el valor inicial y, finalmente, se disminuye en pasos hasta $0.3U_r/\sqrt{3}$. En cada paso se debe realizar una medición del voltaje de radio interferencia y graficar contra la tensión aplicada. La curva obtenida, es la característica de radio interferencia del interruptor.

Se considerará que el interruptor pasó la prueba si el nivel de radio interferencia a $1.1U_r/\sqrt{3}$ no excede $2,500 \mu V$.

4.5 MEDICIÓN DE LA RESISTENCIA DE CIRCUITOS

1) Circuito principal

Se debe realizar una medición de la resistencia del circuito principal para usarse como referencia para el mismo tipo y diseño de interruptor. A esta prueba comúnmente se le conoce como medición de la resistencia de contactos.

La medición se realiza aplicando una tensión de C.D. y midiendo la caída de tensión o resistencia a través de las terminales de cada fase o polo.

La corriente a aplicar durante la prueba deberá tener un valor entre 50 A y la corriente nominal del interruptor. Se ha encontrado que un valor alto de resistencia de contactos no es evidencia contundente de un contacto defectuoso o de una mala conexión. En este caso, se recomienda repetir la prueba aplicando una corriente de prueba mayor, lo más cercana posible a la corriente nominal.

Se debe medir la caída de tensión de C.D. o la resistencia antes y después de la prueba de elevación de temperatura, con el interruptor a temperatura ambiente. Como criterio de aceptación de esta prueba, los valores obtenidos en ambas mediciones no deben diferir en más del 20%.

2) Circuitos de baja energía

Los circuitos auxiliares y de control se deben probar aplicando una corriente de 10 mA y energizados con una fuente de 6 V C.D. La resistencia del contacto cerrado no debe exceder de 50Ω .

4.6 PRUEBA DE ELEVACIÓN DE TEMPERATURA

Esta prueba consiste en medir la temperatura a la que el interruptor alcanza su estabilidad térmica al circular, a través de él, su corriente nominal. El interruptor se considera estable térmicamente cuando la temperatura no varía en más de $1^\circ C$ en un lapso de una hora.

Para realizar la prueba de elevación de temperatura, el interruptor debe estar equipado con todos sus accesorios, con contacto nuevo, lleno con aceite, con gas y colocado en la posición de servicio. La prueba debe realizarse en un lugar cerrado libre de corrientes de aire. Cuando no se realiza en un lugar cerrado la velocidad del aire debe ser menor a 0.5 m/s .

Esta prueba se debe aplicar simultáneamente en todos los polos del interruptor; sin embargo, puede aplicarse en forma independiente en cada polo, considerando despreciable la influencia de los otros polos.

La conexión para alimentar la corriente de prueba al circuito principal debe realizarse de manera que aporte calor al interruptor o al tablero del control. El incremento de temperatura en la conexión debe ser medida a una distancia de un metro. Este incremento no debe ser mayor a 5 °C.

La prueba se realiza aplicando la corriente nominal del interruptor bajo prueba, con una forma de onda senoidal y a la frecuencia nominal, con una tolerancia en esta de -5 a +2%.

La temperatura de partes para las que están establecidos límites debe ser medida con termómetros o con termopares, colocados en el punto más caliente que sea accesible. La temperatura superficial de componentes inmersos en líquido dieléctrico debe ser medida sólo por termopares colocados en la superficie de estos. La temperatura del líquido dieléctrico debe ser medida en su superficie.

El incremento de temperatura de varias partes del interruptor no debe exceder los valores presentados en la Tabla 4-2. en caso contrario, se considera que el interruptor ha fallado en la prueba de elevación de temperatura.

COMPONENTE		TEMPERATURAS MAXIMAS	
CONTACTOS		Temperatura total (°C)	Elevación de temperatura a temperatura ambiente menor a 40°C (°C)
Cobre sin recubrimiento	En aire	75	35
	En SF ₆	105	65
	En aceite	80	40
De plata, niquelados o plateados	En aire (notas 1 y 2)	105	65
	En SF ₆	105	65
	En aceite (nota 2)	90	50
Estañado	En aire	90	50
	En SF ₆	90	50
	En aceite	90	50
CONEXIONES			
Cobre	En aire	90	50
	En SF ₆	115	75
	En aceite	100	60
De plata, niquelados o plateados	En aire (nota 3)	115	75
	En SF ₆	115	75
	En aceite	100	60
Estañado	En aire	105	65
	En SF ₆	105	65
	En aceite	100	60
TERMINALES EXTERNAS A CONDUCTORES			
Sin recubrimiento		90	50
Plata, níquel o estañadas		105	65
PARTES METÁLICAS QUE ACTUAN COMO RESORTE		Ver nota 4	Ver nota 4
MATERIALES AISLANTES (nota 5)			
Clase Y (materiales no impregnados)		90	50
Clase A (materiales impregnados o sumergidos en aceite)		105	65
Clase E		120	80
Clase B		130	90
Clase F		155	115
Clase H		180	140
Esmalte	Base aceite	100	60
	Sintético en aire	120	80
	Sintético en aceite	100	60
METAL O MATERIAL AISLANTE EN CONTACTO CON ACEITE, EXCEPTO CONTACTOS		100	60
ACEITE AISLANTE PARA INTERRUPTORES		90	50

Tabla 4-2 Límites de elevación de temperatura de las partes de un interruptor.

Notas de la tabla

- 1.-Cuando se aplica una elevación de temperatura de 65°C se debe asegurar que no se ha causado daño a los materiales aislantes adyacentes.
- 2.-La calidad de la cubierta de plata será de tal clase que después de las pruebas de cortocircuito y mecánicas, todavía tenga una capa de plata en los puntos de contacto y debe considerarse como "NO CUBIERTO DE PLATA".
- 3.-Los valores de temperatura y de elevación de temperatura son válidos para conductores con o sin recubrimiento.
- 4.-La temperatura no debe alcanzar un valor donde se afecte la elasticidad del material (reblandecimiento). Para cobre puro el límite de temperatura es de 75°C.
- 5.-Se utilizan las siguientes clases de materiales aislantes:
 - CLASE "Y" (90 °C) Algodón, seda y papel sin impregnación.
 - CLASE "A" (105 °C) Algodón, seda y papel impregnados, cubiertos o sumergidos en un líquido dieléctrico como el aceite.
 - CLASE "E" (120 °C) Barnices de terminación e impregnación, compuestos de poliuretano, compuestos epóxicos y resinas.
 - CLASE "B" (130 °C) Mica, fibra de vidrio, asbesto, etc., o combinación de ellos, construidos con varias sustancias orgánicas.
 - CLASE "F" (155 °C) Mica, fibra de vidrio construidos con varias sustancias de otros materiales no necesariamente inorgánicos.
 - CLASE "H" (180 °C) Nomex, Mylar laminado, mica, fibra de vidrio, barniz, resilam, DMD 180, Kapton, Pyromid, Pyroglas y Pyrolam.

4.7 PRUEBA DE CORRIENTE PICO Y DE CORRIENTE INSTANTÁNEA

Al circuito principal del interruptor se le aplica una prueba para verificar su capacidad de conducir la corriente pico nominal y la corriente instantánea. Esta prueba se efectúa a cualquier nivel de tensión, pero a la frecuencia nominal $\pm 10\%$.

Para realizar la prueba, el interruptor debe estar en condiciones similares a las de operación, en la posición de cerrado y con los contactos nuevos y limpios.

Cada prueba debe ser precedida por una operación sin carga y de una medición de la resistencia del circuito principal.

La prueba puede realizarse de forma monofásica o trifásica.

Para la prueba monofásica, el procedimiento es el siguiente:

- Para un interruptor trifásico, la prueba se realiza en dos polos adyacentes.
- Para interruptores con polos separados, la prueba se realiza en dos polos adyacentes, o en un solo polo con el conductor de retorno a la distancia de fase.
- Para tensiones nominales mayores a 72.5 kV, el conductor de retorno no debe tomarse en cuenta.

La conexión a terminales en el interruptor debe realizarse de manera que evite esfuerzos mecánicos sobre éstas.

La componente de C.A. de la corriente de prueba debe ser igual a la componente de C.A. de la corriente nominal instantánea de aguante (I_k) del interruptor. La corriente pico no debe ser menor a la corriente pico nominal de aguante (I_p), ni debe exceder este valor en más del 5%.

Para la prueba trifásica, la corriente en cualquier fase no debe variar en más del 10% con respecto al promedio de las tres corrientes. El promedio de los valores rms de la componente de C.A. de la corriente de prueba, no debe ser menor a la corriente nominal.

La corriente de prueba I_t , inicialmente debe aplicarse por un tiempo t_t igual a la duración nominal t_k de cortocircuito.

Como criterio de aceptación, un interruptor debe ser capaz de soportar su corriente pico y su corriente instantánea, sin sufrir daño mecánico en ninguna de sus partes. Después de la prueba, el interruptor no debe mostrar un deterioro significativo y debe ser capaz de operar correctamente, conducir su corriente nominal de forma continua sin exceder la elevación de temperatura especificada en la Tabla 4-2. Además, debe soportar la tensión especificada en las pruebas dieléctricas.

Si el interruptor cuenta con capacidades nominales de apertura y cierre, entonces la condición de los contactos no debe afectar el comportamiento del material en la apertura y cierre de estas corrientes nominales.

Para comprobar esta condición, se debe:

- Realizar una apertura sin carga del interruptor, inmediatamente después de la prueba y los contactos deben abrir al primer intento.

- Medir la resistencia de contactos. Si el valor se ha incrementado en más de un 20% y si no es posible confirmar la condición de los contactos mediante inspección visual, se debe repetir la prueba de elevación de temperatura.

4.8 PRUEBAS DE HERMETICIDAD

El propósito de esta prueba es demostrar que el porcentaje de fugas absolutas F no exceda el valor específico del porcentaje de fugas permisibles F_p .

La prueba de hermeticidad de un interruptor, que tiene instalado su mecanismo de operación, debe efectuarse en la posición de abierto y en la posición de cerrado, aunque el coeficiente de fugas sea independiente de la posición de los contactos.

En general, sólo la medición acumulativa de fugas permite el cálculo del porcentaje de fugas nominales. La prueba de hermeticidad normalmente se realiza antes y después de la prueba de operación mecánica o durante la prueba de operación a temperaturas extremas. Se acepta un incremento en el porcentaje de fugas a temperaturas extremas, siempre y cuando el incremento temporal de las fugas no exceda los valores mostrados en la Tabla 4-3.

Temperatura ° C	Porcentaje permisible de fugas temporales
+40 y +50	$3F_p$
Temperatura ambiente	F_p
-5/-10/-15/-25/-40	$3F_p$
-50	$6F_p$

Tabla 4-3 Porcentaje permitido de fugas temporales para sistemas de gas.

4.8.1 Sistemas sellados de presión

- Interruptores en gas. Se debe realizar la prueba de hermeticidad para determinar la vida operativa esperada para el sistema de sellado de presión.
- Interruptores en vacío. Se debe medir dos veces el nivel de vacío en un intervalo de tiempo tal que el porcentaje de vacío pueda determinarse correctamente.

4.9 PRUEBA DE COMPATIBILIDAD ELECTROMAGNÉTICA (EMC)

Si los sistemas auxiliares de los interruptores incluyen componentes electrónicos, éstos deben someterse a la prueba de inmunidad electromagnética. Si no incluyen componentes electrónicos, no se requiere esta prueba.

Las pruebas de inmunidad electromagnética que se pueden aplicar son:

- Transitorio eléctrico rápido o prueba de quemado. En esta prueba se simulan las condiciones causadas por la operación del interruptor en los circuitos secundarios.
- Prueba de inmunidad electromagnética a onda oscilatoria. En esta prueba se simulan las condiciones causadas por una operación del interruptor en el circuito principal.

Como criterio de aceptación, los sistemas auxiliares deben soportar cada una de las pruebas anteriores sin daño permanente. Además, después de la prueba deben operar correctamente; sin embargo, la norma acepta pérdida temporal del funcionamiento de los equipos secundarios, siempre y cuando ésta se recupere después de la prueba.

4.10 PRUEBA DE OPERACIÓN MECÁNICA

La prueba de operación mecánica consiste en realizar dos mil secuencias de operación a la temperatura ambiente. A excepción de los interruptores equipados con dispositivos de sobrecorriente, la prueba debe realizarse sin tensión ni corriente en el circuito principal. Para interruptores equipados con dispositivo de sobrecorriente, aproximadamente 10% de las secuencias de operación deben efectuarse con el mecanismo de apertura energizado por la corriente del circuito principal.

Para realizar la prueba, el interruptor debe estar montado en sus soportes y contar con sus equipos auxiliares. Siempre se debe tratar de probar el interruptor ensamblado completamente. Sin embargo, se puede probar cada polo, siempre y cuando se tenga en consideración que las condiciones no son las mismas. Para este caso, las condiciones que varían son:

- El viaje mecánico.
- La potencia y resistencia del mecanismo de apertura y cierre.
- La rigidez de la estructura.

Durante el desarrollo de la prueba de operación mecánica la norma permite lubricar el interruptor de acuerdo con las especificaciones del fabricante, pero no se permiten ajustes mecánicos.

Los interruptores de uso general (clase M1), deben probarse de acuerdo con la Tabla 4-4.

Cuando se trata de interruptores para uso en condiciones especiales de servicio (clase M2), la prueba se realiza en las mismas condiciones y con los mismos tiempos de operación; pero en este caso, el número de secuencias de operación se repite cinco veces. Es decir, se efectúan diez mil secuencias de operación en lugar de dos mil. En este caso, la norma permite que se realicen lubricación y ajustes mecánicos al interruptor de acuerdo con lo especificado por el fabricante, pero no permite el cambio de los contactos.

Como criterio de aceptación, se deben realizar antes y después las siguientes pruebas:

- Cinco operaciones de cierre-apertura en condiciones nominales de tensión y presión.
- Cinco operaciones de cierre-apertura en condiciones mínimas de tensión y presión.
- Cinco operaciones de cierre-apertura en condiciones máximas de tensión y presión.

Secuencia de operación	Tensión suministrada y presión de operación	Número de secuencias de operación	
		Interruptores para auto-recierre	Interruptores para no auto-recierre
C - t _s - O - t _s	Mínimo	500	500
	Nominal	500	500
	Máximo	500	500
O - t - CO - t _s - C - t _s	Nominal	250	---
CO - t _s	Nominal	---	500
O = Apertura. C = Cierre. CO = Cierre seguido inmediatamente de una apertura, sin retraso de tiempo. t _s = Tiempo entre dos operaciones, necesario para restablecer las condiciones iniciales y prevenir un calentamiento indebido del interruptor. t = 0.3 s para interruptores para auto-recierre.			

Tabla 4-4 Guía para la ejecución de la prueba de operación mecánica.

4.11 PRUEBAS DE CORTOCIRCUITO

Debido a que un interruptor representa la protección principal del sistema de energía eléctrica, es muy importante que éste tenga un alto grado de seguridad en su funcionamiento. Esto sólo puede lograrse mediante pruebas que simulen las condiciones que se presentan en operación. Las pruebas de cortocircuito son una de las metas más importantes y complicadas que debe de cumplir el diseño de interruptor. Estas pruebas pueden aplicarse a cámaras interruptivas individuales o al interruptor completo. Los interruptores deberán ser capaces de energizar e interrumpir todas las corrientes de cortocircuito, simétricas y asimétricas, incluyendo las corrientes nominales de interrupción de cortocircuito. Esto se demuestra cuando los interruptores energizan e interrumpen las corrientes simétricas y asimétricas trifásicas especificadas entre 10% y 100% de la corriente de interrupción de cortocircuito nominal a la tensión de fase-tierra.

En la actualidad, es posible realizar pruebas de cortocircuito a interruptores trifásicos hasta de 145 kV con capacidad interruptiva de 31.5 kV. Para niveles mayores de tensión y capacidad interruptiva las cámaras de los interruptores deben ser probadas individualmente. En México los interruptores pueden ser evaluados, desde el punto de vista de cortocircuito, en el Laboratorio de Pruebas de Equipos y Materiales (LAPEM) que está específicamente diseñado para este tipo de pruebas.

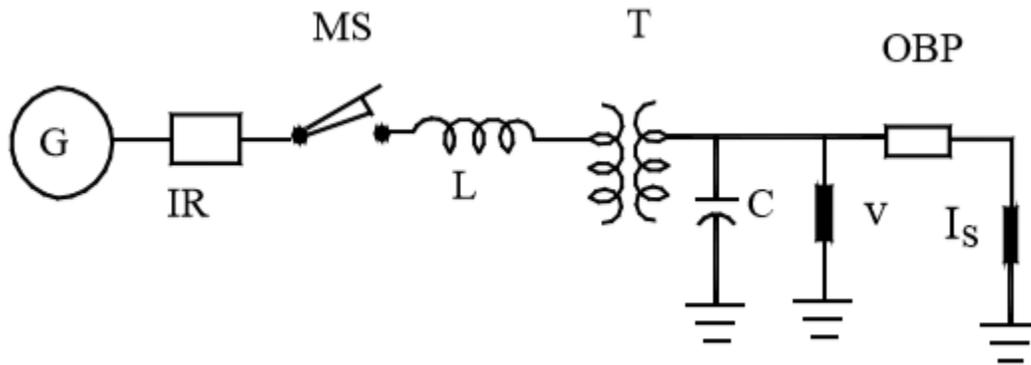


Fig. 4-3 Circuito básico usado para la prueba de cortocircuito.

donde:

G = Fuente de alimentación

IR = Interruptor de respaldo

OBP = Interruptor bajo prueba

MS = Dispositivo de desconexión de alta velocidad (*Making Switch*)

L = Reactores limitadores de corriente

T = Transformador

C = Banco de capacitores

V = Juego de divisores de tensión capacitivos

I_s = Shunt

El banco de capacitores se usa para dar la forma de la tensión transitoria de restablecimiento (TTR), los divisores de tensión se utilizan para medir la tensión y el shunt se emplea para medir la corriente que fluye a través del objeto bajo prueba.

4.12 PRUEBAS DE FALLA A TIERRA

Los interruptores deben ser capaces de liberar corrientes de cortocircuito monofásicos. Esto puede ocurrir en dos casos distintos:

- En sistemas de neutro sólidamente aterrizados, en el caso de falla monofásica.
- En sistemas de neutro no sólidamente aterrizados, en el caso de doble falla a tierra. Por ejemplo, falla a tierra en dos fases distintas, una en el lado fuente y la otra en el lado carga.

Dependiendo de la condición de aterrizamiento del neutro del sistema en el cual será usado el interruptor, se requieren pruebas adicionales de apertura monofásica. Estas pruebas son para demostrar que:

- El interruptor es capaz de liberar fallas monofásicas.
- La operación del interruptor no se ve afectada por el desbalance de fuerzas producidas por la falla monofásica.

4.13 PRUEBAS DE FALLA DE LÍNEA CORTA

Las pruebas de falla de línea corta se realizan para determinar la capacidad de un interruptor para interrumpir corrientes de cortocircuito bajo condiciones de falla de línea corta.

Esta prueba sólo se aplica a interruptores trifásicos diseñados para instalarse directamente en líneas aéreas que tienen una tensión nominal de 52 kV o mayor y que tienen una corriente nominal de cortocircuito mayor a 12.5 kA.

4.14 PRUEBAS DE INTERRUPCIÓN DE CORRIENTES INDUCTIVAS (REACTORES)

Cuando un interruptor está diseñado para operar corrientes inductivas, como la energización de reactores en derivación o de motores, se debe someter a pruebas complementarias de cortocircuito. Estas pruebas son:

- Probar la capacidad del interruptor para interrumpir corrientes de reactores dentro del tiempo requerido de arqueo.
- Demostrar que los reencendidos no tienen efecto perjudicial en el interruptor y que éstos ocurren sólo entre los contactos de arqueo.

4.15 PRUEBAS DE INTERRUPCIÓN DE CORRIENTES CAPACITIVAS

Las pruebas de interrupción de corrientes capacitivas son aplicables para todos los interruptores que operan bajo cualquiera de las siguientes condiciones:

- Interrupción de corrientes de línea con carga.
- Interrupción de corrientes de cables con carga.
- Interrupción de corriente de un banco de capacitores.
- Interrupción de corriente de bancos de capacitores conectados en oposición.
- Corriente *Inrush* al cierre de un banco simple de capacitores.
- Corriente *Inrush* al cierre de bancos de capacitores conectados en oposición.

Cuando un interruptor opera con corrientes capacitivas, la norma permite reencendidos. Se han definido dos clases de interruptores de acuerdo con la cantidad de reencendidos:

- Clase C1. Interruptores con baja probabilidad de reencendidos durante la apertura de corrientes capacitivas.
- Clase C2. Interruptores con muy baja probabilidad de reencendidos durante la apertura de corrientes capacitivas.

Las características del circuito capacitivo a ser interrumpido, deben ser tales que la caída de tensión, a través del interruptor, no exceda al 10% después de un intervalo de 300 ms, posteriormente a la extinción del arco. Básicamente un interruptor puede operar tres tipos de cargas capacitivas:

- 1) Corriente de carga de línea.
- 2) Corriente de carga de cables.
- 3) Corriente de banco de capacitores.

Las pruebas de interrupción de corrientes capacitivas consisten básicamente en aplicar la tensión de prueba entre las terminales del interruptor y realizar una secuencia de operación que está determinada por la clase del interruptor (C1 o C2).

Se considera que el interruptor ha pasado la prueba cuando cumple con las condiciones siguientes:

- No muestra señales de deterioro.
- No muestra interacción perjudicial entre polos o fases.
- No muestra interacción perjudicial con equipos adyacentes.
- No muestra un comportamiento que puede ser peligroso para el personal.
- No ocurren reencendidos durante el ciclo de pruebas. Si llega a ocurrir un reencendido, se tiene que repetir completamente el ciclo de pruebas en el mismo interruptor, sin aplicarle ningún tipo de mantenimiento.
- El interruptor, después de realizar la prueba de interrupción de corrientes capacitivas, debe ser capaz de operar satisfactoriamente para abrir y cerrar la corriente nominal de cortocircuito a su tensión nominal.

4.16 VERIFICACIÓN VISUAL Y DEL DISEÑO

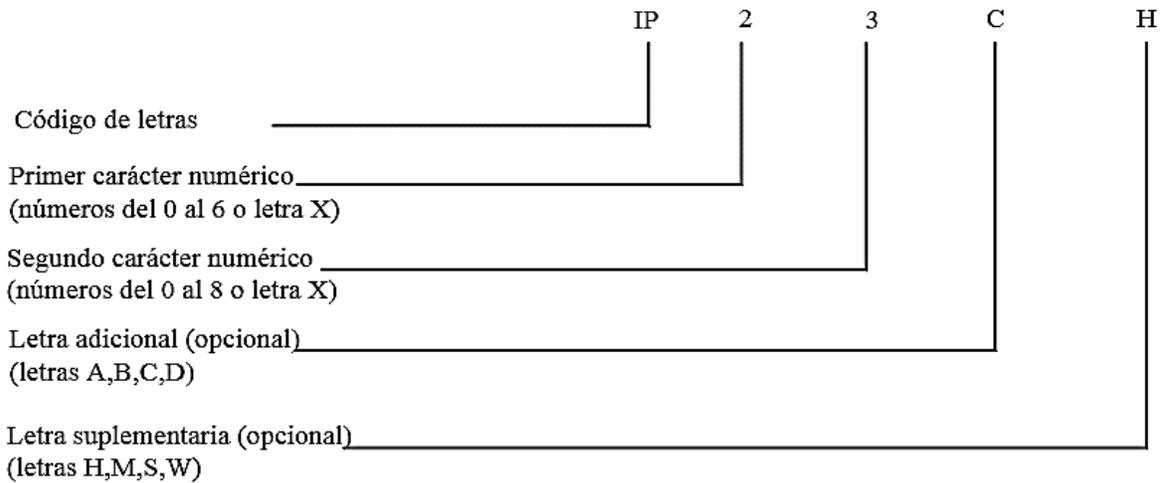
El interruptor debe ser inspeccionado de forma visual, para verificar que cumpla con las especificaciones de compra.

4.17 VERIFICACIÓN DEL GRADO DE PROTECCIÓN

El grado de protección de un interruptor se verifica con las pruebas siguientes:

- Verificación del código IP.
- Prueba de impacto.

Código IP. Es un sistema para indicar el grado de protección que proveen los gabinetes contra el acceso a partes peligrosas, el ingreso de objetos sólidos, ingreso de agua y para dar información adicional en relación con dicha protección.



Prueba de impacto. De común acuerdo entre el fabricante y el usuario, a los gabinetes para interruptores tipo interior se les pueden realizar pruebas de impacto. Estas pruebas consisten en aplicar tres golpes en los puntos más débiles del gabinete. Se excluyen de esta prueba los instrumentos de medición, válvulas, relevadores, etcétera.

El impacto se aplica con un martillo cabeza de acero semiesférica con radio de 25 mm, con una dureza Rockwell R100. Para aplicar el golpe se utiliza un equipo basado en resortes.

Después de la prueba, el gabinete no debe mostrar fracturas y las deformaciones sufridas no deben afectar el funcionamiento del equipo, ni reducir el nivel de aislamiento, las distancias o el grado específico de protección contra el acceso a partes peligrosas por arriba de los valores permitidos. Se pueden ignorar daños superficiales como pintura levantada, rompimiento de costillas de enfriamiento o partes similares y pequeñas deformaciones.

4.18 PRUEBAS DE TEMPERATURAS EXTREMAS

El objetivo de estas pruebas es caracterizar la operación del interruptor en condiciones de temperaturas extremas. Para realizar la prueba, se mide la temperatura del aire ambiente a una distancia de un metro de separación, a la mitad de la altura del interruptor. La realización de estas pruebas no debe hacerse de forma subsecuente y el orden en el que se realizan es arbitrario. Para interruptores tipo interior clase $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ y para interruptores tipo exterior clase $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$, no se requiere realizar la prueba de temperatura baja.

4.19 PRUEBA DE HUMEDAD

La prueba de humedad se debe aplicar a los interruptores o sus elementos, que estén expuestos a esfuerzos eléctricos y a condensación en su superficie aislante, debido a cambios bruscos de temperatura. Esto se presenta principalmente en los aislamientos de interruptores tipo interior. La prueba no se debe aplicar a interruptores tipo intemperie que están expuestos a precipitación de lluvia ni tampoco cuando el interruptor cuenta con medios para evitar la condensación (resistencias calefactoras).

4.20 PRUEBAS DE CAMPO

Las siguientes pruebas se deben ejecutar después de la instalación y durante el mantenimiento de 5 años:

- Resistencia de polo (resistencia de contacto).
- Medición de humedad.
- Chequeo de fugas.
- Pruebas operacionales y de temporización.

4.20.1 Medición de resistencia de polo

Usando un micro-ohmetro (o medidor de caída de milivoltios), se ejecuta una medición de resistencia de contacto (o caída de milivoltios) en cada polo del interruptor. Refiriéndose al módulo *datos del cliente* para el valor máximo de resistencia de terminal de buje a terminal de buje.

4.20.2 Medición de humedad en el gas

El obtener una lectura precisa de humedad requiere de varios días para permitir que la muestra de gas SF₆ tenga tiempo para estabilizarse. Si la lectura de humedad se toma horas después del llenado, la lectura es falsamente alta debido que el gas no se ha estabilizado y el paquete de desecante no ha tenido tiempo para sacar humedad.

El nivel máximo de humedad permitido en el gas SF₆ (tres días después del llenado) cuando se mida a 1 atmósfera de presión es:

500 partes por millón por volumen (ppmv) a 68°F (20°C) para hasta 3 días después del llenado.

200 partes por millón por volumen (ppmv) a 68°F (20°C) después que se ha permitido que se establezca el polo durante 3 días o más después del llenado con gas.

Puesto que la humedad migra lentamente dentro del polo con el tiempo, el paquete de desecante debe remover suficientemente la humedad del gas durante aproximadamente 10 años entre intervalos de mantenimiento mayor. Sin embargo, para evitar corrosión de partes internas del interruptor causadas por humedad, lo mejor es iniciar con el menor contenido posible de humedad. El contenido de humedad no debe exceder 200 ppmv 3 días después del llenado. Al pasar el tiempo,

el contenido de humedad puede llegar tan alto como 500 ppmV antes de requerir un proceso de secado (usando un filtro secador) para el gas SF6. El máximo contenido de humedad en un cilindro de gas SF6 es:

Punto de condensación del gas SF6 de -50°F (-45°C) o 63 ppmv por volumen.

4.20.3 Chequeo de fugas

Después que se ha abierto el interruptor o si se sospecha de una fuga de gas SF6, se verifican las conexiones roscadas, con anillo-O y con empaque con una unidad halógena manual detectora de fugas:

- Conexiones de tubo y accesorios al indicador de densidad.
- Monitor de densidad de gas SF6.
- Plomería de gas SF6.
- Disco de ruptura.
- Bridas de bujes.
- Tapa posterior del tanque.
- Caja del mecanismo de manivelas de transmisión.
- Sellos del eje interpolar con el interruptor abierto y cerrado.

4.21 Pruebas operaciones y de temporización

Antes de colocar al interruptor en servicio, se deben ejecutar pruebas operacionales y de temporización para chequear relés de control, aparatos de protección y esquemas. Generalmente las pruebas operacionales incluyen los siguientes pasos:

1. Asegurar que el interruptor abrirá y cerrará eléctricamente tanto en los conmutadores de control local como en los conmutadores remotos de control. Si se usa un conmutador local/remoto o de prueba de mantenimiento, se debe asegurar que esté funcionando correctamente.
2. Verificar la operación correcta de las funciones de alarma y bloqueo de operación. Se monitorea un parámetro: Energía de operación del mecanismo.
3. Verificar que el circuito anti-bombeo está operando adecuadamente según su esquema particular de control.
4. Probar cualquier aparato opcional tal como relés de baja tensión o relés de retardo de tiempo de recierre.

CONCLUSIONES

Como resultado de la información obtenida y anteriormente mencionada, se concluye a que la interrupción exitosa de la corriente en un circuito se logra a través de una desionización del entrehierro del mismo interruptor. Para evitar daños al interruptor se requiere reducir el tiempo de arqueo es decir, es necesario lograr que la recuperación dieléctrica se lleve a cabo con mayor rapidez que el incremento del voltaje transitorio de restablecimiento.

También se concluye a que un circuito reactivo es más difícil de interrumpir que un circuito resistivo, ya que el voltaje de recuperación depende del factor de potencia.

Debido a que las variaciones de corriente en la práctica pueden ser desde unos cuantos amperes hasta las corrientes más intensas de cortocircuito de centenares de kiloamperes, el interruptor está equipado con contactos principales y contactos de arco, así el arco se propaga en los contactos de arco y se preserva la integridad de los contactos principales.

Todos los interruptores de potencia trabajan bajo los mismos principios de operación sin importar el voltaje, la corriente y la potencia a los que están sujetos, sin embargo sus características de diseño y su capacidades de operación se ven involucrados a los esfuerzos tanto eléctricos como mecánicos a los que se somete durante su vida en servicio, de ahí la importancia de distinguir entre las dimensiones en su estructura física, el tipo de mecanismo de accionamiento que utiliza y el medio de extinción del arco eléctrico, datos importantes que se utilizan para la realización de mantenimientos que permiten recuperar los niveles de confiabilidad de los equipos disminuidos por razón del número de operaciones o ciclos de tiempo establecidos para éstos, también nos ayudan a seleccionar el tipo de pruebas que se les realiza para determinar el tipo de mantenimiento y las condiciones en las que se encuentra tanto el interruptor como el mecanismo y sobre todo para la adquisición o venta de equipo nuevo.

Las distancias internas de aislamiento a contactos abiertos debe ser tal que en caso de pérdida de presión del gas sf6, hasta un valor igual al atmosférico, el interruptor debe soportar en forma continua su tensión nominal entre terminales y a tierra.

El interruptor en estudio cuenta con una tecnología de autoexplosión la cual es de gran importancia cuando se trata de interrumpir corrientes altas, aprovechando la presión generada por el arco para interrumpir el paso al primer cruce por cero de la corriente.

La tensión indicada de este interruptor (145 kV), es la tensión máxima soportada y para la cual está diseñado.

ANEXO 1

Normas

Las normas siguientes son las aplicables en la mayoría de interruptores de potencia y en ellas se especifican los lineamientos a seguir desde el diseño, pruebas e instalación de estos interruptores.

NRF-022-CFE; La norma de referencia de CFE (aplicable a interruptores de 72.5 a 420 KV). Esta norma de referencia ha sido elaborada de acuerdo con las reglas de operación del comité de normalización de CFE (CONORCFE), también participaron en la aprobación las áreas de CFE y organismos miembros del CONORCFE.

IEC 62271-10-2001; Interruptores de potencia de corriente alterna.

IEC 61166-1993; Interruptores de potencia de corriente alterna- Guía para la calificación sísmica de interruptores de potencia de corriente alterna.

IEC 61233-1994; Interruptores de potencia de corriente alterna- Interrupción de carga inductiva.

NMX-H-074, NRF-023-CFE; Bastidores y soporte de los interruptores de potencia.

IEC-60376; Especificación de las características del gas.

IEC-60694; Corriente nominal de acuerdo a la norma.

IEC-60815; Distancias de fuga.

BIBLIOGRAFÍA

Comisión Federal de Electricidad- Gerencia de Subestaciones y Líneas de Transmisión. *Manual de Interruptores de Potencia.*

General Electric. *Interruptores de tanque muerto 72,5–800 kV: tecnología avanzada en un diseño compacto y confiable.*

Comisión Federal de Electricidad- *Norma de referencia NRF–022-CFE*

Romero Escobar, J. Carlos. *Diseño de Subestaciones Eléctricas.*

B. Ravindranath. *Protección de Sistemas de Potencia e Interruptores.*

Enríquez Harper, Gilberto. *Fundamentos de Protección de Sistemas Eléctricos por Relevadores.*

Enríquez Harper, Gilberto. *Pruebas y Mantenimiento a Equipos Eléctricos.*

Martin, J. Raull. *Diseño de Subestaciones Eléctricas.*

Revista ABB. *El Interruptor: Desarrollo modelo de un producto industrial.*

Megger. *Guía de prueba de interruptores.*

Ruben D. Garzon. *High Voltage Circuit breakers: Design and Applications.* 2da Edición.