

Existe un breve lapso al final de cada semiperíodo, en que la corriente se interrumpe debido a que su valor es tal que no logra mantener el grado necesario de ionización y el arco se enfría. Estas pausas de corriente cero va aumentando hasta que en algún momento la tensión impresa por el sistema es menor que V_R y el arco se apaga definitivamente.

El proceso descrito permite decir que la interrupción de circuitos resistivos es relativamente simple. Sin embargo, la interrupción es particularmente difícil en circuitos fuertemente inductivos (ó capacitivos), dado que la tensión impresa por el sistema es máxima cuando la corriente pasa por cero. Según esto, el problema fundamental en el diseño de interruptores es el medio que debe usarse para enfriar el arco y extinguirlo, en el breve lapso en que la corriente pasa por cero.

b. Interrupción de una línea fallada

El circuito de la Figura 2.35 es una representación de esta situación. En este circuito se ha supuesto concentrada la capacitancia C de la línea en un sólo punto; R y L representan la resistencia y la inductancia de los elementos del sistema conectados entre la fuente de alimentación de voltaje v_g y el punto en donde se produce la falla. Inicialmente el interruptor AB está cerrado y el voltaje entre fase y tierra v_c varía sinusoidalmente. Supongamos que se produce un cortocircuito en F en el instante t_1 cuando el voltaje es máximo. El voltaje v_c cae bruscamente a cero (Figura 2.36) y se establece una corriente de cortocircuito atrasada en casi 90° al voltaje, dado que la resistencia R es pequeña comparada con la inductancia L . Tan pronto como el cortocircuito es desconectado por el interruptor, en t_2 , el voltaje sube rápidamente y debido a la inductancia del circuito sobrepasa el valor máximo de v_c y a no ser por la resistencia podría alcanzar a dos veces el valor máximo del voltaje nominal. El voltaje oscilará entonces en forma amortiguada hasta recuperar la forma de onda normal. Como el borne B del interruptor está conectado a tierra a través de la falla, el voltaje entre los contactos v_R será igual al voltaje v_c .

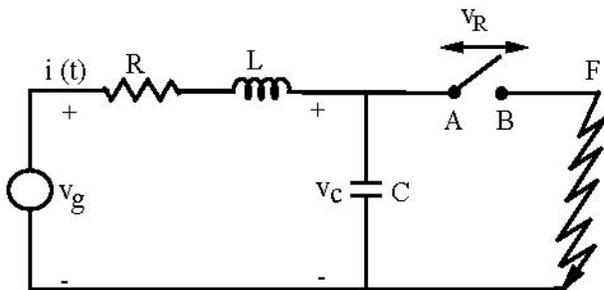


Figura 2.35.- Circuito equivalente de la apertura de una línea en cortocircuito

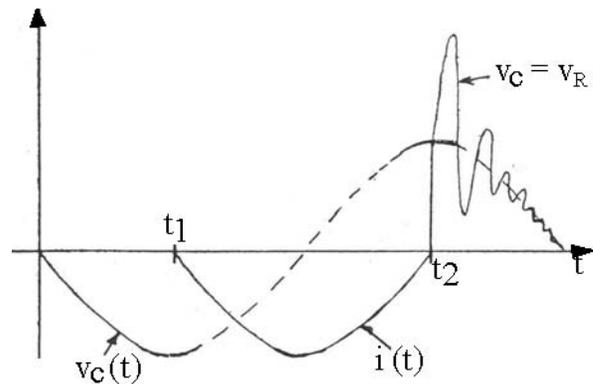


Figura 2.36.- Oscilograma de la apertura de una línea en cortocircuito

c. Apertura de una línea larga en vacío

El sistema posee una gran capacitancia y se puede representar por el circuito equivalente LC de la Figura 2.37, donde se ha despreciado la resistencia de la línea. La Figura 2.38 muestra un oscilograma de esta situación; al abrir el interruptor se establece un arco eléctrico cuyo corte se produce cuando la corriente pasa por cero en $t = t_1$ por ejemplo.

El condensador queda cargado con $V_c = -V_g$ (Valores máximos) y la tensión entre los contactos $v_R = v_g - v_c$ crece desde cero hasta $2V_g$ medio ciclo después según la curva mostrada. Si el arco se vuelve a encender, v_R baja casi hasta cero (tensión de combustión V_a) y al circuito LC se aplica una tensión $V_g + V_R \approx 3V_g$. Existe una oscilación a frecuencia $f = 1/(2\pi\sqrt{LC})$ (comparativamente alta) que lleva la tensión en el condensador a $+3V_g$ en el instante en que la corriente vuelve a pasar por cero. Al cortarse el arco, el condensador puede quedar cargado a $+3V_g$, con lo que $v_R = v_g - v_c$ crece hasta hacerse Aproximadamente igual a $-4V_g$ y así sucesivamente, pudiendo hacer que la tensión en el condensador alcance a $-5V_g$. En este análisis se ha supuesto que las reigniciones ocurren en los instantes más desfavorable, es decir, cuando se producen los voltajes transientes más elevados. Es muy importante impedir que el arco se vuelva a iniciar en forma sucesiva, porque las sobretensiones producidas son peligrosas para los equipos del sistema, mientras que si el arco persiste, podría llegar a quemar los contactos de los interruptores.

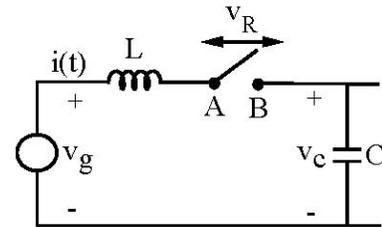


Figura 2.37.- Circuito equivalente a la apertura de una línea en vacío

d. Características de un interruptor

El buen funcionamiento de un interruptor que abre con carga depende de que la rigidez dieléctrica que puede ofrecer al paso del arco, tenga una velocidad de crecimiento adecuadamente elevada con respecto del voltaje establecido por el circuito externo entre los contactos, durante la carrera de apertura. Para cumplir con esta premisa en una aplicación en particular, se requiere especificar una serie de factores que son parte de las características del interruptor. Entre estos factores se destacan:

d.1. Voltaje nominal

Es el valor efectivo máximo de la tensión entre fases, con la cual puede operar el interruptor en forma permanente. Se elige siempre un valor algo superior a la tensión nominal del SEP, por ejemplo: 15 kV, para un sistema de 13,8 kV.

Los valores de tensión están especificados para operación en lugares donde la altura no supere los 3.300 pies (1.000 metros.) sobre el nivel del mar. Un interruptor puede utilizarse con alturas mayores, pero su tensión nominal sufre una degradación o derrateo (derating), según la Tabla 2.10 siguiente:

Tabla 2.10.- Factor de degradación o derrateo de la tensión nominal

Altura en pies	Factor de derrateo
3.300	1,00
4.000	0,98
5.000	0,95
10.000	0,80

Para alturas superiores a los 10.000 pies, es necesario estudiar el problema en particular, ya que la capacidad de interrupción también puede resultar afectada.

d.2. Corriente nominal

Es el valor efectivo de la mayor corriente que los contactos pueden soportar en forma permanente, sin calentarse excesivamente, considerando una altura máxima de 3.300 pies. En el caso de que ésta sea superior, la corriente nominal se degrada de acuerdo a los valores dados por la Tabla 2.11 siguiente:

Tabla 2.11.- Factor de derrateo de la corriente nominal

Altura en pies	Factor de derrateo
3.300	1,0
4.000	0,996
5.000	0,99
10.000	0,96

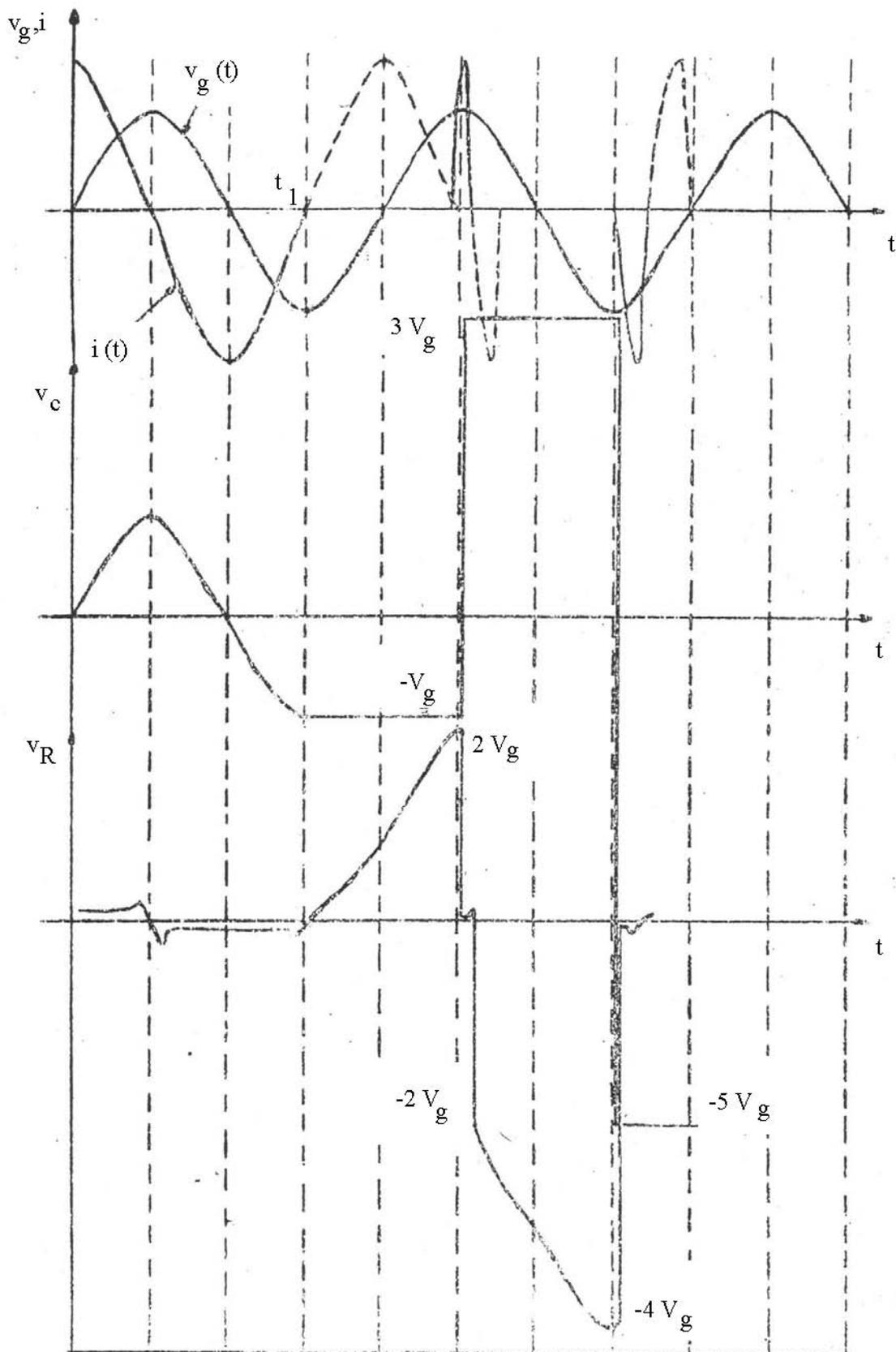


Figura 2.38.- Oscilograma de la interrupción de una línea en vacío

d.3. Corriente de paso momentánea

Es el valor efectivo de la corriente por polo que puede circular durante un lapso determinado. En general su valor es mayor que el de la corriente máxima de interrupción y queda determinado por los límites térmicos y de fuerzas magnéticas desarrollados en el interruptor.

d.4. Corriente de interrupción nominal

Es el valor efectivo de la corriente total por polo que el interruptor puede soportar en el momento de la apertura (incluyendo la componente de corriente continua), si la tensión del sistema es la nominal. Para obtener la corriente de ruptura a una tensión de operación inferior a la nominal, se puede usar la siguiente expresión:

$$I_{VO} = I_{VN} \frac{V_N}{V_O} \quad (2.20)$$

Donde:

I_{VO} : Corriente de interrupción al voltaje de operación

I_{VN} : Corriente de interrupción nominal (a tensión nominal)

V_N : Voltaje nominal (entre líneas)

V_O : Voltaje de operación (entre líneas)

El límite superior es el valor de la corriente máxima de interrupción, el cual no puede ser sobrepasado cualquiera que sea el voltaje de operación.

d.5. Capacidad de ruptura simétrica

Es la potencia aparente trifásica que considera la tensión nominal y la corriente nominal de interrupción. Es constante dentro de cierto rango de tensiones inferiores a la nominal, es decir, los MVA nominales de interrupción simétrica son:

$$MVA_N = \sqrt{3} V_N I_{VN} \quad (2.21)$$

O bien:

$$MVA_N = \sqrt{3} V_O I_{VO} \quad (2.22)$$

Si se considera que la corriente contiene la componente unidireccional (continua), se pueden emplear estas mismas relaciones, introduciendo un coeficiente comprendido entre 1,0 y 1,6; determinando de esta forma los MVA de interrupción asimétricos. Estos coeficientes se pueden obtener también a partir de curvas que son función de la relación X/R en el punto de falla y del tiempo transcurrido hasta que los contactos del interruptor comienzan a separarse.

Algunos ejemplos de interruptores de poder se indican en la Tabla 2.12

Tabla 2.12.- Características de interruptores de poder

Tensión del sistema (kV)	Rangos de Corriente Nominal (A)	Corrientes de Cortocircuito simétrico (kA)	Capacidad cortocircuito (MVA)
66	800-2.000	13,1-21,9	1.500-2.500
132	600-1.600	10,9-15,3	2.500-3.500

d.6. Tiempo de interrupción nominal

Es el intervalo máximo admisible entre la energización del circuito de operación del interruptor y la extinción del arco en los tres polos. Se mide normalmente en ciclos de la onda fundamental de 50 Hz. (Si los interruptores son de procedencia americana, la base puede ser 60 Hz). Por ejemplo, los interruptores antiguos tenían tiempos del orden de 8 ciclos. Un interruptor normal de hoy puede tardar 5 ciclos. En la actualidad hay interruptores que abren en 3, e incluso 2 ciclos. Por ejemplo, un interruptor del tipo HLR de ASEA, de pequeño volumen de aceite, abre en 2,5 ciclos en 50 Hz, o bien, en 3 ciclos en 60 Hz.

En general, los tiempos de apertura de los interruptores van de 0,05 a 0,10 seg. Por ejemplo, un interruptor moderno en base a soplo de aire abre sus contactos en 0,04 seg. y requiere entre 0,01 y 0,02 seg adicionales en extinguir el arco. Este retardo debe tenerse en cuenta cuando se trata de coordinar protecciones en base a tiempos.

e. Tipos de interruptores de poder de alta y media tensión

e.1. Interruptores en aceite

Existe o se introduce aceite aislante durante la apertura de los contactos. Se clasifican en:

– **Interruptores de gran volumen de aceite**

Los contactos fijos y móviles se encuentran alojados en el interior de un estanque metálico lleno de aceite (Figura 2.39). El calor del arco evapora instantáneamente el aceite que lo rodea, de tal modo que se genera hidrógeno a presión, el cual, debido a su gran conductividad térmica y al carácter explosivo que le da la presión, favorecida por un diseño adecuado de la cámara de extinción, contribuyen a ahogar rápidamente al arco. Este tipo de interruptor es muy robusto, sencillo, comparativamente silencioso, fácil de mantener y pueden conectarse T/C tipo bushing de entrada.

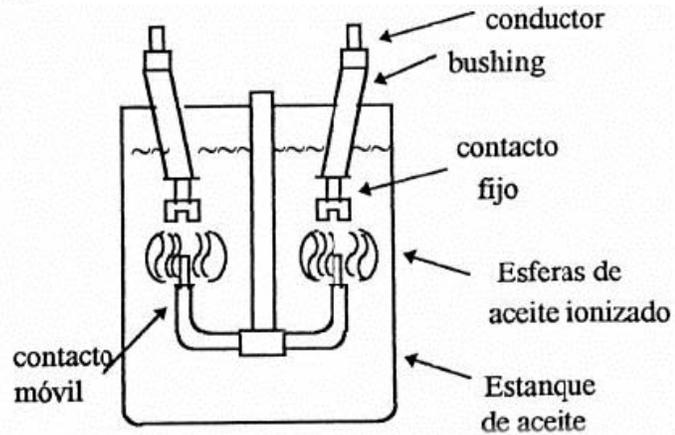
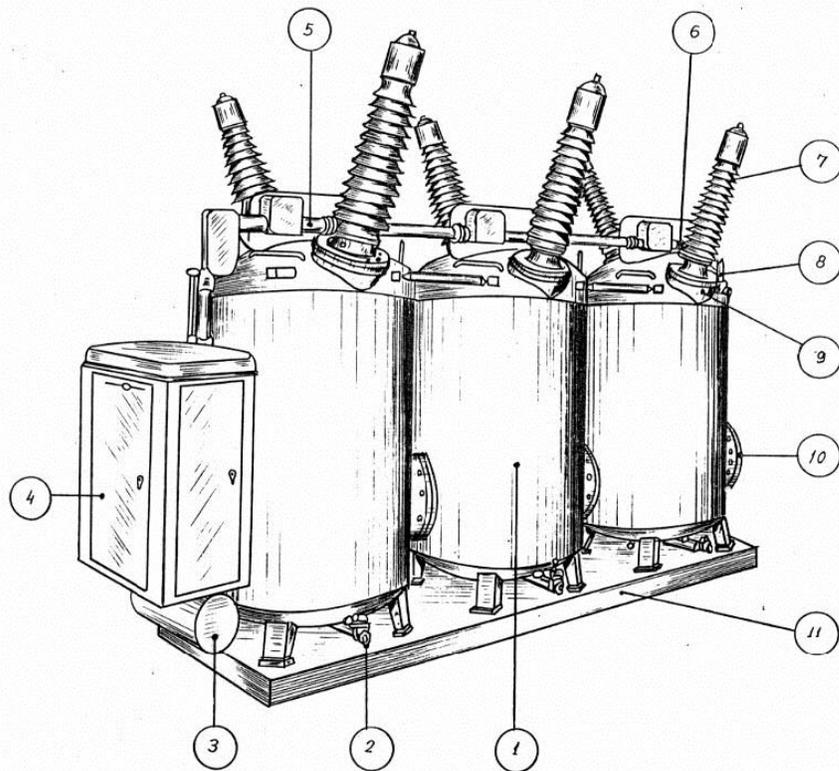


Figura 2.39.- Esquema de un polo de interruptor en aceite

Como inconvenientes o desventajas cabe mencionar, su excesivo peso y tamaño, ya que ocupa una gran cantidad de aceite mineral de alto costo (el estanque puede contener hasta 12.000 litros de aceite), lo que dificulta construir interruptores para tensiones de más de 154 kV, la posibilidad de incendio o explosión, los contactos son grandes y pesados y requieren de frecuentes cambios, la necesidad de inspección periódica de la calidad y cantidad de aceite en el estanque. Por lo tanto no pueden usarse en interiores, ni emplearse en reconexión automática. La Figura 2.40, muestra un interruptor de gran volumen de aceite con tres estanques; uno por polo o por fase.

– Interruptores de pequeño volumen de aceite

En estos interruptores (Figura 2.41 a) se reduce la cantidad de aceite a través de un diseño mas elaborado de la cámara de extinción (Figura 2.41 b). Esta cámara; mas pequeña, puede ser fabricada de material aislante y ponerse a la tensión de la línea, lo que abarata el costo. El aceite es conducido a presión a la zona del arco mediante una bomba que actúa en conjunto con el mecanismo de apertura. En este caso no hay mayores dificultades para colocar cámaras en serie y operar con tensiones tan elevadas como 750 kV.



Detalle de Componentes:

1. Estanque
2. Válvula de Drenaje, para sacar muestras
3. Estanque de aire comprimido
4. Caja del mecanismo de operación
5. Tubos de protección de barras de acoplamiento
6. Resorte de operación
7. Bushing
8. Indicador de nivel de aceite
9. Flange de soporte del bushing
10. Tapa de inspección
11. Fundaciones

Figura 2.40.-
Interruptor trifásico
de gran volumen de
aceite

La cantidad de aceite que requiere este tipo de interruptor es del orden del 2% del anterior, es decir unos 240 litros, como promedio. Como desventajas se pueden mencionar el peligro de incendio y explosión aunque en menor grado comparados a los de gran volumen de aceite, no pueden usarse con reconexión automática, requieren una mantención frecuente y reemplazos periódicos de aceite, es difícil conectar transformadores de corriente y tienen menor capacidad de ruptura.

e.2. Interruptores neumáticos

Uno de los inconvenientes de los interruptores en aceite es el peligro que significa la presencia de un material combustible en las cercanías de una fuente de alta temperatura, como lo es el arco eléctrico. A lo anterior se suma la necesaria mayor preocupación que significa mantener el buen estado del aceite. Por estas razones se usan interruptores que tienen sus contactos en aire.

Entre las ventajas se pueden mencionar, el que no hay riesgos de incendio o

explosión, su operación es muy rápida, pueden emplearse en sistemas con reconexión automática, tienen alta capacidad de ruptura, la interrupción de corrientes altamente capacitivas no presenta mayores dificultades, hay menor daño y más fácil acceso a los contactos, son comparativamente de menor peso.

Presentan sin embargo, algunas desventajas, tales como las siguientes: deben tener una compleja instalación debido a la red de aire comprimido, que incluye motor, compresor, cañerías, etc. y por lo tanto su construcción es más compleja y con mayor costo, requiere de personal especializado para su mantención y son más sensibles a la tensión de reignición del arco.

Se pueden construir como interruptores de aire a presión atmosférica, los que son poco aplicables en sistemas de alta tensión, y de tipo aire comprimido, los que se emplean principalmente en sistemas de alta tensión. A continuación se indican algunos aspectos constructivos y de funcionamiento de cada uno de ellos.

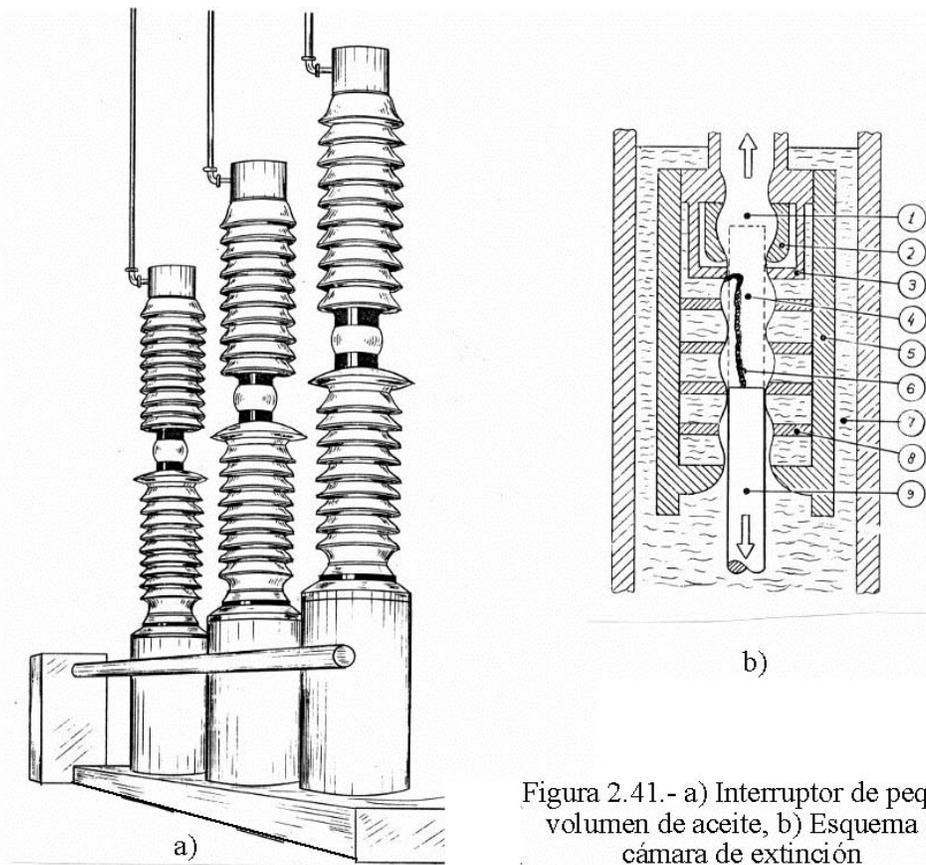


Figura 2.41.- a) Interruptor de pequeño volumen de aceite, b) Esquema de la cámara de extinción

Detalle de componentes en la Figura 2.41 b)

1. Abertura de escape de gases
2. Contacto fijo
3. Anillo apaga chispas
4. Espacio cilíndrico donde se produce el arco
5. Cámara de extinción
6. Arco eléctrico
7. Aceite
8. Discos de material aislante intermedios
9. Varilla móvil

– Interruptores de aire a presión atmosférica

El mecanismo para la extinción del arco consiste exclusivamente en aumentar su longitud, lo que además de ser conseguido por la separación de los contactos, se logra principalmente de dos maneras:

Convección natural: Se disponen los contactos de tal modo que el calor desarrollado en la zona del arco provoque una corriente de aire por convección que lo alargue llevándolo a zonas más frías. Este método es el menos eficiente por lo cual prácticamente no se usa en alta tensión.

Por sopleo magnético: En estos interruptores la corriente eléctrica que forma el arco se hace pasar por bobinas dispuestas de tal modo que por atracción magnética produzcan un alargamiento del arco, haciéndolo describir una trayectoria prefijada a través de un dispositivo “apaga-arcos”. La Figura 2.42 muestra en forma esquemática este tipo de interruptores.

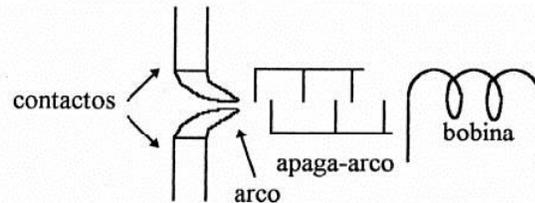


Figura 2.42.- Representación esquemática de un polo de un interruptor de sopleo magnético

– Interruptores de aire comprimido

En este tipo de interruptores, tal como se muestra en la Figura 2.43, por ejemplo, el arco se apaga estirándolo y enfriándolo con ayuda de un chorro de aire que se fuerza a pasar entre los contactos en el proceso de apertura. Las cámaras de extinción están a tensión de la línea y pueden ser unidas en serie para alcanzar cualquier nivel de tensión. Su gran poder de extinción hace que este tipo de interruptor sea el más usado, a tensiones donde no se pueda usar el de gran volumen de aceite. El carácter explosivo de la operación con aire comprimido los hace ser bastante ruidosos. En algunos casos,

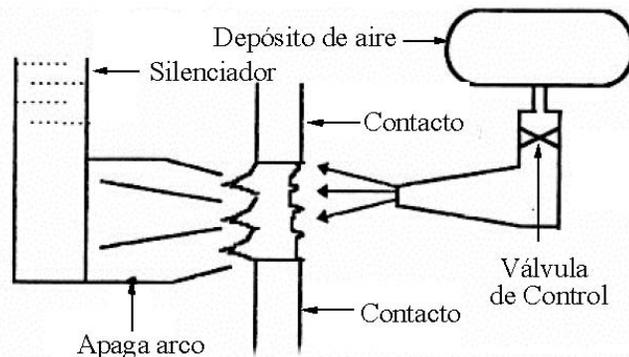


Figura 2.43.- Diagrama esquemático de un interruptor de aire comprimido de chorro transversal

el mecanismo de operación también funciona con aire comprimido.

Las Figuras 2.44 a) y b) muestran esquemáticamente un interruptor de aire comprimido y la sección longitudinal de una cámara de extinción, respectivamente.

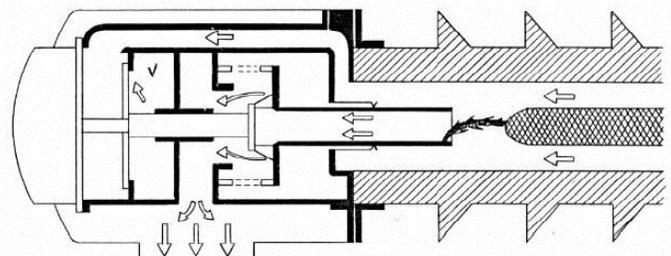
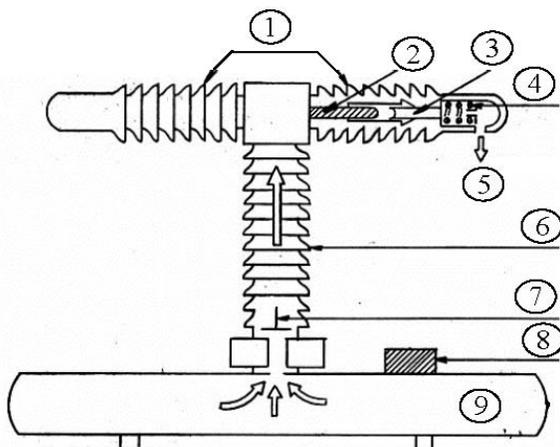


Figura 2.44 a) Esquema de un interruptor de aire comprimido; b) Corte longitudinal de una cámara de extinción

Detalle de componentes en la Figura 2.44 a)

1. Cámaras de arco
2. Contacto fijo
3. Contacto móvil
4. Resorte de aceleración

5. Escape del aire
6. Columna aislante
7. Válvula
8. Tablero de Control
9. Estanque de aire comprimido

El continuo aumento en los niveles de cortocircuito en los sistemas de potencia ha forzado a encontrar formas más eficientes de interrumpir corrientes de fallas que minimicen los tiempos de corte y reduzcan la energía disipada durante el arco. Es por estas razones que se han estado desarrollando con bastante éxito interruptores en vacío y en hexafluoruro de azufre (SF₆).

e.3. 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. En efecto, cuando un circuito en corriente alterna se desenergiza separando un juego de contactos ubicados en una cámara en vacío, la corriente se corta al primer cruce por cero o antes, con la ventaja de que la rigidez dieléctrica entre los contactos aumenta en razón de miles de veces mayor a la de un interruptor convencional (1 kV por μs para 100 A en comparación con 50 V/ μs para el aire). Esto hace que el arco no vuelva a re-encenderse. Estas propiedades hacen que el interruptor en vacío sea más eficiente, liviano, y económico.

La presencia del arco en los primeros instantes después de producirse la apertura de los contactos se debe principalmente a emisión termoiónica y a emisión por efecto de campo eléctrico. En otras palabras, los iones aportados al arco provienen de los contactos principales del interruptor. Conviene destacar que en ciertas aplicaciones se hace necesario mantener el arco entre los contactos hasta el instante en que la corriente cruce por cero. De esta forma se evitan sobretensiones en el sistema producto de elevados valores de di/dt . La estabilidad del arco depende del material en que estén hechos los contactos y de los parámetros del sistema de potencia (voltaje, corriente, inductancia y capacitancia). En general la separación de los contactos fluctúa entre los 5 y los 10 mm.

La Figura 2.45 muestra un esquema de un interruptor en vacío.

Entre las ventajas, que presenta, se pueden indicar las siguientes: tiempo de operación muy pequeño; en general, la corriente se anula a la primera pasada por cero, la rigidez dieléctrica entre los contactos se restablece rápidamente impidiendo la reignición del arco, son menos pesados y más baratos, prácticamente no requieren mantención y tienen una vida útil mucho mayor que la de los interruptores convencionales.

Como desventajas se pueden mencionar, su baja capacidad de ruptura (de entre 60 a 100 MVA), la posibilidad de generar sobretensiones debido al elevado di/dt .

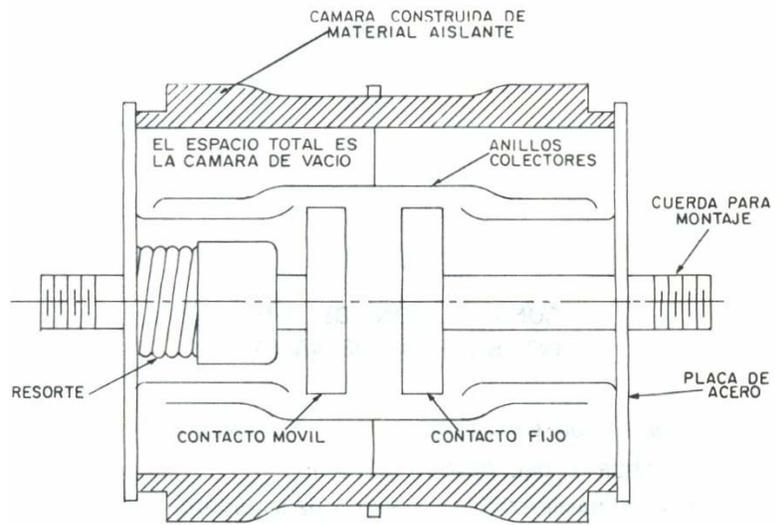


Figura 2.45.- Diagrama esquemático de la sección transversal de un interruptor de alto vacío

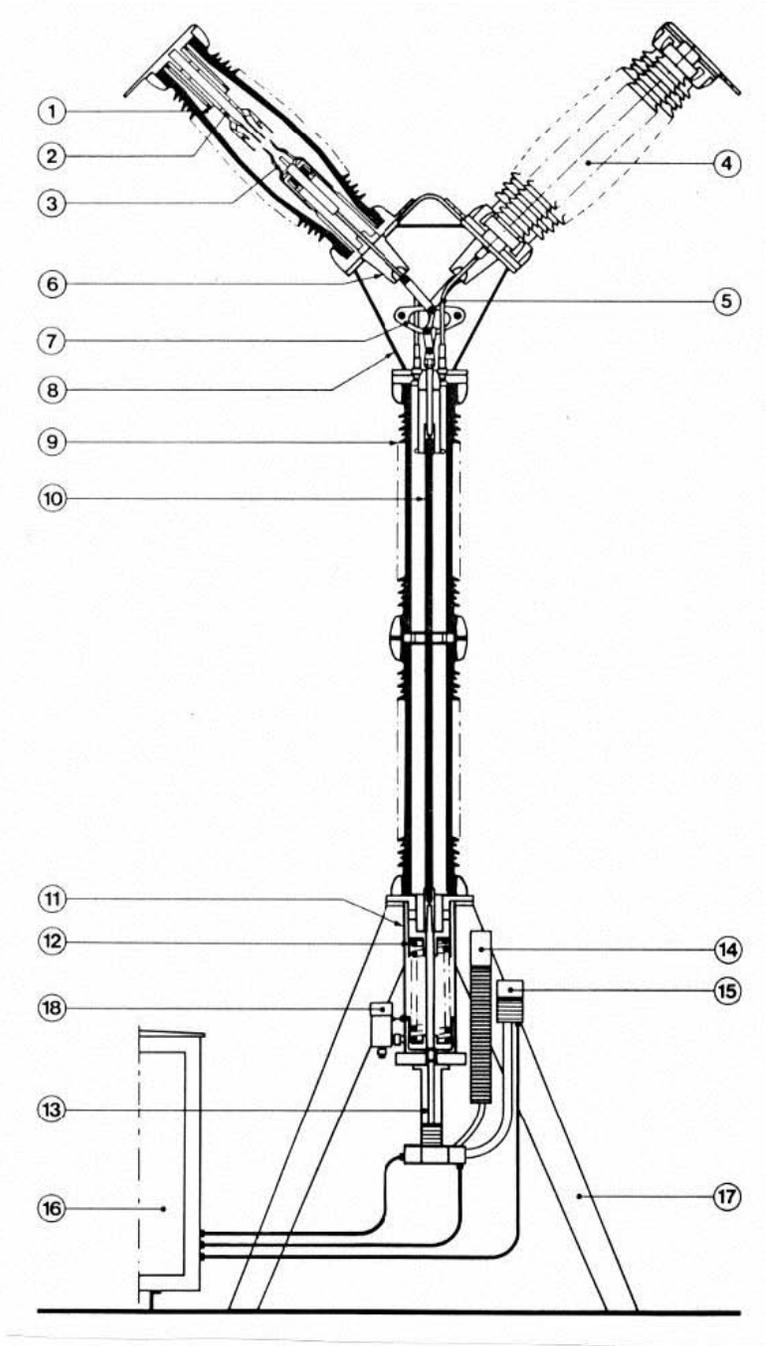
e.4. Interruptores en Hexafluoruro de Azufre (SF_6)

El hexafluoruro de azufre se usa como material aislante y también para apagar el arco. El SF_6 es un gas muy pesado (5 veces la densidad del aire), altamente estable, inerte, inodoro e ininflamable. En presencia del SF_6 la tensión del arco se mantiene en un valor bajo, razón

por la cual la energía disipada no alcanza valores muy elevados. La rigidez dieléctrica del gas es 2,5 veces superior a la del aire (a presión atmosférica). La rigidez dieléctrica depende de la forma del campo eléctrico entre los contactos, el que a su vez depende de la forma y composición de los electrodos. Si logra establecerse un campo magnético no-uniforme entre los contactos, la rigidez dieléctrica del SF₆ puede alcanzar valores cercanos a 5 veces la del aire. Son unidades selladas, trifásicas y pueden operar durante largos años sin mantención, debido a que el gas prácticamente no se descompone, además de no ser abrasivo.

Dada la alta rigidez dieléctrica que el gas presenta, es un excelente aislante. Por ello resulta ser irremplazable en las subestaciones del tipo encapsulado, donde se utiliza además como medio de aislación para las barras de alta tensión. La subestación encapsulada o GIS (Gas Insulated Switchgear), tiene la gran ventaja de ocupar mucho menos espacio que una subestación convencional (aproximadamente un 50%), lo que muchas veces compensa desde el punto de vista económico el mayor costo inicial. La presión a que se mantiene el SF₆ en interruptores es del orden de 14 atmósferas mientras que en switchgear alcanza las 4 atmósferas. Quizás si la única desventaja de este tipo de interruptor consiste en que no pueden operarse a temperaturas muy bajas (inferiores a 10 °C), para evitar que el gas se licúe, lo que obliga a utilizar calefactores cuando se emplea en el exterior.

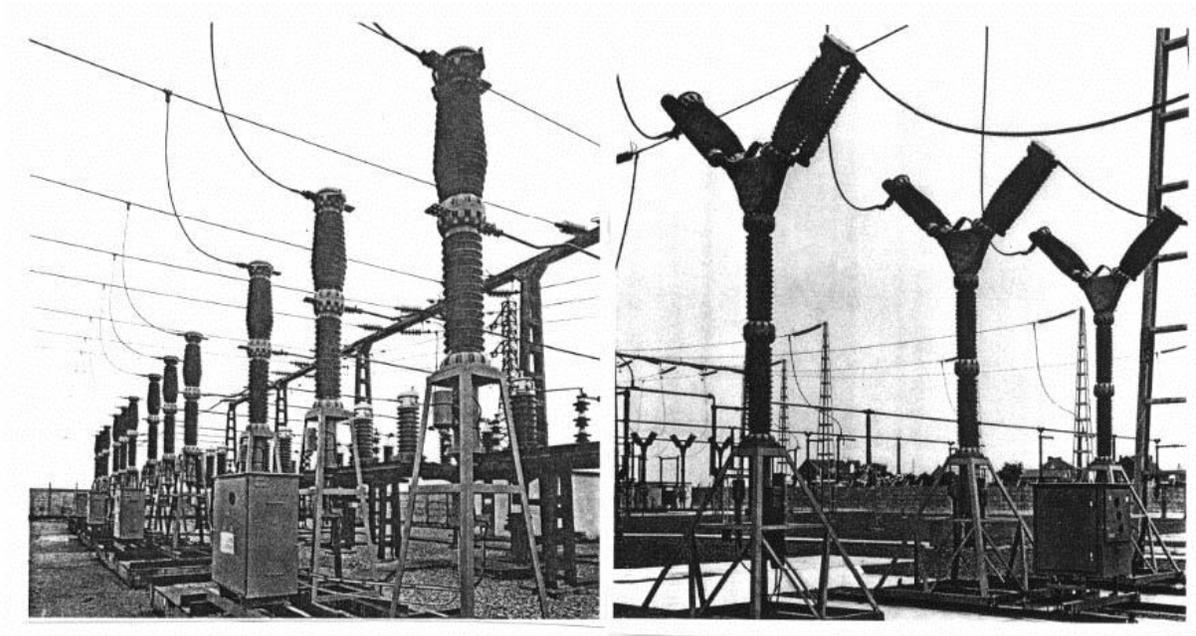
La Figura 2.46 muestra un esquema que permite observar las diferentes partes que componen un módulo de un polo del interruptor tipo FA de autosoplado, en SF₆, de Merlin Gerin, utilizado para tensiones que van desde los 72,5 a 765 kV. Según la tensión, un polo del disyuntor FA está constituido por uno o varios módulos, de una o dos cámaras. El módulo incluye, dos cámaras de corte conectadas en serie, dos condensadores de reparto de tensión, montados en paralelo sobre las cámaras de corte, un gato hidráulico para la conexión, etc. La Figura 2.47 muestra los disyuntores FA 1 y FA 2 en servicio.



Detalle de los componentes de la Figura 2.46.

1. Cámara de corte
2. Contacto fijo
3. Contacto móvil
4. Condensador
5. Conducto acoplamiento de las cámaras
6. Dispositivo de guía
7. Conjunto de bielas de mando
8. Cáster
9. Aislador-soporte
10. Biela aislante
11. Caja colocación de resortes
12. Resortes
13. Gato hidráulico
14. Acumulador de aceite a alta presión
15. Estanque auxiliar de baja presión
16. Armario de mando
17. Chasis metálico
18. Manostato

Figura 2.46.- Módulo de un polo del interruptor de autosoplado en SF₆, tipo FA (Merlin Gerin)



a)

b)

Figura 2.47.- Disyuntores en SF₆, en servicio: a) Tipo FA 1; b) Tipo FA 2

2.3.2. Mecanismos y circuitos de control

a. Mecanismos

Los mecanismos que utilizan los interruptores en su operación, concentran una gran cantidad de energía que se libera en fracciones de segundo. Para contar con la energía necesaria, los interruptores usan mecanismos tales como la compresión de resortes espirales o el uso de barras de torsión, como también la acumulación de aire comprimido a gran presión.

El mecanismo mas común consiste en un tren de palancas que es accionado por un solenoide o un pistón operado por aire comprimido o aceite, mediante el cual se produce el cierre. El sistema de palancas está diseñado para mantenerse en la posición cerrado mediante una lengüeta de desenganche la que al ser activada libera la energía acumulada, abriendo de este modo el interruptor. La energía de reserva se acumula en el proceso de cierre y puede ser bastante grande. Por ejemplo si el cierre de un interruptor de 132 kV se hiciera mediante un solenoide, requeriría una potencia del orden de 50 kW. Por este motivo se usa aire a una presión de 150 a 200 libras/pulgada cuadrada y se emplean alrededor de 6 pies cúbicos en cada operación.

Los interruptores de media y alta tensión tienen como mínimo la energía suficiente para lograr un cierre y una apertura con la energía acumulada en su mecanismo. Por supuesto, la mayoría de los interruptores modernos tienen la capacidad para efectuar más de un ciclo de cierre apertura. En cualquier caso, el interruptor debe terminar su ciclo con una operación de apertura.

b. Circuitos de control

Un interruptor puede ser accionado directamente en forma manual (operación local), o bien,

mediante un electroimán que se puede energizar a distancia (operación remota). Generalmente, se dispone de dos electroimanes con potencias del orden de los 100 a 200 watt que se destinan a liberar la energía almacenada. Se denominan: Bobina de Cierre (BC), con su equivalente en inglés Close Coil (CC) y Bobina de Desenganche (BD), con su equivalente Trip Coil (TC). Estas dos bobinas están diseñadas para trabajar en forma intermitente, puesto que se construyen para que sean capaces de operar hasta con el 60% del voltaje nominal, para asegurar su operación bajo condiciones anormales de voltaje de control.

b.1. Alimentación de los Circuitos de Control

Las principales fuentes de energía eléctrica utilizadas en el control de los interruptores de poder son:

– Bancos de acumuladores

Se denominan también baterías de control y son las que suministran la mayor parte de la energía requerida para el funcionamiento de los diferentes circuitos de control. Se prefiere este tipo de alimentación por su seguridad y eficiencia en lugares donde existen las facilidades para instalar bancos de baterías, o bien, cuando la cantidad de interruptores así lo exige. Las baterías que conforman el banco pueden ser del tipo plomo-ácido o alcalinas, siendo estas últimas bastante más caras que las primeras, aunque tienen una mayor duración. Las tensiones que se usan pueden ser: 48 Volts para instalaciones pequeñas o medianas con capacidades de 70 a 150 Amperes-hora; 125 Volt con capacidades de 200 a 400 Amperes-hora. En forma excepcional, se pueden encontrar bancos de baterías para 220 Volt, con capacidades superiores. Todos los circuitos necesarios para el comando de los interruptores y otros equipos de una instalación, además del sistema de alarmas y señalizaciones que se alimentan de la misma fuente de corriente continua, constituyen el “Circuito de control de C.C.” de la instalación

– Transformadores de servicios auxiliares

Se usan en subestaciones pequeñas que no disponen de baterías de control y cuando se trata de pocos interruptores para transformadores de potencias menores a 4 MVA. Generalmente, se trata de interruptores que tienen sus bobinas diseñadas para operar con corriente alterna. En la práctica se recurre, excepcionalmente, a utilizar interruptores con bobinas para corriente continua que se alimentan a través de un rectificador.

La alimentación se obtiene de transformadores para servicios auxiliares con potencias del orden de 15 kVA, con secundarios en estrella de 400-231 Volt. En algunos casos el control se alimenta de los mismos transformadores de potencial de la Subestación (S/E) que proveen la energía suficiente para hacer efectivas las órdenes, además de suministrar la información necesaria. Ocasionalmente, la energía puede obtenerse de los transformadores de corriente, aunque en este caso se usan exclusivamente para dar desenganche ante fallas, siendo la operación de cierre efectuada manualmente.

b.2. Contactos auxiliares

En cualquier interruptor de poder se consulta la existencia de contactos que están previstos para fines de control. Estos contactos (auxiliares) están diseñados para trabajar con valores de voltaje y corrientes de control (125 Volt C. C. y 10 Amperes, por ejemplo). Los contactos auxiliares que siguen la acción del interruptor, es decir, cierran cuando éste cierra se denominan tipo “a”. Los

contactos que siguen la posición contraria, es decir, abren cuando el interruptor cierra, se denominan tipo “b”. (Figura 2.48)

Otra designación que se suele utilizar se basa en la posición que tienen los contactos cuando el elemento que los acciona está desenergizado, se dice: “como se recibió de fábrica”. En este caso un contacto tipo “a” se denomina “normalmente abierto” (NA) y un contacto tipo “b”, “normalmente cerrado” (NC). Todos estos contactos están adosados al mismo eje de los contactos principales, de modo que su operación coincida exactamente con la del interruptor. En algunos casos, dentro de este mismo conjunto se consulta

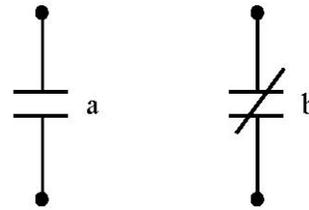


Figura 2.48.- Representación esquemática de contactos auxiliares

la existencia de contactos que tienen un pequeño adelanto en la operación que les corresponde denominados “aa” o “bb” según sea el caso.

b.3. Switch de control

Los switches o llaves de control son los encargados de comandar los interruptores de poder, a través del circuito de control dando órdenes de cierre o de apertura. Generalmente se ubican en los tableros o pupitres de control de las salas de comando, aún cuando pueden también estar ubicados en el mismo interruptor.

La Figura 2.49 muestra el aspecto exterior del switch de control, así como la disposición de los contactos y la Tabla 2.13, el diagrama de secuencia en que los contactos operan. La letra X indica que contacto está cerrado según la posición del switch. Por ejemplo, los contactos 1-1c y 4-4c son simples y cierran al poner el switch en la posición “cerrar”, pero el contacto 3-3c cierra tanto en la posición “cerrar” como “abrir”.

Por construcción, la manilla del switch permanece siempre en la posición central (reposo), pudiendo ser girada hacia la izquierda para dar una orden de cerrar, o bien, hacia la derecha para dar una orden de abrir. La manilla mueve un eje de camos que actúan sobre los contactos que se cierran o abren de acuerdo al diagrama de la Tabla 2.13. Al soltar la manilla, ésta vuelve a la posición central pero en la ventanilla queda una tarjeta que de acuerdo a su color indica la posición a que se movió la manilla la última vez. Si la tarjeta es roja, la manilla se movió a la posición cerrar. Si la tarjeta es verde, la manilla se movió a la posición abrir. Además de esto, se consultan ampollitas de señalización: de color rojo para “cerrado” y de color verde para “abierto”. De este modo se comprueba si el interruptor cumplió con la orden que se le dio. La disposición física de las ampollitas se muestra en la Figura 2.49 y su alimentación se hace a través de contactos auxiliares del interruptor tal como se muestra en la Figura 2.50.

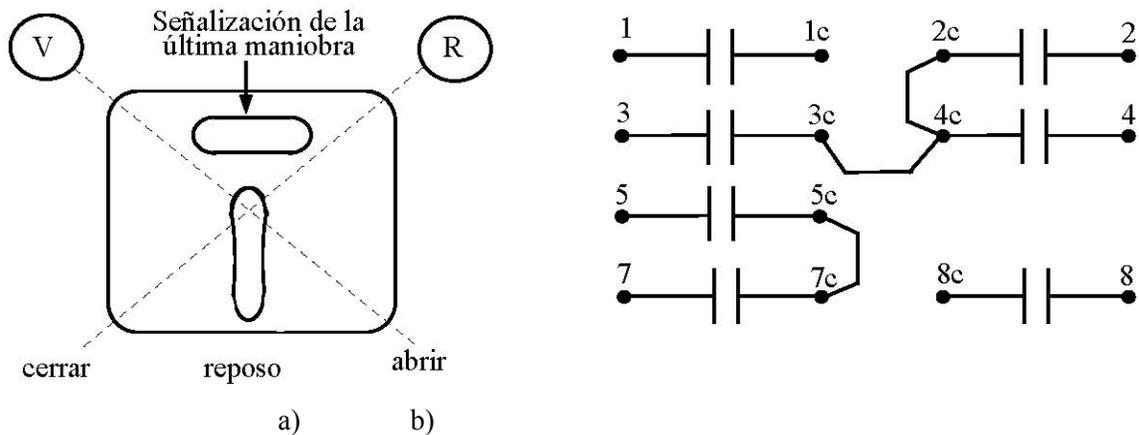


Figura 2.49.- Switch de control; a) Vista superior; b) Disposición de contactos y puentes

Tabla 2.13.- Diagrama de operación de contactos

Contacto N°	Abrir	Normal después de abrir	Normal después De cerrar	Cerrar
1-1c				X
2-2c	X			
3-3c	X			X
4-4c				X
5-5c		X	X	
7-7c			X	X
8-8c			X	X

Además de la señalizaciones anteriores, las protecciones que ordenan la apertura de interruptores poseen sistemas que permiten visualizar cual de ellas operó (unidad de sello y tarjeta, por ejemplo). Los interruptores mismos, cuentan con sistemas de alarma de tipo auditivo ya sea cuando operan o bien para indicar algún tipo de perturbación que no provoque una apertura inmediata.

b.4. Clasificación de los circuitos de control

Se pueden clasificar en dos grandes grupos, de acuerdo con su fuente de alimentación:

– De comando por corriente continua

En la Figura 2.50 se muestra un circuito de este tipo y su funcionamiento es el siguiente:

Cierre del Interruptor: Con el interruptor abierto, la posición de los contactos es la mostrada en la Figura 2.50. En estas condiciones, está encendida la ampollita verde a través de 52/b (bornes 1-2) y apagada la ampollita roja, pues 52/a (bornes 7-8) está abierto. Para cerrar el interruptor se lleva el Switch de control (Swc/52) a la posición “cerrar”, energizándose la bobina de cierre (52/BC) a través de 1-1c y 52/b (bornes 5-6). El interruptor efectivamente se cierra y cambia la posición de todos sus contactos; por lo tanto se cierra 52/a (bornes 7-8), con lo que se enciende la ampollita roja a través de la bobina de desenganche (52/BD) la que de todas formas no opera, puesto que la corriente no es suficiente para que ello ocurra. La ampollita roja encendida indica que el interruptor

efectivamente cerró y que el circuito de desenganche tiene voltaje para una próxima operación de apertura. En el circuito de cierre se abre 52/b (bornes 5-6) por lo que se desenergiza la bobina de cierre, pero el interruptor queda cerrado en forma mecánica. Además se abre 52/b (bornes 1-2) con lo que se apaga la ampollita verde

Apertura del interruptor: Esta se puede hacer energizando la bobina de desenganche, llevando la manilla del Switch de control (Swc/52) hacia la posición “abrir”, lo que cierra los contactos 2 y 3 o por la operación de la protección, cuyos contactos se han designado por P. En cualquiera de los dos casos se cortocircuita la ampollita roja (que se apaga) y se energiza la bobina de desenganche 52/BD a través del contacto 52/a (bornes 7-8) y el interruptor se abre, con lo que se enciende la ampollita verde, a través del contacto 52/b (bornes 1-2)

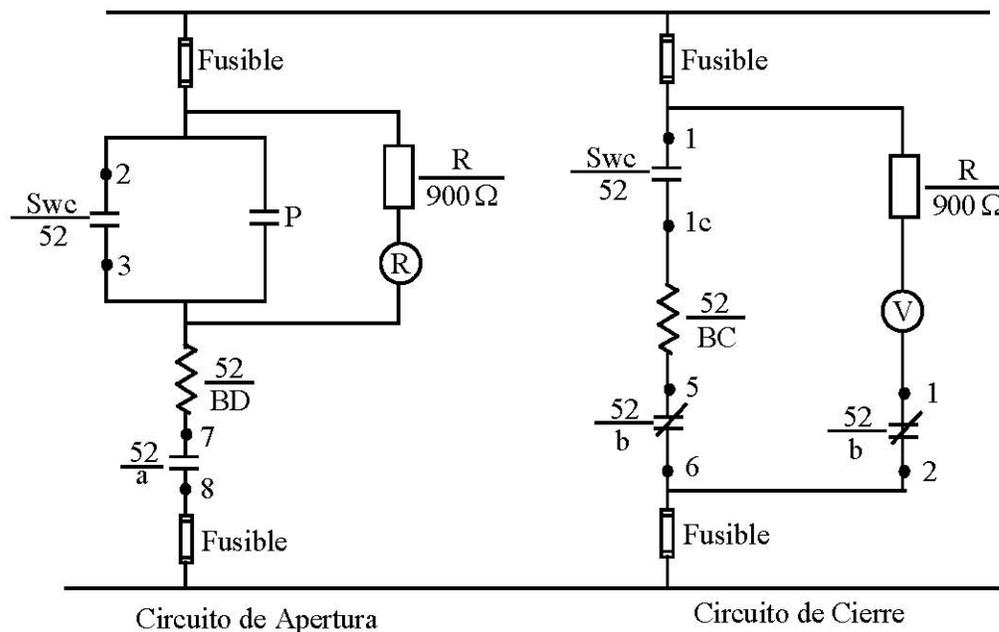


Fig. 2.50.- Diagrama elemental de control de un interruptor de poder

El desenganche es eléctricamente libre porque no depende de si el Swc/52 (bornes 1-1c) está cerrado o no. En el caso en que 1-1c se encuentre cerrado (el operador mantiene la orden de cierre del interruptor), la apertura se hace de todas maneras, pues 52/b (bornes 5-6) está abierto. Sin embargo, este esquema tiene el problema de que si se mantiene la orden de cerrar, una vez que el interruptor ha abierto, se producirán sucesivos cierres y aperturas, dando origen al denominado “bombeo” del interruptor. Para evitar este problema se hace uso de un circuito que cuenta con un relé antibombeo (94), tal como el que se muestra en la Figura 2.51, donde por simplicidad se han eliminado las ampollitas indicadoras.

En el esquema se aprecia que si se mantiene la orden de cierre contra la falla, el interruptor no vuelve a cerrar debido a que el circuito de la bobina de cierre queda interrumpido por el contacto 94/b (bornes 1-2) del relé de antibombeo, de modo que para cerrar nuevamente el interruptor, se debe inhabilitar el relé 94 abriendo el contacto 1-1c del Switch control y volviéndolo a cerrar. Este circuito no es necesario en los interruptores de sople de aire, ya que las bobinas de cierre que comandan las válvulas de aire comprimido necesitan ser desenergizadas para que sea posible efectuar una nueva orden de cierre.

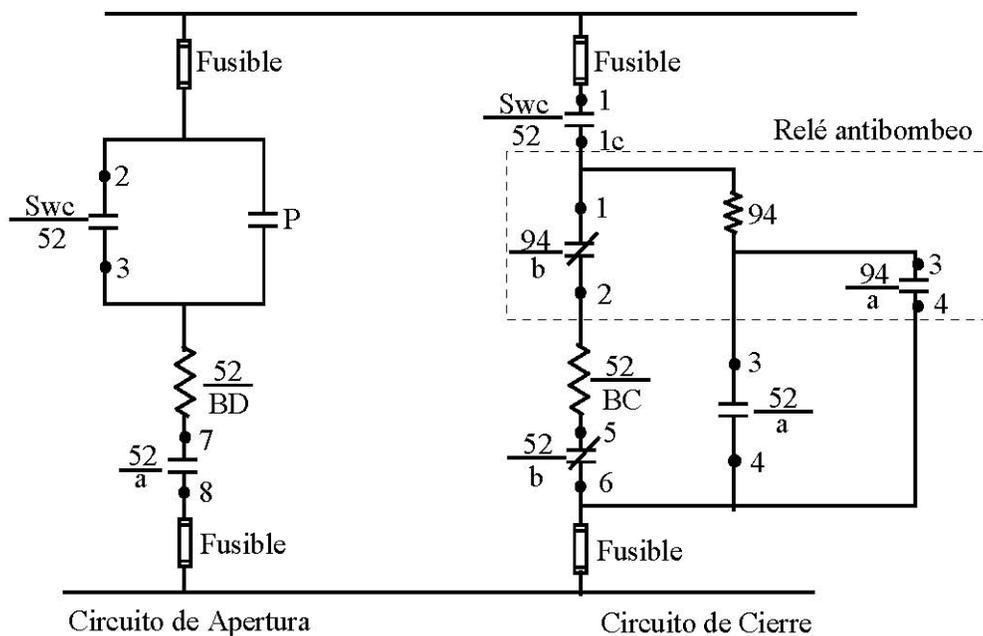


Figura 2.51.- Circuito de control de interruptor con relé antibombeo

– De comando por corriente alterna

Se usa en subestaciones inferiores a 4 MVA, que no dispongan de baterías de control. Las soluciones más usada son:

Trip serie: Mediante el uso de la corriente circulante por el propio interruptor controlado, ya sea directamente si la tensión y la corriente lo permiten o, como es más común, a través de TT/CC. La Figura 2.52 muestra el circuito de control de interruptores tipo trip serie directo para el relé de sobrecorriente IAC 51C (General Electric). El sistema funciona de la siguiente manera: En condiciones normales, la corriente de carga circula por la bobina del relé 51 y por X_1 a través del contacto cerrado X que se mantiene en esta posición debido a la corriente que circula por X_1 . El contacto X a su vez cortocircuita las bobinas de sello y tarjeta del relé y de apertura del interruptor. Si existe una corriente muy alta que haga operar el relé 51 se cierra 51/a que cortocircuita la bobina X_2 ; en esta circula una corriente debido a la tensión inducida por la corriente que circula por la bobina X_1 . La corriente inducida en X_2 es tal que hace aumentar la reluctancia del circuito magnético a la izquierda de la bobina X_1 , por lo que el flujo producido por X_1 se cierra a través del núcleo situado a la derecha. Así entonces, se abre X y la corriente pasa por la bobina de sello y tarjeta (51/SyT) y de desenganche del interruptor (52/BD) lo que hace que se cierre el contacto de la bobina de sello y tarjeta SyT/a dando otra vía de circulación a la corriente en X_2 y se abra al interruptor. Aunque ahora no hay corriente en el secundario del T/F de corriente el interruptor queda abierto.

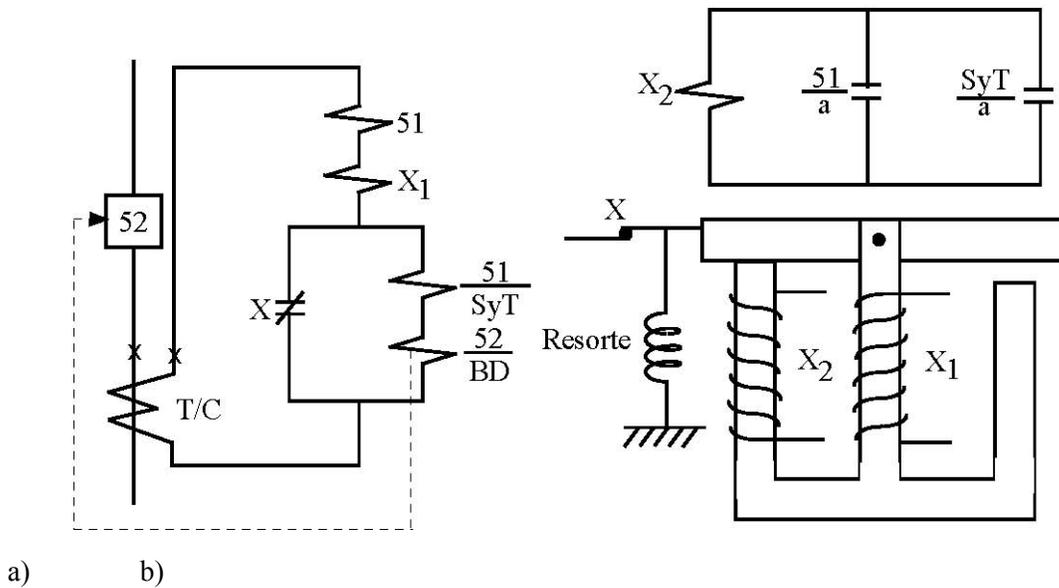


Figura 2.52.- a) Circuito de control tipo trip serie b) Diagrama esquemático del relé auxiliar X

Mediante el uso de energía obtenida antes o después del interruptor controlado: La Figura 2.53 muestra un circuito de control en que la energía se obtiene de transformadores de servicios auxiliares ubicados antes (aguas arriba) del interruptor controlado. El funcionamiento de este circuito es semejante a los ya estudiados. Se debe hacer notar que para el circuito de control se usa energía de C.A. rectificadas. El condensador de disparo C permite disponer siempre de la energía necesaria para la apertura, ya que para fallas cercana al punto en que se obtiene la energía, la tensión puede ser muy pequeña.

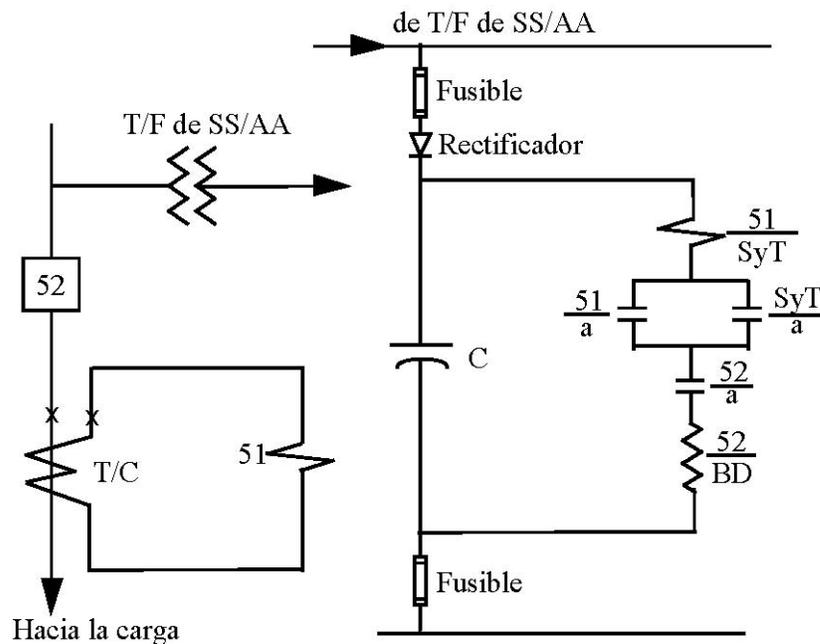


Figura 2.53.- Control de un interruptor de poder usando energía en C. A.

Otros esquemas utilizados

La Figura 2.54 muestra dos esquemas que usan energía proveniente de fuentes de corriente alterna para el control. Ella se puede obtener desde transformadores de corriente (Figura 2.54 a) o de transformadores de potencial (Figura 2.54 b). Los transformadores de potencial se conectan entre fases, para obtener un voltaje suficiente en el caso de fallas monofásicas.

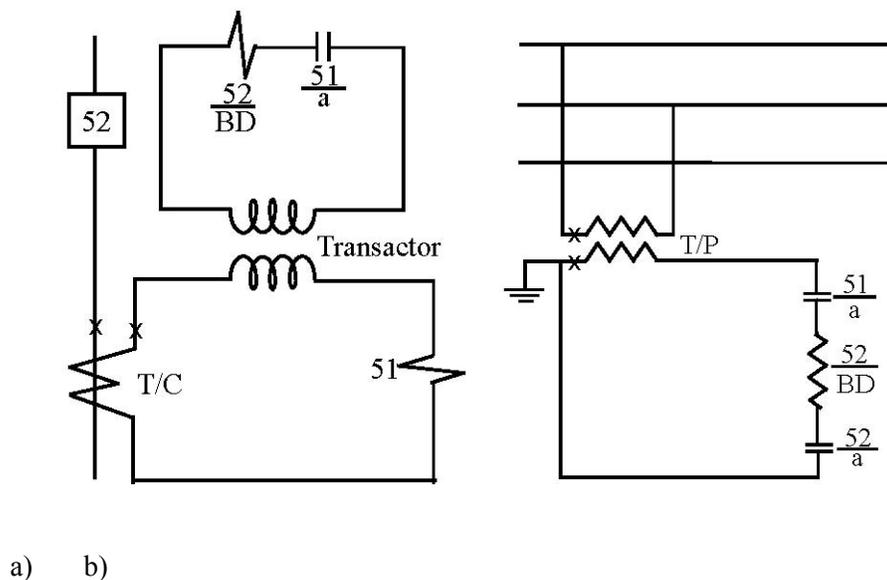


Figura 2.54.- Circuitos de control alimentados por C. A. proveniente de: a) Transformadores de corriente; b) Transformadores de Potencial

2.3.3. Reconexión automática de interruptores

Considerando que estadísticamente se ha demostrado que la gran mayoría de las fallas son de tipo transitorio, especialmente cuando se trata de líneas aéreas y que es conveniente reducir lo mas posible la duración de las interrupciones del servicio, se ha previsto efectuar reconexiones operando automáticamente los interruptores, cuando su apertura obedece a una falla. Es decir, cuando se abren por operación de las protecciones. En ningún caso por apertura manual. El equipo necesario para esta operación, es un conjunto de relés, generalmente temporizados, que forman parte del circuito de control del interruptor.

Debe tenerse presente que no siempre las reconexiones son posibles, especialmente entre distintas secciones de un sistema interconectado donde pueda perderse el sincronismo entre las partes. También cabe mencionar que se utiliza la reconexión monopolar en sistema de gran potencia y elevada tensión. Para lograrlo se requiere contar con interruptores especialmente diseñados que puedan abrir o cerrar cada polo en forma independiente. La reconexión automática se usa especialmente en líneas de transmisión radiales para aumentar la continuidad de servicio. El tiempo de reconexión del interruptor debe especificarse de acuerdo a las características de operación del sistema eléctrico. Por ejemplo en sistemas de distribución urbana la reconexión puede ser lenta, no así en sistemas industriales o en líneas de transmisión. En sistemas de transmisión, cuando es posible hacerlo, los tiempos de reconexión deben ser muy rápidos de manera de evitar pérdidas de sincronismos o problemas de estabilidad. También al calcular el tiempo de reconexión se debe considerar la desionización del arco de manera de eliminar la posibilidad de reencendido. Este tiempo muerto depende del nivel de tensión y para sistemas sobre 115 kV es de alrededor de 8 ciclos. El diagrama de operación de un interruptor operado con reconexión automática se muestra en la Figura 2.55.

Al usar un interruptor de potencia en un sistema con reconexión automática la capacidad de ruptura del disyuntor debe modificarse de acuerdo al ciclo de trabajo con que se utilizará el interruptor. El cálculo de la nueva capacidad de ruptura debe efectuarse tomando en cuenta los siguientes aspectos:

- El ciclo de trabajo no debe tener más de 5 aperturas.
- Toda operación dentro de un intervalo de 15 minutos se considera parte de un mismo ciclo de trabajo.
- El interruptor debe usarse en un sistema cuya corriente de cortocircuito no exceda el valor corregido de la corriente de interrupción para la tensión nominal y el ciclo de trabajo especificado.

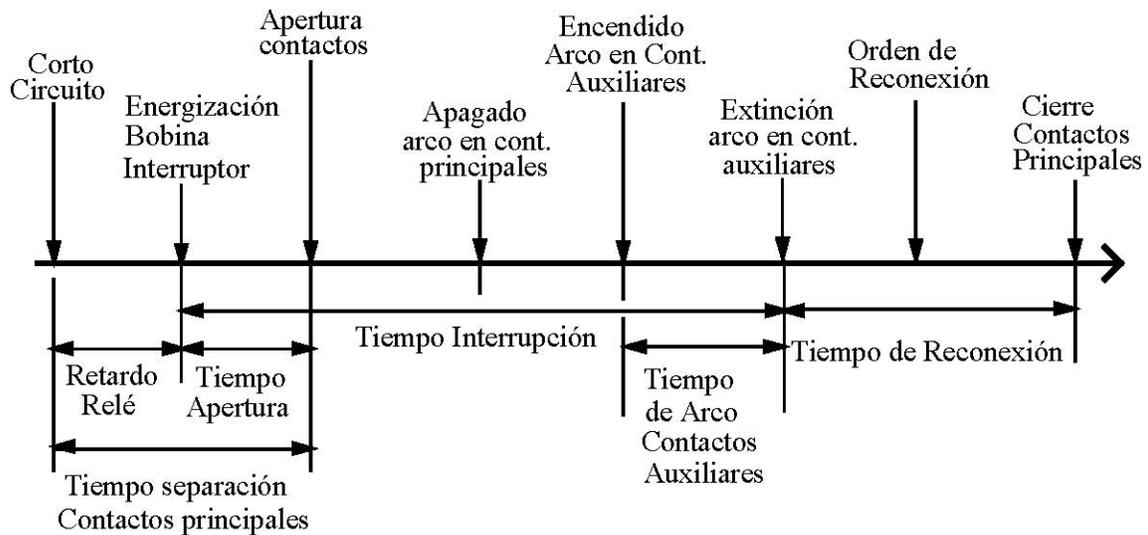


Figura 2.55.- Ciclo de trabajo de un Interruptor Automático trabajando en reconexión automática

Los interruptores especialmente diseñados para operar con reconexión automática se llaman “Restauradores” o “Reconectores”. El reconector es un aparato que al detectar una condición de sobrecorriente abre sus contactos, y una vez que ha transcurrido un tiempo determinado cierra sus contactos nuevamente, energizando el circuito protegido. Si la condición de falla sigue presente, el restaurador repite la secuencia cierre-apertura un número determinado de veces (por lo general son 4 como máximo). Después de la cuarta operación de apertura queda en posición de abierto definitivamente. Cuando un reconector detecta una situación de falla abre en un ciclo y medio. Esta rápida operación de apertura disminuye la probabilidad de daño a los equipos instalados en el circuito en falla. Uno o uno y medio segundos después cierra sus contactos, energizando nuevamente el circuito. Después de una, dos, y hasta tres operaciones rápidas el restaurador cambia a una operación de características retardada. Este cambio de característica a una más lenta permite coordinar este dispositivo con otros equipos de protección.

2.4. Relés

Los relés de protección para sistemas de potencia están constituidos por una o más unidades detectoras de falla o “Unidades de Medida”, cuya función es recibir la información del equipo primario y discriminar si existe o no una condición anormal. Para este efecto compara la magnitud eléctrica medida con otra llamada de referencia, que le ha sido proporcionada con anterioridad a través de sus elementos de “ajuste”. En el caso de detectar una condición anormal, emitirá la orden

correspondiente a través del resto de los elementos que componen el relé: Unidades auxiliares, contactos, resistencias, condensadores, alambrados, etc., a objeto de desconectar el sector o equipo comprometido, despejando la falla.

2.4.1. Tipos de relés según su función

Existe una gran variedad de aplicaciones, por lo cual existe una gran diversidad de tipos que desempeñan una función en particular. Desde este punto de vista se pueden clasificar en:

- **Relés de protección:** Detectan las anomalías y dan inicio o permiten la desconexión de un equipo o un grupo de equipos de poder. Ejemplo: Relés de sobrecorriente; relés direccionales; relés diferenciales; relés de distancia, etc.
- **Relés auxiliares:** Operan en respuesta a la energización de un circuito y asisten a otros relés o dispositivos en alguna función. Normalmente trabajan en dos condiciones: energizado o desenergizado (ON-OFF). Su operación generalmente es del tipo instantánea, aunque también existen relés temporizados. Ejemplo: Relés de sello y tarjeta, relés multiplicadores de contactos, etc.
- **Relés de regulación:** Operan cuando la magnitud que supervisan, se sale de márgenes aceptables predeterminados, dando instrucciones a través de otros dispositivos para que se restaure la magnitud en particular a sus límites usuales. Ejemplo: Reguladores automáticos de voltaje de unidades generadoras, sincronización automática de máquinas síncronas, etc.
- **Relés de verificación:** Su función es verificar una condición en particular, en relación a un cierto límite prescrito e iniciar acciones diferentes a la desconexión de equipos. Ejemplo: relés de bloqueo de sincronismo, relés de límite de carrera, etc.

2.4.2. Clasificación de los relés según el tiempo de operación

El tiempo de operación de un relé se mide entre el instante en que se hace presente la causa de su operación y el cambio de posición de sus contactos. El término “cambio de posición de sus contactos” se debe a que hay relés que al estar desenergizados tienen sus contactos cerrados y al operar los abren, como hay otros que tienen posiciones opuestas o bien disponen de ambos tipos de contactos. Esta es una manera general de expresarse, ya que el relé puede ser de tipo electrónico y su salida ser un rectificador controlado sin que ello signifique que vaya a abrir o cerrar contactos, sino más bien habilitar un circuito a su nueva forma de operación. Desde este punto de vista, los relés se pueden clasificar en:

- **De alta velocidad:** En que el tiempo de operación es inferior a $1/20$ seg. (2,5 ciclos considerando la frecuencia usual de 50 Hertz como base)
- **Lentos o de baja velocidad:** Operan en tiempos mayores de $1/20$ seg.

En la práctica se denominan relés instantáneos a los que operan en menos de 10 ciclos y de alta velocidad a los que operan en menos de dos ciclos. Al resto se les considera temporizados y entre ellos se distinguen los de tiempo definido y los que responden a una curva de tiempo versus la magnitud de medida.

2.4.3. Componentes y unidades de un Relé

Un relé desarrolla la función para la cual está diseñado, a través de ciertos elementos o unidades como las que se describen a continuación:

- **Elementos de ajuste:** Tienen como función la de poder dar diferentes niveles de operación y obtener características especiales de funcionamiento. Estos elementos son generalmente resistencias, reactancias, condensadores, bobinas con derivaciones o taps, etc.
- **Elementos auxiliares:** Son elementos auxiliares internos del relé que se usan para adecuar las señales externas de modo de adaptarlas a la unidad de medida del relé. Por ejemplo, transformadores de corriente auxiliares, shunt para transformar una señal de corriente en voltaje.
- **Unidad de medida:** Esta unidad es la que recibe en último término, la información acerca del equipo protegido, en la forma de corrientes y voltajes reducidos y determinando por comparación la existencia de una condición anormal.
- **Elementos de señalización y sello:** Se agrupa aquí a los elementos internos del relé que permiten señalar su operación (generalmente en forma visual: caída de una tarjeta, encendido de una señal luminosa, etc.) y los que permiten aumentar la cantidad de potencia que puede manejar el relé. (Contactos auxiliares).

En general, un relé puede tener a lo menos el elemento de ajuste y la unidad de medida, agregándose los otros según sea la función que cumple dentro del esquema de protección o el tipo de relé.

2.4.4. Componentes de la unidad de medida

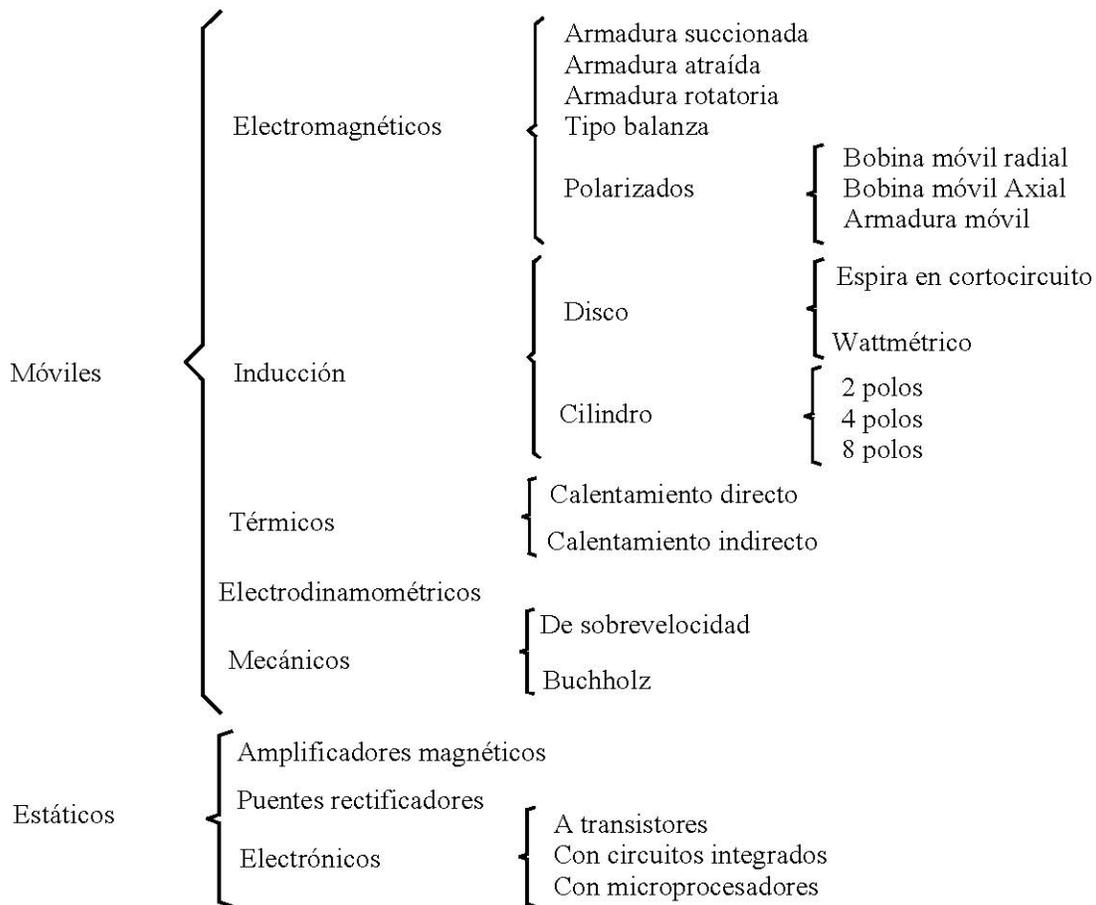
De todos los componentes anteriores, la unidad de medida es la más importante, de modo que podría considerarse al resto como auxiliares. Los elementos que la componen son los siguientes:

- **Elementos de excitación:** Por lo general son bobinas y sirven de intermediarios entre la información y el elemento comparador.
- **Elemento comparador:** Es el encargado de transformar las magnitudes informativas (corrientes y/o voltajes) en flujos, fuerzas electromotrices, fuerzas magnetomotrices, torques, etc., compararlas y entregar una respuesta, ya sea en forma de movimiento (relés móviles) o de señales (relés estáticos).
- **Elemento antagónico:** Es aquel cuya función permanente es la de oponerse a la acción o respuesta del elemento comparador, tratando de mantener en reposo a los elementos móviles o de dar retardo de tiempo a la operación de éstos. Otros objetivos son el evitar operaciones falsas por efectos extraños (Armónicas, transientes, golpes, interferencias, etc.), dando estabilidad a la operación y, por otra parte, permitiendo la vuelta del sistema móvil al estado de reposo, una vez cumplida su función.
- **Elemento de respuesta:** Es el que recoge la señal de salida del comparador y actúa de acuerdo con ella, provocando acciones en el circuito de control externo a través del cual opera el relé. En los relés móviles generalmente es un contacto, mientras que en los de estado sólido puede ser un tiristor, transistor, o bien un relé auxiliar instantáneo.

2.4.5. Clasificación de los relés según el principio de funcionamiento del elemento comparador

Existe una gran variedad de elementos comparadores, que pueden resumirse en el Cuadro 2.1.

Cuadro 2.1.- Clasificación general de relés



En la actualidad, todavía se prefieren los relés de tipo electromecánico, para ciertas aplicaciones. Ello se debe al alto grado de desarrollo que han alcanzando con el tiempo, a su alta confiabilidad y bajo costo, así como también a los criterios conservadores en lo que respecta a protecciones, en la mayoría de las empresas eléctricas. Sin embargo, cada vez más se imponen los relés de estado sólido, especialmente los del tipo con circuitos integrados y microprocesadores. La razón del éxito de estos últimos, es que a un costo un poco mayor, entregan muchas mas prestaciones por la versatilidad de la electrónica, incorporando incluso medidas de voltajes, corrientes, energía, como también guardando en memoria valores previos a la falla. Los problemas que presentaban los antiguos relés electrónicos, como su alta sensibilidad a las interferencias y a los armónicos, se han ido resolviendo así como su costo ha ido disminuyendo, de modo que son cada vez más aceptados por los proyectistas y por los usuarios.

2.4.6. Características generales de los relés

Analizaremos a continuación, en forma general, los diferentes tipos de relés según el principio de funcionamiento del elemento comparador.

2.4.6.1. Relés de Comparador móvil

a. Relés electromagnéticos

Funcionan bajo el principio de atracción magnética que ejerce sobre un núcleo móvil de material ferromagnético, el campo producido por la bobina de un electroimán

a.1. Característica de funcionamiento

Para estudiar su funcionamiento consideraremos el relé tipo bisagra (armadura atraída) de la Figura 2.56. El núcleo es de material magnético de alta permeabilidad ($\mu_{Fe} > \mu_0$) y existe un pequeño entrehierro ($x+d$). Por lo tanto, se puede despreciar el flujo de dispersión y considerar $H_{Fe} = 0$ en el núcleo (o $R_{Fe} = 0$) y de esta forma, la fuerza eléctrica queda:

$$F^e = -\frac{\mu_0 N^2 A}{2} \frac{i^2}{(x+d)^2} \quad (2.23)$$

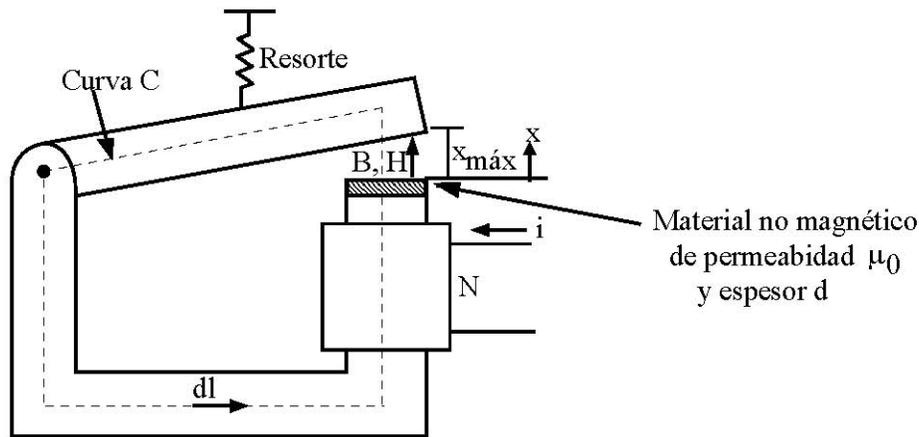


Figura 2.56.- Relé tipo armadura atraída

Es decir, la fuerza eléctrica es proporcional al cuadrado de la corriente (si no existe saturación) y actúa en sentido contrario a x (tiende a cerrar la parte móvil). Por lo tanto, la ecuación de la fuerza neta ejercida sobre el elemento móvil es:

$$F = F^e - F_R \quad (2.24)$$

Donde F_R es la fuerza de oposición ejercida por el resorte, la que para pequeños desplazamientos se puede suponer constante, es decir: $F_R = K_2$

Además F^e se puede considerar independiente de la longitud del entrehierro por lo que se puede escribir como:

$$F^e = K_1 i^2 \quad \text{con} \quad K_1 = -\frac{\mu_0 N^2 A}{2(x+d)^2} \quad (2.25)$$

Si el relé se alimenta con corriente continua, de valor I se tiene:

$$F^e = K_1 I^2 \quad (2.26)$$

Si se alimenta con una corriente alterna sinusoidal $i = \sqrt{2} I \sin \omega t$, donde I es el valor eficaz entonces, se aprecia que la fuerza eléctrica tiene 2 componentes (Ecuación 2.27):

$$F^e = K_1 (\sqrt{2} I \sin \omega t)^2 = 2 K_1 I^2 \left(\frac{1}{2} - \frac{1}{2} \cos 2\omega t \right) \quad (2.27)$$

- $K_1 I^2$: independiente del tiempo
- $K_1 I^2 \cos 2 \omega t$: pulsatoria, con doble frecuencia de la alterna aplicada y de valor medio cero. Esta no contribuye al torque medio pero se manifiesta como una vibración mecánica que produce ruido. Para superar este problema y hacer mas constante la fuerza, se coloca una espira en cortocircuito en el núcleo. Por lo tanto, en general se puede escribir:

$$F = K_1 I^2 - K_2 \quad (2.28)$$

La ecuación (2.28), permite graficar la fuerza F como función de la corriente I , tal como se muestra en la Figura 2.57, donde: $I_0 = \pm \sqrt{K_2/K_1}$; I_0 es la corriente mínima de operación (pick-up).

En la Figura 2.57 se puede observar que la fuerza es positiva independientemente del sentido de la corriente a partir de $I = I_0$. La zona indicada con líneas de segmentos no tiene sentido físico.

Razón de reposición: Se define como la razón entre la corriente mínima de operación (pick-up) y la corriente máxima de desoperación o reposición (drop-out). Para visualizar esto en este tipo de relé, se puede escribir de nuevo la ecuación (2.24), incluyendo (2.23), de la siguiente forma, con el fin de hacer notar el efecto que tiene el entrehierro en el valor de la fuerza neta:

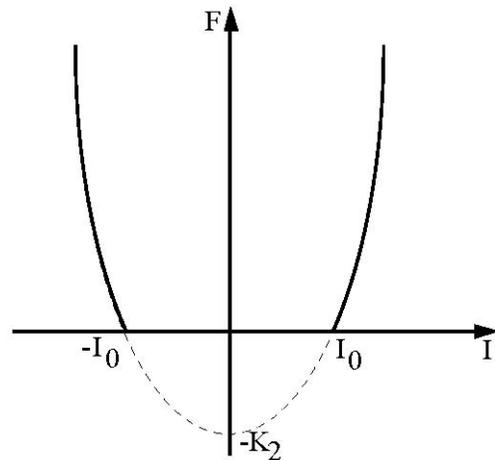


Figura 2.57.- Curva de operación de un relé de tipo electromagnético

$$F = K \frac{I^2}{(x + d)^2} - K_2 \quad (2.29)$$

La corriente mínima de operación I_0 se tiene cuando $F=0$ y $x = x_{\text{máx}}$, es decir de (2.29)

$$I_0 = (x_{\text{máx}} + d) \sqrt{K_2/K} \quad (2.30)$$

La corriente máxima para que el relé se desopere I_d se tiene en (2.29); cuando $F=0$ y $x=0$

$$I_d = d \sqrt{K_2/K} \quad (2.31)$$

Por lo tanto, la razón de reposición de este relé es:

$$RR = \frac{I_0}{I_d} = \frac{x_{\text{máx}} + d}{d} = \frac{x_{\text{máx}}}{d} + 1 \quad (2.32)$$

Como $x_{\text{máx}} \gg d$, la razón de reposición es normalmente $\gg 1$, lo que significa que una vez operado, la corriente debe disminuir bastante su valor para que el relé se desopere. Esto explica

también el uso del material no magnético en el entrehierro ya que en caso contrario, la razón de reposición tendería a infinito.

Por su sencillez y economía, los relés electromagnéticos son muy usados como relés auxiliares. Tienen gran rapidez de operación, pero en algunos casos se les puede dotar de algún retardo en la operación, utilizando medios tales como: mecanismos de relojería, amortiguadores hidráulicos o neumáticos, etc.

a.2. Tipos constructivos

Corresponden a este tipo varias unidades que son de uso común, tales como: Las de armadura atraída o Hinged Relay (Figura 2.56) que se emplean en los relés de las series MG y SG de la Westinghouse; las de armadura succionada o émbolo o Plunger Relay (Figura 2.58), presentes en las unidades instantáneas de los relés de sobre corriente General Electric, English Electric etc. y las de armadura rotatoria (Figura 2.59), utilizadas en relés de tipo REG de Brown Boveri.

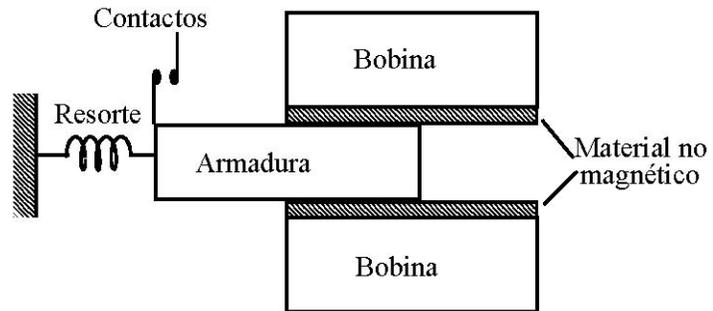


Figura 2.58.- Relé tipo armadura succionada

Existe un cuarto tipo de constructivo, de tipo balanza, el que se muestra en la Figura 2.60, el cual permite comparar dos magnitudes eléctricas. De esta forma, uno de los polos se alimenta de modo que produzca un torque resistente (polo de retención) y el otro, con una magnitud que tienda a producir operación (polo de operación). Estos últimos elementos son utilizados en las unidades direccionales de los relés de sobrecorriente de este tipo.

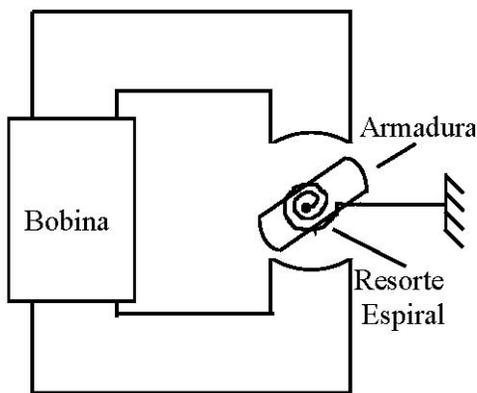


Figura 2.59. Relé tipo armadura rotatoria

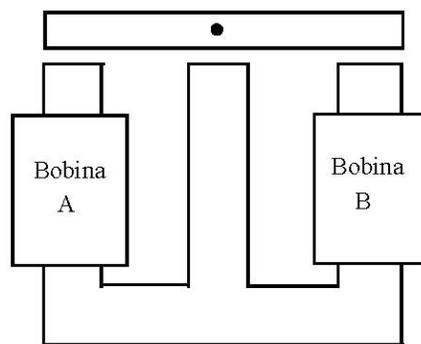


Figura 2.60.- Relé tipo balanza

Unidades de medida polarizadas: Son unidades electromagnéticas especiales, en las cuales el sentido del movimiento depende de la polaridad de la magnitud de excitación. Una parte del flujo necesario para producir el torque, es proporcionado por un imán

permanente de manera similar al de un galvanómetro D'Arsonval. Por el hecho de contar con un flujo adicional, estas unidades son de bajo consumo (0,1 a 0,5 miliwatt) y de alta sensibilidad. Por ello resultan apropiados para trabajar con fuentes de baja potencia como shunts o rectificadores. La Figura 2.61 muestra diferentes formas constructivas que estos dispositivos pueden tomar. Desde luego, estos elementos son apropiados para trabajar con corriente continua o rectificada y su torque de operación será proporcional a la corriente de excitación. Sin embargo, en algunos dispositivos, se emplean dos magnitudes eléctricas, es decir, se tienen bobinas tanto en la parte fija como en la parte móvil (Figura 2.61 d), por lo cual se designan como magnitudes de polarización y operación respectivamente a la corrientes (tensiones) aplicadas a ellas. En este caso, el torque de operación es proporcional al producto de las corrientes en las bobinas, es decir:

$$T_{op} = K I_{op} I_{pol} \quad (2.33)$$

que cuando las corrientes de operación y retención son iguales, es semejante a la ecuación (2.25) y por lo tanto, su característica de funcionamiento corresponde a la mostrada en la Figura 2.57.

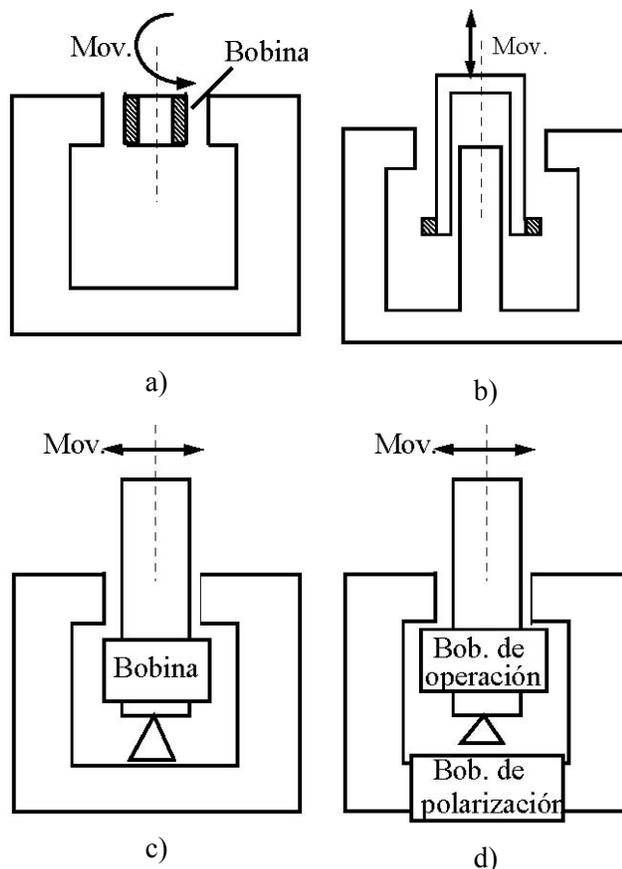


Figura 2.61.- Elementos comparadores polarizados: a) Bobina móvil radial, b) Bobina móvil axial; c) Armadura móvil y d) con dos magnitudes eléctricas

b. Relés de inducción

El funcionamiento de este tipo de relés consiste en hacer actuar dos flujos magnéticos variables en el tiempo, desfasados y con distinto punto de aplicación, sobre un elemento móvil que puede girar alrededor de un eje. Debido a esto, sólo son aplicables en Corriente Alterna.