

"EL FUNCIONAMIENTO DE INTERRUPTORES Y SUS
EFECTOS EN LAS LINEAS DE TRANSMISION".

Tesis previa a la obtención
del título de Ingeniero, en la especiali-
zación de Electricidad, de la Escuela Po-
litécnica Nacional.

Luis A. Arteaga M.

Quito, Diciembre de 1971.

Certifico que este trabajo ha
sido realizado por el Sr. Luis Arteaga.


Ing. Alfredo Mena Pachano

I N D I C E

Pag.

CAPITULO I .- INTRODUCCION

- 1.- Consideraciones generales.....2
- 2.- Características principales
de un interruptor de potencia.....7
- 3.- Clasificación.....12

CAPITULO II .- ARCO ELECTRICO

- 1.- El arco en los interruptores.....18
 - .- El interruptor sincrónico
y el interruptor real.....20
 - .- Proceso de desconexión.....22
- 2.- Características ~~estática~~ y dinámica
del arco.....33
 - .- Descarga eléctrica en gases a
alta temperatura.....33

a.- Conducción.....	37
b.⊙ Radiación.....	40
c.- Constante de tiempo.....	42
.- Característica estática del arco.....	44
.- Característica dinámica del arco.....	49
3.- Métodos de interrupción.....	52

CAPITULO III .- CORRIENTES.

1.- Diferentes corrientes que corta el interruptor.....	59
.- Interrupción de corrientes inductivas.....	59
.- Interrupción de corrientes capacitivas.....	63
.- Corrientes de cortocircuito.....	66
2.- Otras corrientes transitorias.....	72
.- La corriente de cierre.....	72
.- La corriente de postarco.....	74

CAPITULO IV .- VOLTAJES.

1.- El voltaje de recuperación.....	81
.- Determinación de la magnitud	

del voltaje fundamental de recuperación.....	83
.- Atenuación del voltaje de recuperación.....	85
2.- Distribución de voltajes (Varias etapas de interrupción).....	92
.- Conexión en serie de varios dispositivos de interconexión.....	92
.- Sobrevoltajes de interconexión.....	95
B.- Relaciones entre el voltaje y el cero de corriente.....	101
.- Paso del voltaje de arco al voltaje de recuperación.....	108

CAPITULO V .- PARTICULARIDADES PARA DIFERENTES TIPOS DE INTERRUPTORES.

1.- Interruptores en aceite.....	113
.- Interruptores con cámaras de explosión.....	114
.- Cámaras de explosión con chorros adicionales de aceite.....	116
2.- Interruptores de aire comprimido.....	118

3.- Interruptores con SF₆.....122
4.- Interruptores con campo magnético.....129

CAPITULO VI .- ESPECIFICACION DE INTERRUPTORES .

1.- Características generales.....134
2.- Características específicas.....136
3.- Ejemplo de aplicación.....139

CAPITULO VII .- RESUMEN Y CONCLUSIONES.

.....149

C A P I T U L O I .

I N T R O D U C C I O N .

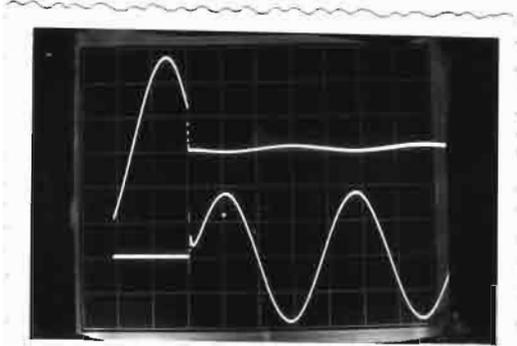
- 1.- Consideraciones generales.
- 2.- Características principales de un interruptor de potencia.
- 3.- Clasificación.

1.- CONSIDERACIONES GENERALES.

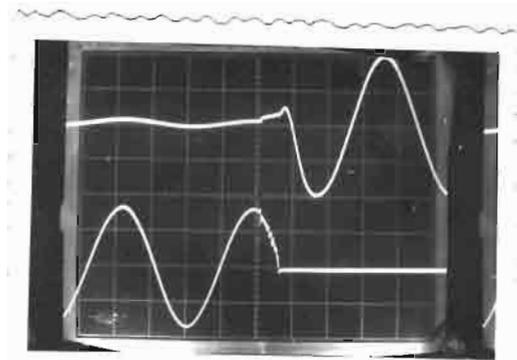
Todo circuito eléctrico, aún el más simple, consiste de tres elementos básicos: generadores, aparatos consumidores e interruptores.

La función específica del interruptor es efectuar el cambio de un estado a otro del circuito: del estado abierto al estado cerrado y viceversa. Este proceso, que se puede llamar la operación de maniobra, se caracteriza por valores de voltaje y de corriente que existen inmediatamente antes e inmediatamente después de la acción del interruptor. Estos valores son: en el instante que cierran los contactos, el voltaje de cierre, seguido por la corriente de cierre, y en el instante de la separación de los contactos, la corriente de apertura, seguida por el voltaje de recuperación.

Un disyuntor es un aparato que tiene una potencia que se encuentra fuera de los límites disponibles en la generalidad de los casos, por esto se han ideado muchas formas de pruebas indirectas para obtener una visión del funcionamiento de este aparato sin recurrir a su



Voltaje y corriente de cierre.



Voltaje de recuperación y corriente de apertura.

potencia nominal.

Los métodos de pruebas indirectas se han convertido en un instrumento importante en este estudio, y además al usarlas se puede obtener información profunda sobre el proceso físico asociado con la interrupción, es decir sobre la influencia de las diferentes cantidades eléctricas en este proceso.

Tanto en las pruebas de sustitución (diferentes corrientes a diferentes voltajes) como en las de compensación (compensando factores que se encuentran en valores inferiores), se adoptan las condiciones necesarias para obtener las mismas formas de curvas de arco que las observadas en las pruebas directas a la potencia nominal de los interruptores, realizadas en los pocos lugares

que disponen de esas potencias.

En el present caso, para obtener los osci-logramas de voltajes y corrientes, se ha acudido a un in-terruptor de contactos planos que se lo dispara en condi-ciones diferentes de funcionamiento según la clase de es-tudio que se esté realizando, es decir según el elemento que se encuentre en el circuito y según la característica que se analice (distorción de las ondas de corriente, vol-taje, etc).

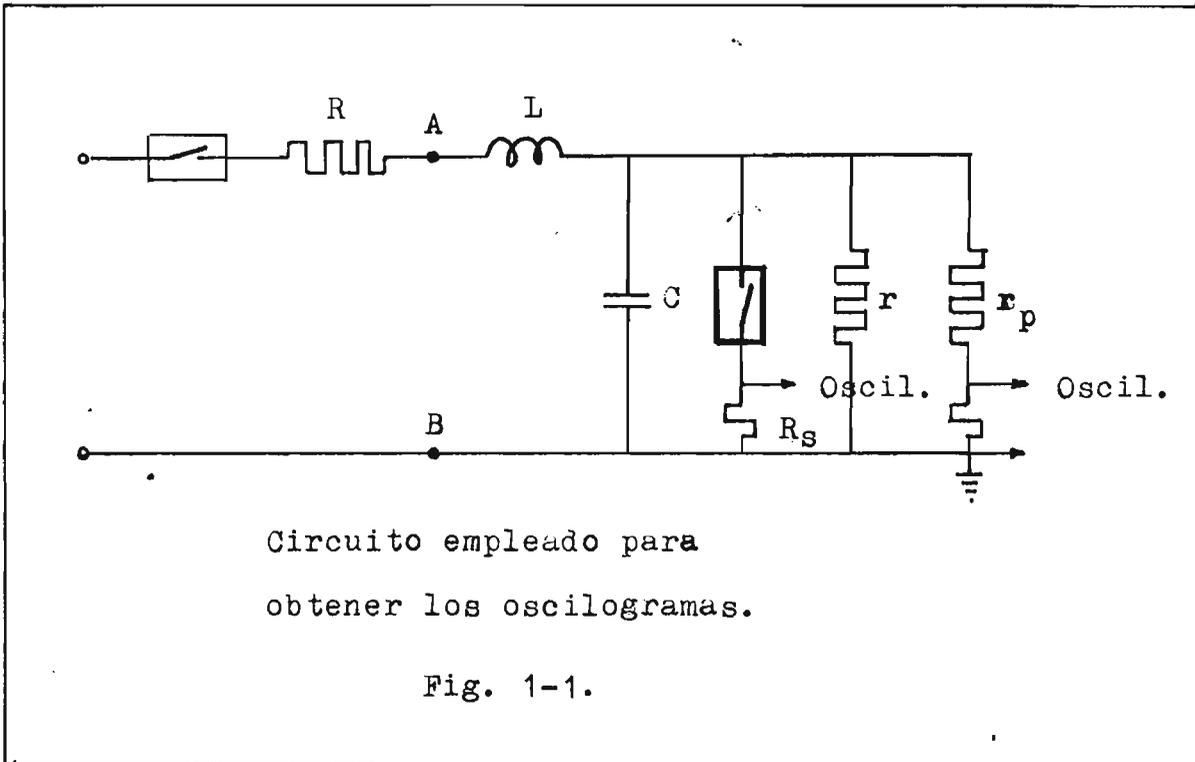
Las pruebas no tienen en ningún caso, simi-litud a las pruebas sobre la potencia de ruptura, ya que estas se efectuan para determinar la confiabilidad en la capacidad máxima, y son diferentes de todas las demás prue-bas que se realizan en los interruptores para hacer un es-tudio de las características de la interrupción en corrien-te alterna. En el circuito que se utiliza:

R ; Resistencia que regula la corriente pa-
ra el circuito A-B.

r_p : Divisor de tensión para las medidas de
voltaje en el osciloscopio.

r : Resistencias de diferentes valores en
paralelo con el interruptor, desde 13. hasta ∞ .

R_s : Resistencia en serie con el interrup-
tor para las medidas de corriente en el osciloscopio (1,5).



L : Inductancia de 20 mH.

Para el valor de la inductancia, se utilizó como referencia, los valores de la inductancia de los transformadores que se instalarán en la subestación de Pucará de la Central Pisayambo, de 40 MVA y 138 kV.

Al hacer la relación de voltajes y potencias tenemos:

$$I = \frac{40 \text{ MVA}}{\sqrt{3} \times 138 \text{ kV}} = 168 \text{ A.}$$

$$L = \frac{138.000}{\sqrt{3} \times 377 \times 168} = 1,258 \text{ H/f.}$$

$$1 = \frac{Z_c}{\frac{V_c^2}{P_c}} = \frac{Z_s}{\frac{V_s^2}{P_s}}$$

$$Z_c = Z_s \times \frac{0,150^2}{2,5} \times \frac{1}{\frac{138^2}{40.000}}$$

$$L_c = 1,258 \times 1,89 \text{ mH.}$$

$$L_c = 23,7 \text{ mH.}$$

2.- CARACTERISTICAS PRINCIPALES DE UN INTERRUPTOR DE POTENCIA.

Los componentes esenciales de un interruptor son los contactos y el elemento que apaga el arco.

Fundamentalmente hay un par de contactos, - uno móvil y otro estacionario, cuando el mecanismo está cerrado la conducción se efectúa mediante conducción metálica. Para interrumpir el circuit , el contacto móvil se retira del contacto estacionario y durante este proceso - se forma el arco.

La corriente alterna que tiene que ser interrumpida, pasa por el valor de cero 120 veces por segunda y durante este periodo pequeño, cuando la energía que está llegando al gas ($E = I.V$), es muy pequeña, se tiene la oportunidad para remover el arco, enfriar el gas y convertirlo en aislante.

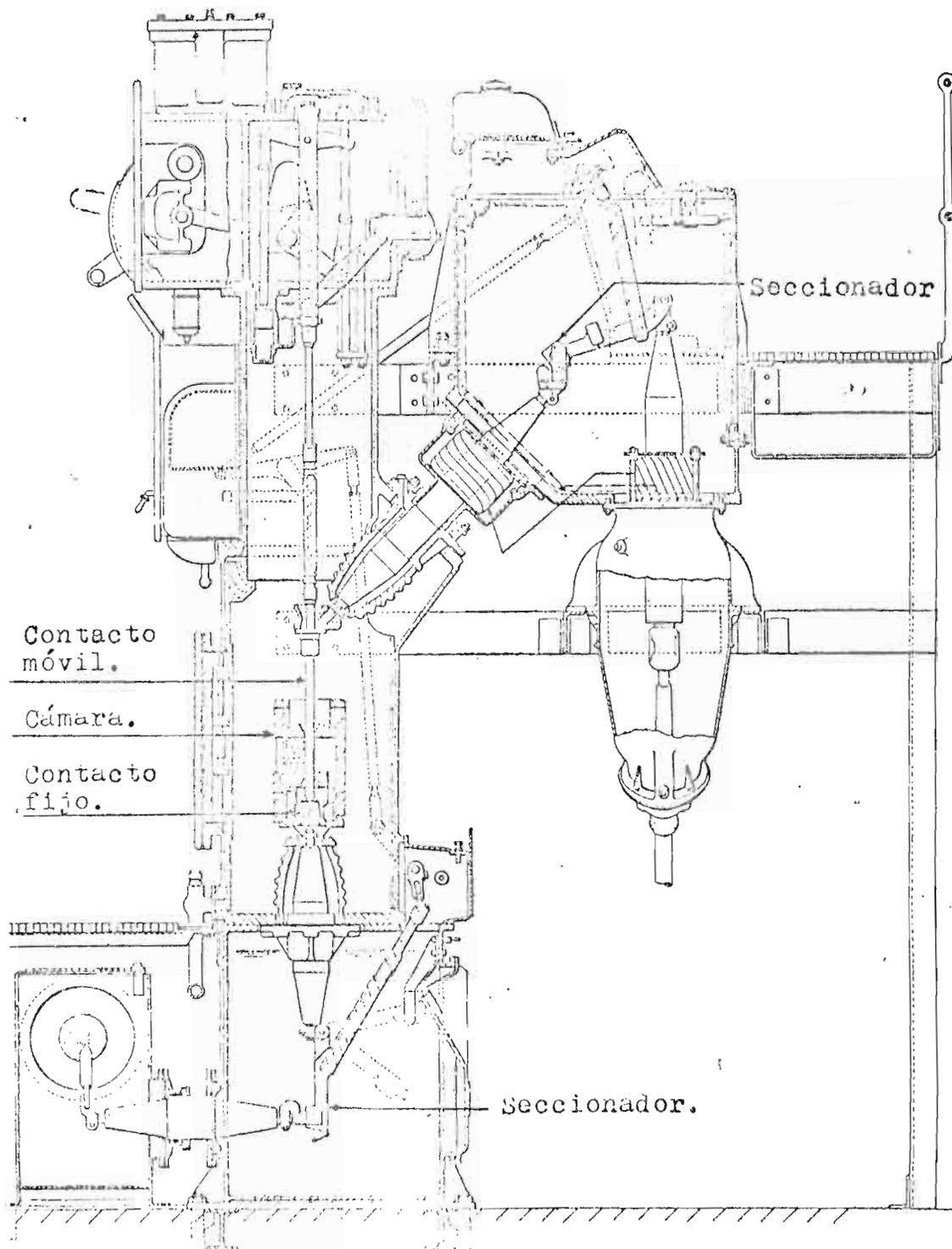
Bajo las condiciones normales, las fuerzas electromotrices en el bobinado secundario de los transfor

madores de corriente, son insuficientes para operar la bobina de disparo. Cuando ocurre una falla, la sobrecorriente que aparece, o la señal proveniente del sistema de protección, energiza la bobina de disparo y abre el interruptor.

Después que la bobina de disparo ha sido -- energizada, transcurre un corto tiempo durante el cual el brazo de disparo se mueve y libera el mecanismo de apertura. El movimiento resultante no produce la separación inmediata de los contactos, debido a que el un contacto penetra en el otro con bastante profundidad. El intervalo -- entre la energización de la bobina de disparo y el instante de la separación de los contactos da el tiempo de apertura; el que existe entre la separación de los contactos y la extinción del arco, da el tiempo de arco; la suma de los dos intervalos da el tiempo total de apertura, tiempo de duración de la corriente de falla. Los valores típicos de corriente y voltaje, se ilustran en la figura 1-3, teniendo en cuenta el recorrido de los contactos.

En un interruptor trifásico los tres arcos no se extinguen simultáneamente, ya que el arco se extingue en un instante en que la corriente pasa normalmente por cero, y las tres corrientes están apartadas 120° , en este caso, el tiempo de arco y el tiempo total de apertura, se refieren a la última fase que se extingue.

VISTA EN CORTE DE UN INTERRUPTOR DE ACEITE 66kV.



MOVIMIENTO DE LOS CONTACTOS
EN LA APERTURA.

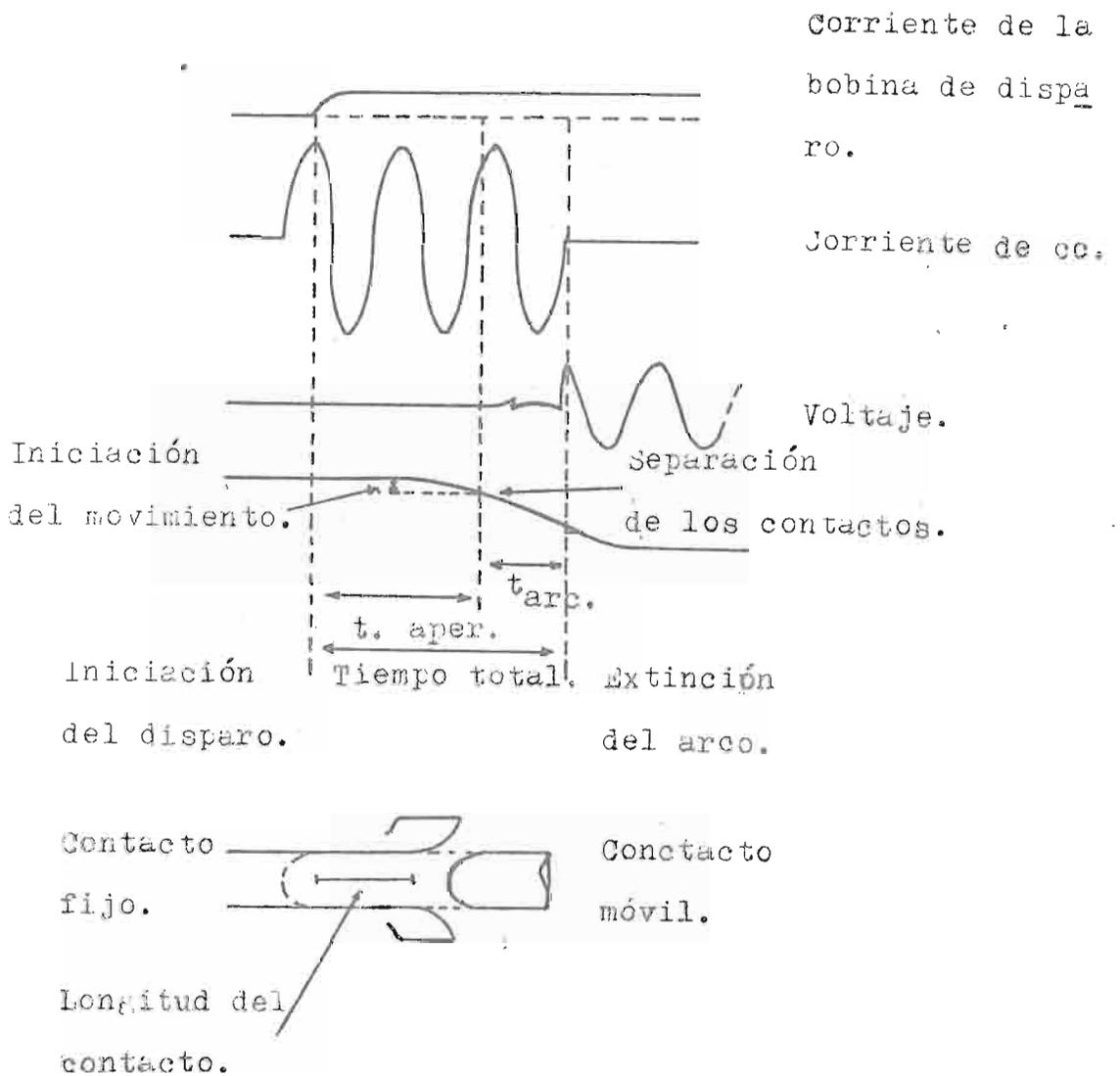


Fig. 1-3.

El tiempo de apertura depende del tipo de interruptor y el del arco del punto de la onda de corriente en el cual comienza la separación de los contactos, este tiempo, junto con la longitud final del arco, indican la cantidad de energía liberada en el interruptor.

El hecho de la penetración de los contactos es bastante importante en el proceso de cierre cuando las corrientes son bastante grandes, las partes móviles deben alcanzar una velocidad nominal de penetración que evite que los contactos se suelden durante la producción del arco, lo que puede suceder con los contactos que se cierran a baja velocidad.

El tiempo de cerrado es independiente de las características mecánicas del interruptor, excepto en el caso de que las condiciones del circuito produzcan descargas antes de que los contactos se encuentren.

El esfuerzo mecánico que soportan los interruptores tiene gran importancia cuando despejan corrientes de falla de grandes proporciones. Es necesario un factor de seguridad bastante alto en su construcción mecánica, ya que sea o no necesario que se abra el circuito, se hacen presentes grandes fuerzas electromagnéticas.

3.- CLASIFICACION.

Los interruptores se usan en muchos lugares de los sistemas de alto voltaje, y se deben adaptar y diseñar para las condiciones de servicio específicas. En seguida se enumeran los factores que determinan las características de un interruptor.

- 1.- Las características eléctricas del sistema, en un punto dado: Voltaje nominal, corriente nominal, capacidad nominal de interrupción.
- 2.- Algunas condiciones de operación: Velocidad de acción requerida para mantener la estabilidad del sistema, efecto del recierre del circuito, frecuencia necesaria de interrupciones y reconexiones, y dificultades provenientes del voltaje de recuperación.
- 3.- Medio en el cual se extingue el arco: aceite, gas comprimido, gases provenientes de la combustión, etc.
- 4.- Tipo de medio ambiente.
- 5.- Localización del interruptor: Solo, en pequeños grupos,

condiciones de supervisión, etc.

Los interruptores pueden clasificarse en:

1.- Interruptores de aceite:

Se puede tener interruptores en los cuales se produce el proceso simple de separación de los contactos en el aceite sin ningún dispositivo especial para controlar el arco, en estos, la distancia crítica de separación de los contactos no tiene un valor definido. Al producirse la interrupción se forma una burbuja de gas de un volumen unas 100 veces el volumen original de aceite, con aceite evaporado y pequeñas cantidades de carbón, acetileno, etileno y metano. Estos interruptores se usan mucho en sistemas de distribución.

Para sistemas de voltajes más altos se necesita un dispositivo para apagar el arco, ya que la energía que se desarrolla es mucho más grande. La separación de los contactos y el apagado del arco, tienen lugar en un sistio encerrado, o cámara, provista de salidas en sus costados. El calor del arco produce gases y la cámara restringe el movimiento del aceite dentro de ella. El espacio para la burbuja es menor y al salir violentamente de la cámara, provoca la extinción del arco. Así se aumenta mucho la capacidad de interrupción.

Muchos interruptores de aceite tienen dispositivos especiales que apagan el arco, basados en la cámara de presión en ciertas modificaciones, los principales tipos son:

Interruptores de impulso: Tiene un pistón operado independientemente que fuerza al aceite entre los contactos.

Interruptores de aceite "De-ion": Este interruptor mueve al arco por medio de fuerzas electromagnéticas hacia el aceite fresco, el arco arde inicialmente en una cámara que tiene una serie de placas que al ser magnetizadas por la misma corriente, establecen un campo magnético fuerte.

Interruptores con cámara con doble arco: Para obtener una velocidad alta de interrupción, sin tener que llegar a presiones peligrosas, en la cámara de presión se utiliza un contacto intermedio entre el contacto móvil y el contacto fijo; cuando los contactos se separan, el arco se forma primero entre el contacto fijo y el contacto auxiliar y luego entre el contacto auxiliar y el contacto móvil, la presión producida por el primer arco ayuda a apagar el segundo arco, que es el principal.

Interruptores con cámara de soplo axial: En estos interruptores el contacto móvil, es un tubo que tiene un orificio que se abre al aceite del tanque después de haber recorrido una cierta distancia; como este es el único orificio para la salida desde la cámara de presión, el arco se do

sopla y sale por ese orificio; el gas pasa directamente sobre el arco.

Interruptores de reducido volumen de aceite: En estos interruptores el aislamiento a tierra no se lo consigue con el aceite sino con porcelana. El aceite sirve unicamente para apagar el arco, por lo que tienen una forma tubular del tamaño necesario para dar cabida a la cámara de extinción.

2.- Interruptores en aire.

Los interruptores en aire para bajos voltajes y bajas potencias apagan el arco haciéndolo penetrar por una rejilla que al calentar las platinas entre las que pasa produce gases que soflan al arco.

Los interruptores en aire De-ion o interruptores magnéticos, usan una boina que se conecta en el momento de interrupción para soplar el arco hacia la rejilla desionizadora.

Para altas tensiones y grandes potencias se tienen los interruptores de sople de aire, estos interruptores apagan el arco soplando aire almacenado a presión.

El soplado del aire puede ser en forma axial al arco o en forma perpendicular, existen muchas formas de toberas, para dirigir el chorro de aire sobre el arco.

En esta clase de interruptores se tiene aparatos con uno o varios dispositivos para apagar el arco, pueden tener también resistencias en paralelo para disminuir la pendiente del voltaje que aparece a los bornes del aparato, y para distribuir correctamente el voltaje.

Bibliografía.

- .- G. Castelfranchi.- Instalaciones Eléctricas.- Editorial Gustavo Gili S.A.
- .- G. Zoppety.- Estaciones transformadoras y de distribución.- Ed. Gustavo Gili S. A.
- .- C. Sinclair.- Proyecto y construcción de bobinas .
Manuales tecnológicos Paraninfo.

C A P I T U L O I I .

A R C O E L E C T R I C O .

- 1.- El arco en los interruptores.
 - .- El interruptor sincrónico y el interruptor real.
 - .- Proceso de desconexión.
- 2.- Características estática y dinámica del arco.
 - .- Descarga eléctrica en gases a alta temperatura.
 - a.- Conducción.
 - b.- Radiación.
 - c.- Constante de tiempo.
 - .- Característica estática del arco.
 - .- Característica dinámica del arco.
- 3.- Métodos de interrupción.

1.- EL ARCO EN LOS INTERRUPTORES.

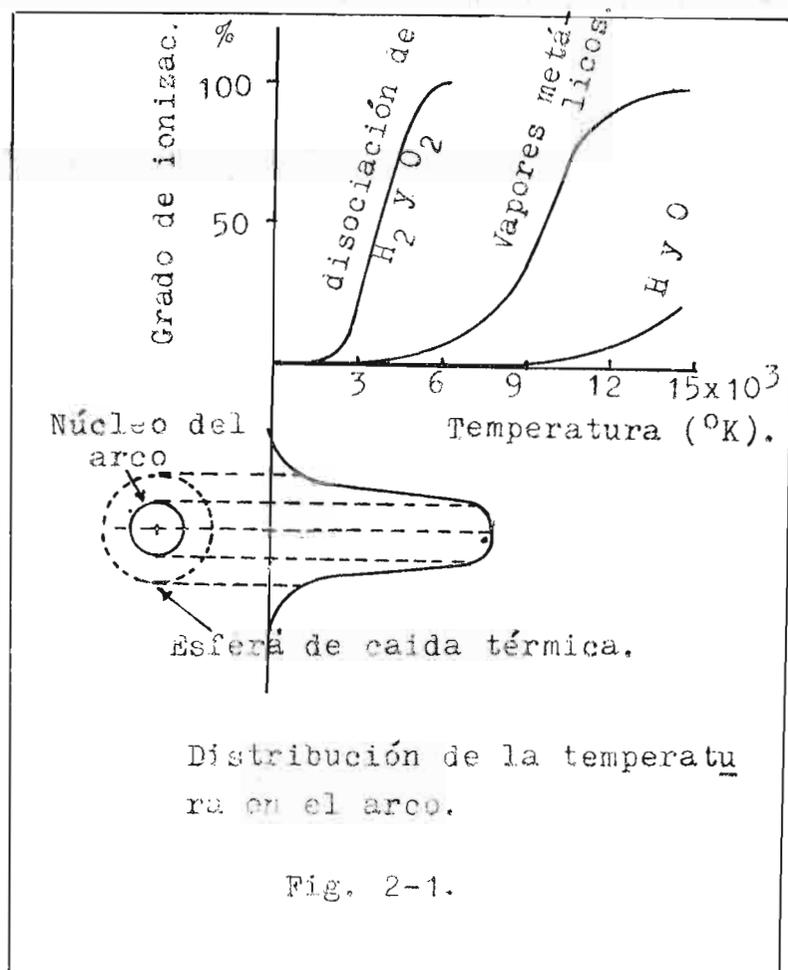
El trabajo de un interruptor depende del comportamiento que sigue mientras está ardiendo el arco, durante ese tiempo, las relaciones entre el voltaje y la corriente son muy diferentes a las que se pueden suponer para el interruptor ideal.

El arco tiene la apariencia de una columna brillante concentrada en una columna delgada. Su núcleo consiste de gas ionizado, que lleva la corriente con una densidad de valores altos.

El núcleo tiene temperaturas muy altas, y está rodeado por gases calientes. En los estratos cercanos al núcleo están átomos de hidrógeno y oxígeno, después se encuentran moléculas de H_2 y O_2 y finalmente moléculas de agua (vapor sobrecalentado), (bajo los $374^{\circ}C$ vapor saturado); en esta cubierta existe una marcada caída de temperatura.

En el instante de la separación de los con-

tactos, la temperatura se eleva tanto que el metal se vaporiza y se forma un puente de metal fundido y gases, que proporciona la conducción; al mismo tiempo, el voltaje que aparece a través de los contactos causa un gran campo eléctrico que ioniza los gases y arranca electrones de la superficie. Después de un instante los gases llenan el espacio entre contactos y la ionización toma parte en el proceso, desarrollándose el arco desde los puntos de chispa de los contactos.



El arco eléctrico por lo tanto, es una consecuencia necesaria del proceso relacionado con la separación de los contactos, y tiene una incidencia favorable, ya que de otra manera la energía del circuito tendría que descargarse por medio de un arco de contorno o por una perforación del aislamiento en alguna otra parte del circuito.

.- El interruptor sincrónico y el interruptor real.

Teóricamente se puede abrir una corriente alterna sin que ocurra ningún fenómeno extraordinario: si se deja que la corriente decrezca hasta cero, y en ese momento se separa los contactos rápidamente de tal manera que resistan el crecimiento del voltaje de recuperación, la desconexión sería un proceso puramente mecánico, sin arco: que es el funcionamiento de un interruptor ideal sincrónico.

En la práctica no se consigue ninguna de las condiciones del interruptor sincrónico, ya que el

interruptor real separa los contactos de una manera casual, a un valor de corriente no determinado; por medio del arco la conexión se prolonga hasta que la corriente decrezca a cero y entonces se empieza el proceso de desconexión del circuito. Desde este punto de vista el arco se comporta como un agente sincronizante.

La desconexión del circuito que en el interruptor sincrónico, depende de la velocidad, en el interruptor real se la alcanza por la transformación de la columna gaseosa, de conductora en aislante; y no se ha desarrollado ningún método para resolver directamente esta tarea.

Es decir, se usa el arco, para la solución de los dos principales problemas relacionados con la interrupción de corrientes alternas, con la tendencia a la continua reducción del voltaje del arco, hacia las características del interruptor sincrónico, donde la energía es cero.

.- Proceso de desconexión.

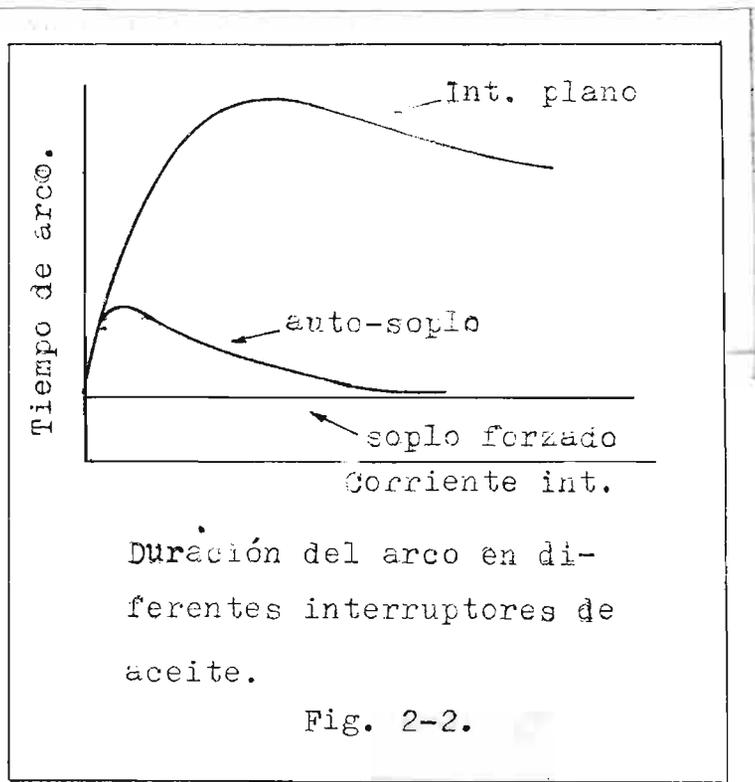
Cuando el arco está ardiendo, existe una columna gaseosa incandescente, al llegar el instante de corriente cero, cesa el suministro de energía al arco, pero la ionización no desaparece inmediatamente sino -- que se mantiene por algunos momentos, la columna de gases ionizados, que se define como una descarga no auto-sostenida, queda sometida a dos influencias, una la de la refrigeración del medio circundante, y la otra la del voltaje de recuperación, que va apareciendo entre los contactos y que puede llegar a causar una nueva descarga.

Para que el arco se extinga completamente, en este instante decisivo, es una condición necesaria -- que la rigidez dieléctrica del espacio entre contactos se incremente más rápidamente que el voltaje de recuperación, es decir que la curva de crecimiento de la resistencia a la perforación debe permanecer siempre sobre la curva de voltaje de recuperación. Alcanzar la rigidez dieléctrica necesaria en este espacio, es muy importante, al menos en el primer instante, cuando hay --

una ionización muy alta;

En una primera aproximación, se puede considerar la relación entre la energía entregada al paso de descarga y la energía sacada hacia el medio circundante, es decir la relación: $u_r \times i_{res} \approx P$, en la que - si el producto es mayor que P, la energía de descarga aumenta, aumentando la temperatura, siendo más probable una descarga de mayor sea el producto $u_r \times i_{res}$; si el producto es menor que P, la energía de arco y el arco se extingue completamente. El valor de signo igual -- existe -- es así de equilibrio que define la rigidez dieléctrica del espacio entre contactos.

PR-2

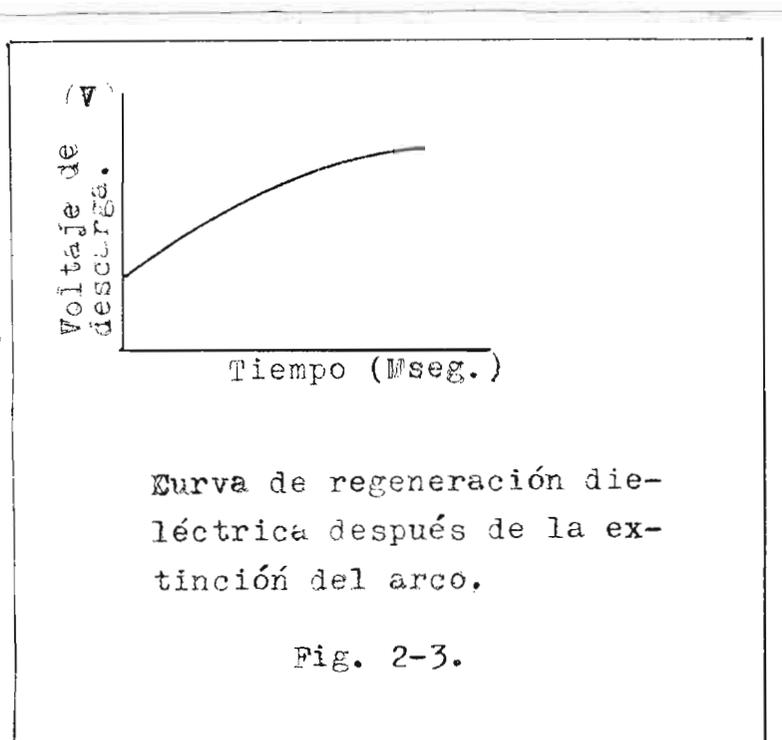


Después de la extinción del arco, el estado transitorio, puede convertirse en dos estados estables, se puede convertir o en un arco eléctrico, si la transmisión hacia el medio exterior, de la energía no es suficiente para extinguir el arco completamente, o en un gas no ionizado, si el efecto de la refrigeración es lo suficientemente elevado. Si el arco se extingue, el voltaje de reignición, tiene oscilaciones definidas claramente y la corriente residual, después de un número de oscilaciones, decrece a cero. Cuando ocurre la reignición del arco, la descarga transitoria se convierte en arco, la corriente se incrementa subitamente y el voltaje de reignición cae hasta asumir el voltaje del arco.

Se ha encontrado que la elevación de la rigidez dieléctrica tiene lugar en dos formas. Para un interruptor en aire "de-ion" se ha encontrado la curva de la figura 2-3, la curva comienza con un valor alto de voltaje y con un crecimiento exponencial grande hasta que después de algunos miles de microsegundos alcanza un valor estable determinado por el voltaje de perforación de la posición abierta.

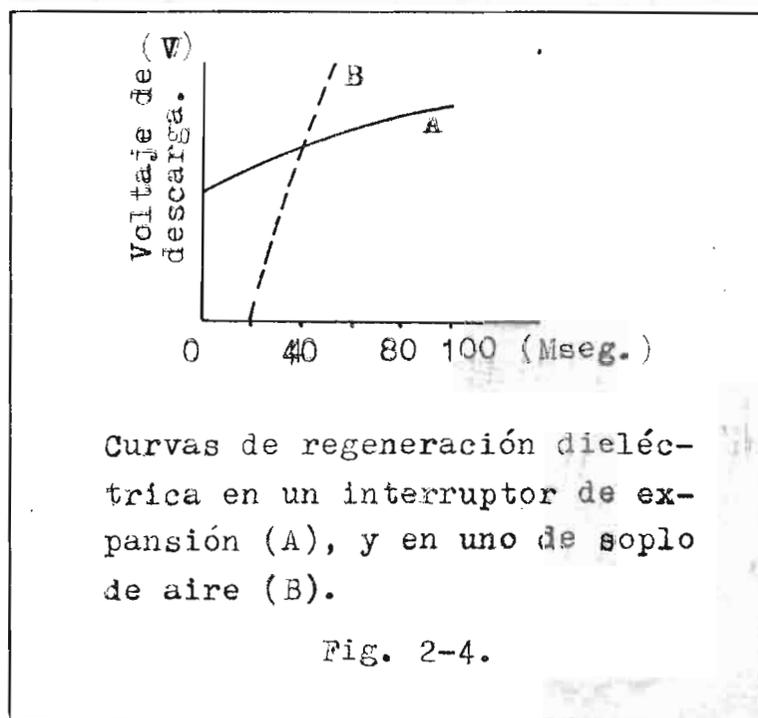
Para interruptores de expansión y de soplo de aire están las curvas A y B de la figura 2-4, la curva para el interruptor neumático se origina después de 20 Msec del cero de voltaje y se lleva rápidamente.

Otra curva, en la cual se han tenido en cuenta meticulosamente los valores más bajos y más altos de voltaje, se da en la figura 2-5: después de la extinción del arco, la rigidez dieléctrica tiene un valor bajo inicial, el cual se incrementa muy lentamente, después de un -- cierto tiempo (t), la curva se eleva abruptamente y luego se estabiliza en un valor final. De estas curvas obtenidas experimentalmente se puede sacar dos conclusiones para los dos casos extremos, entre los cuales se encuentran el resto de formas de interrupción que combinan ambas formas de regeneración dieléctrica.



001605

El primer caso concierne a un aparato de extinción en el cual el arco se refrigera por la presencia en sus proximidades, del medio extintor y no por un torrente de medio extintor, ejemplos de esta clase de aparatos son los interruptores en aceite, el interruptor en aire de ion, el interruptor en aceite con parrilla de desionización,



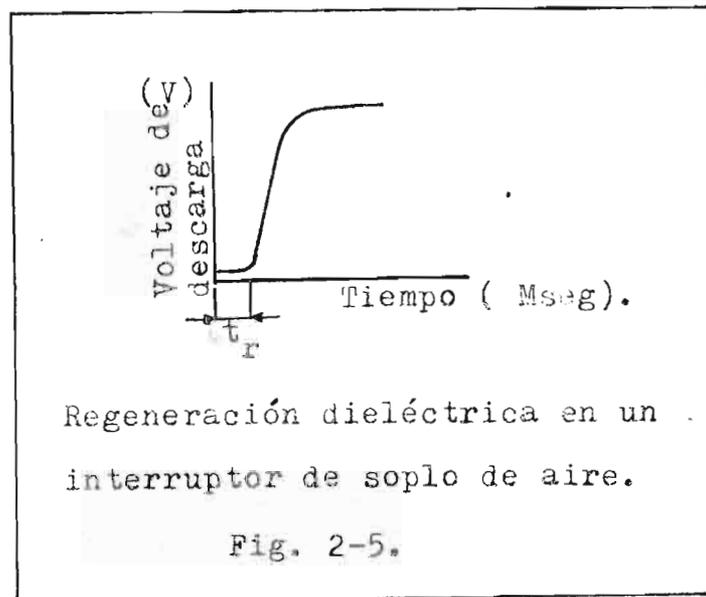
El movimiento relativo del arco y del medio de extinción es importante para la desionización, sin embargo este movimiento generalmente toma lugar en el período precedente al de desionización, es decir no

existe movimiento relativo entre la columna residual de descarga y el gas refrigerante. En este caso la propiedad conductiva del paso de descarga puede reducirse por tres procedimientos principales: recombinación dentro del paso de la descarga, difusión de los iones dentro del medio que los rodea, y conductividad térmica.

La conductividad térmica no afecta directamente a la reducción de la ionización, pero como hace decrecer la energía interna, facilita la combinación de electrones con partículas neutras para formar iones negativos, y esto da lugar a que se produzcan más recombinaciones en la columna de descarga, las que en ningún momento son de iones negativos (que se acaban de formar) con los iones positivos.

Durante la difusión, los iones negativos son los primeros en escapar ya que tienen mucha más velocidad, y van a situarse en las paredes interiores de la cubierta en la cual está el arco, en los interruptores de aceite en la pared interior de la cámara de interrupción, en los interruptores magnéticos en las placas calientes; esas paredes resultan cargadas negativamente, y atraen a los iones positivos que viajan lentamente y las recombinaciones tienen lugar en la superficie de las paredes que envuelven el medio extintor.

En conclusión se puede decir que la desionización del espacio entre contactos es un cambio radial de energía del paso ionizado a sus envolventes: Las moléculas con gran cantidad de energía cinética, migran desde el paso hacia el medio circundante y en dirección opuesta las moléculas refrigerantes, con menos energía.



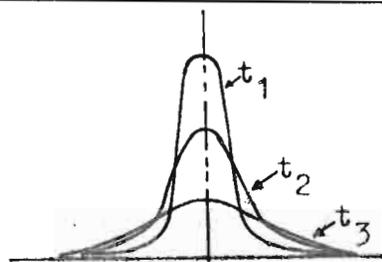
El primer cambio de la densidad de ionización está dado e el primer momento por la curva t_1 de la figura 2-6, después de un momento los iones gradualmente se dispersan de acuerdo a la curva t_2 y luego de acuerdo a la curva t_3 , al mismo tiempo la rigidez die-

l \acute{e} ctrica crece siguiendo la curva exponencial de la figura 2-4.

El segundo caso de desionizaci \acute{o} n corresponde a los aparatos de interrupci \acute{o} n en los cuales el factor principal es el movimiento del medio extinguidor (el efecto directo del medio, por s \acute{i} mismo, es de importancia secundaria). Los interruptores que trabajan en este principio son todos los que almacenan energ \acute{i} a para la interrupci \acute{o} n, como los de soplo de aire o los que dividen el arco en dos partes, uno de los cuales, el arco auxiliar, tiene que proveer la presi \acute{o} n, que mueve el medio de extinci \acute{o} n frente al arco. La caracter \acute{i} stica b \acute{a} sica en un interruptor de esta clase es la tobera de extinci \acute{o} n.

En el instante de corriente cero, en el espacio entre contactos queda un hilo de gas residual ionizado y alrededor de \acute{e} l fluye una columna concentrada de gas extinguidor que lo rodea por todos lados sacando las part \acute{i} culas ionizadas, despu \acute{e} s de un tiempo muy corto (t_r en la figura 2-5).

Debido al voltaje de recuperaci \acute{o} n, circula una peque \acute{n} a corriente residual, y tan pronto como se renueven todas las part \acute{i} culas ionizadas, la curva de rigidez diel \acute{e} ctrica adquiere un valor estable determinado por el voltaje de perforaci \acute{o} n en la posici \acute{o} n abierta.

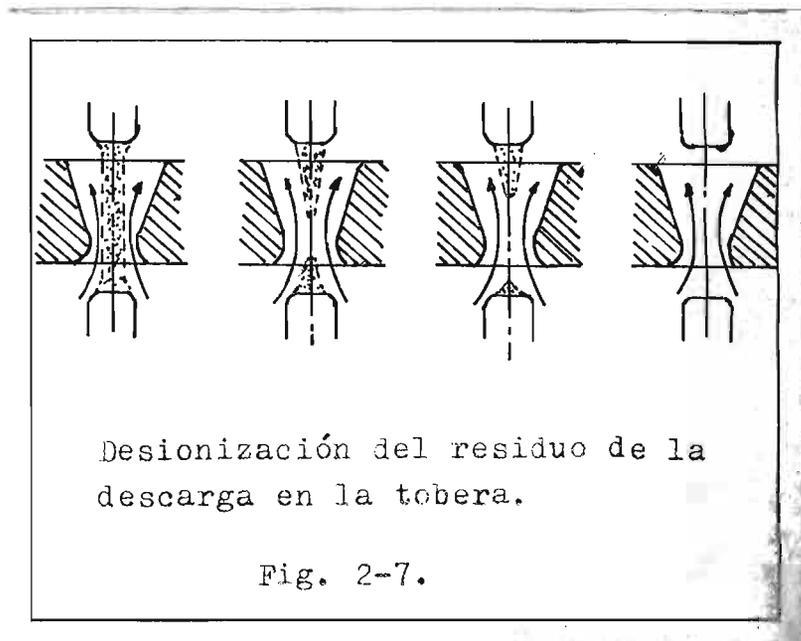


Reducción de la ionización debida al movimiento radial de los iones portadores de energía.

Fig. 2-6.

Comparando las dos maneras por las cuales se consigue el aumento de rigidez dieléctrica, en un mismo diagrama, asumiendo igual longitud de arco, es decir igual separación de los contactos, vemos que tanto la curva A, que denota el crecimiento de la rigidez dieléctrica solamente por el movimiento radial de las partículas como la curva B que denota el crecimiento que se produce mediante un chorro de medio extinguidor, comienzan en el mismo valor inicial "a" y alcanzan naturalmente, el mismo valor final. La curva B se eleva rápidamente después del tiempo necesario para la desintegración

del paso de descarga (t_p) y alcanza el valor final mucho más pronto que la curva A.

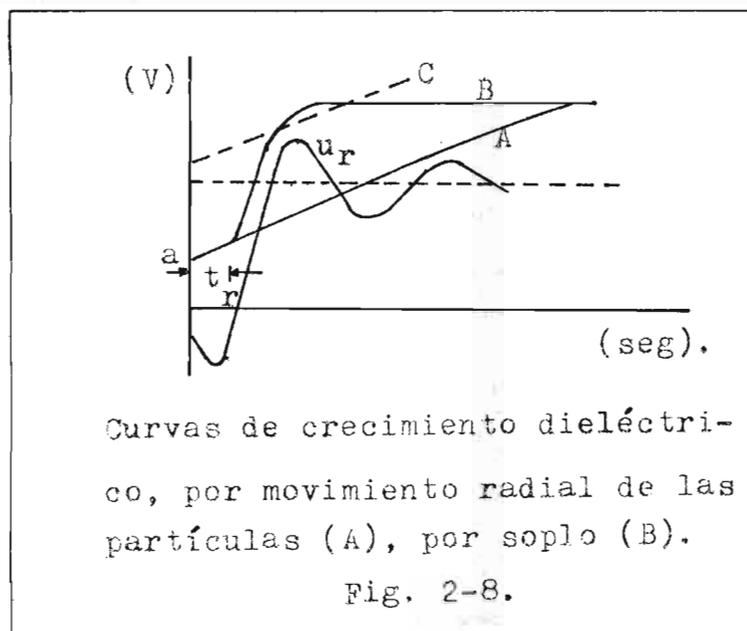


Si consideramos un circuito que tenga un voltaje de recuperación igual al de la curva u_p , en el que se usan dos interruptores, el uno trabajando de acuerdo a la curva A y el otro de acuerdo a la curva B, el primero no alcanzaría a interrumpir el circuito, mientras que el segundo sí podría hacerlo.

Si se querría emplear un aparato de los que usan el principio de desionización por movimiento radial de tendría que emplear uno que tenga el arco más grande, es decir que la curva de aumento de la rigidez

dieléctrica caiga más o menos en la curva C que comienzan do en un punto superior alcanza su valor máximo rápidamente, dejando un margen de seguridad aceptable, (el es pacio entre contactos resulta ser mucho mayor que en -- los dos interruptores iniciales).

Mientras más grande es el arco, el voltaje a través de él es mayor, y por lo tanto es mayor la ener gía generada en el aparato, es decir la corriente de -- apertura del aparato de extinción que sigue la curva C, es más peligrosa.



2.- CARACTERISTICA ESTATICA Y DINAMICA DEL ARCO.

.- Descarga eléctrica en gases a alta temperatura.

El efecto de la temperatura en la rigidez dieléctrica del gas es muy importante en la interrupción de circuitos.

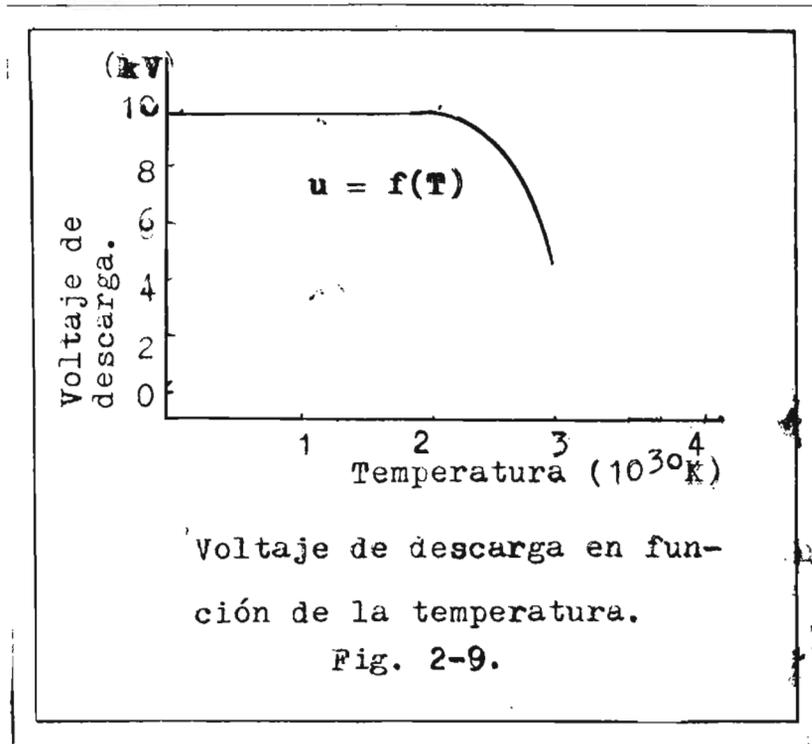
Cuando la temperatura es menor que los 1.000°C y la densidad del gas se mantiene constante y el campo eléctrico es uniforme, la temperatura no influye en el voltaje de reignición.

Para temperaturas más altas, pero bajo los 2.000°C el voltaje de descarga depende de la densidad y muy poco de la temperatura, después de los 2.000°C el voltaje de descarga cae gradualmente conforme aumenta la temperatura, fig. 2-9.

La reducción en el voltaje de descarga se debe a la modificación del campo eléctrico por las car-

según el tipo de material, el coeficiente de expansión térmica puede ser de 10 a 20 veces mayor que el coeficiente de expansión eléctrica.

En consecuencia, al aumentar la temperatura de la muestra, el coeficiente de expansión eléctrica puede ser menor que el coeficiente de expansión térmica, lo que provoca un aumento de la longitud de la muestra. Este efecto puede ser aprovechado para diseñar dispositivos que permitan la medición de la temperatura en líquidos y gases. En estos casos, la longitud de la muestra puede ser medida con gran precisión a través de un puente de impedancia eléctrica, la impedancia de la muestra depende de otros factores.



En general un arco puede dividirse en tres regiones; una de caída catódica, del orden de unos 10V; una región de gradiente de potencial más o menos uniforme, la columna positiva, que contiene el plasma; y una región de caída anódica, con una caída que va de cerca a 30V.

En la porción del plasma, los elementos transportadores de la corriente, en su mayoría son electrones, aunque existen colisiones entre las diferentes partículas que se encuentran presentes: electrones, iones, átomos excitados. La temperatura es muy elevada, encontrándose el gas en equilibrio térmico.

En el cátodo la corriente se concentra en pequeñas manchas en las que la densidad de la corriente es muy alta, hasta 1 millón A/cm²; con alta temperatura y un fuerte campo eléctrico, esta superficie, emite electrones.

Para el caso de arranque de electrones por el campo eléctrico, es de importancia también el bombardeo del cátodo por iones que introducen energía que compensa el enfriamiento por la emisión de electrones, este proceso se da en materiales como el cobre; la emisión termiónica se da en materiales como el carbón y el tungsteno.

En el plasma los electrones llevan el 99%

de la corriente y los electrones que salen del cátodo a lo más pueden llevar el 90% de la corriente, por lo que en la región entre el cátodo y la columna positiva se producen regiones en las cuales va cambiando el porcentaje de electrones e iones positivos conductores de la corriente.

En la región más cercana al cátodo existe un flujo de electrones y un flujo de iones positivos en sentido contrario, a mayor distancia del cátodo va disminuyendo la cantidad de iones positivos y aumentando la de electrones, es decir que en la región entre el cátodo y el plasma se producen los electrones necesarios, por colisiones, para llevar toda la corriente del arco.

En el ánodo existen también altas temperaturas y un campo eléctrico fuerte.

Al desarrollarse el arco, la energía que contiene debe repartirse hacia el ambiente que lo rodea. Los diferentes mecanismos que influyen son los de la conductividad térmica, los de la convección y los que ejercén los campos.

a. - Conducción.

La conducción térmica en un plasma a alta temperatura, se debe a la colisión elástica entre las partículas existentes en el gas, la ionización y la disociación.

Con la presencia de un gradiente de temperatura, el grado de disociación varía de un punto a otro y por lo tanto se forma un gradiente en la concentración de átomos e iones; esta gradiente se relaciona en forma directa con la gradiente de temperatura.

Si consideramos que n es la concentración de una determinada partícula, T es la temperatura y r - la posición radial, tenemos que:

$$dn/dr = (dn/dT)(dT/dr)$$

Debido a la gradiente dn/dT (que sigue -- las leyes de la termodinámica), se produce un flujo de los átomos disociados; si v es la velocidad y D_a es el coeficiente de difusión, tenemos que :

$$nv = D_a (dn/dr)$$

este flujo transporta la energía de la disociación, y si E_D es la energía de la disociación y K_D , es la con-

ductividad térmica equivalente, tenemos:

$$\begin{aligned}nvE_D &= D_a E_D dn/dt \\ &= K_D (dT/dr)\end{aligned}$$

como dn/dT , depende de la temperatura, va hacia un máximo cuando se va incrementando la temperatura, luego tiene una caída y se vuelve a incrementar. La conductividad térmica de un gas a alta temperatura sigue a esta variación, y va a través de picos y valles.

En cuanto a la ionización que contribuye también a la conducción térmica, presenta las mismas características de variación.

La influencia de la gradiente de temperatura, es bastante importante, teniendo en cuenta que la velocidad de difusión es distinta para cada clase de partículas.

Si consideramos por ejemplo que se ha disociado vapor de agua, las moléculas de hidrógeno se difunden más rápidamente, y por lo tanto en regiones de diferentes temperaturas es diferente la proporción entre hidrógeno y oxígeno, y la concentración absoluta también es diferente.

Cuando la gradiente de temperatura es lo suficientemente fuerte, a pesar de existir una presión grande y un campo eléctrico bajo, además de transmitir-

se la energía por colisiones entre las moléculas e iones también existen colisiones entre electrones de regiones de diferentes temperaturas, dando una transmisión de energía a las regiones de menor temperatura. Es decir -- dentro de la masa de un gas que se encuentra a muy alta temperatura, se están produciendo continuamente transferencias de energía de una región a otra, lo que hace -- que el gas no se encuentre en equilibrio termodinámico.

La conducción tiene prioridad cerca de la corriente cero, pero cerca de la corriente pico, es mucho más importante la convección, lo que produce turbu--lencia.

Para gases de baja temperatura, la transi~~ci~~ón desde la situación laminar a la condición de turbu--lencia está relacionada por el número de Reynolds:

$$R_e = \rho \cdot v \cdot d / \mu$$

donde ρ es la densidad, v es la velocidad del flujo, d es el diámetro del tubo, y μ es la viscosidad.

Ya que la dependencia de la viscosidad -- respecto a la temperatura no es lineal, la viscosidad del núcleo es mucho mayor que la de la periferia, al -- desarrollarse la turbulencia, esta toma lugar primero -- en la periferia, luego en el núcleo.

b.- Radiación.

Cuando la presión es baja, las radiaciones no intervienen en la conducción de la energía, pero para presiones grandes, el plasma es ópticamente denso, y las radiaciones intervienen en forma importante. Han sido una gran herramienta en el diagnóstico del plasma, y si no son importantes para interruptores que trabajan a presión baja o moderada, su importancia es elevada para los que trabajan a alta presión, como los interruptores neumáticos.

Se puede obtener una radiación continua cuando un átomo o un ión captura un electrón (importante en el caso de átomos electronegativos), o también -- cuando un electrón se desvía de su ruta; la diferencia de energía se emite en forma de radiación.

La razón de las intensidades de las líneas en el espectro de líneas, que se produce debido a las radiaciones de átomos excitados, se puede usar para medir la temperatura del arco, ya que las órbitas se encuentran a pasos discretos cuantificados, las radiaciones se presentan como una serie de líneas discretas.

El número de electrones en los estados -- excitados está gobernado por la distribución de Boltzmann,

si el número de átomos en un estado m de excitación es n_m y el número de átomos en estado de reposo es n_0 , la relación entre el número de átomos en ambos estados está dado por:

$$n_m/n_0 = A \cdot \exp\left(\frac{E_m - E_0}{kT}\right)$$

siendo k la constante de Boltzmann, A una constante y $(E_m - E_0)$ la diferencia de energía entre el estado m y el estado de reposo.

La intensidad de la línea cuando un átomo pasa de un estado m a un estado l es:

$$\begin{aligned} I_{m \rightarrow l} &= n_m A_l^m \\ &= A n_0 A_l^m \exp\left(\frac{E_m - E_0}{kT}\right) \end{aligned}$$

y la relación entre dos líneas que se deban a saltos desde un estado m y n a un estado l es:

$$I_{m \rightarrow l} / I_{n \rightarrow l} = (A/B) \cdot (A_l^m / A_l^n) \cdot \exp\left(\frac{E_m - E_n}{kT}\right)$$

Si conocemos el valor de la relación, despejando T , podemos encontrar la temperatura del arco, ya que los otros valores son constantes.

c.- Constante de tiempo.

Estudiando arcos en los cuales domine una de las formas de transferencia de energía, se puede comprender el comportamiento dinámico. Mayr describe este comportamiento con la ecuación:

$$dq/dt = EI - N_0$$

donde Q es la energía almacenada en el arco por unidad de longitud; N_0 es la razón de pérdidas de energía por unidad de longitud, I y E son la corriente y la gradiente de voltaje del arco.

Asumiendo que el diámetro de la columna permanece esencialmente constante, la conductividad -- eléctrica del gas está dada por:

$$\sigma = K \cdot \exp(q/q_0)$$

Siendo K y q_0 constantes, y q la energía específica contenida en el gas; la resistencia del gas es:

$$R = K \cdot \exp(-Q/Q_0)$$

Para la ecuación de la energía almacenada en el arco por unidad de longitud, se puede escribir -- las relaciones:

$$dQ/dt = EI - N_0$$

$$dQ/dt = - \frac{Q_0}{R} \cdot \frac{dR}{dt}$$

ya que $R = E/I$, entonces:

$$dQ/dt = Q_0(1/I \cdot dI/dt - 1/E \cdot dE/dt)$$

igualando las ecuaciones y haciendo $I = f(t)$, y $E = Rf(t)$

$$d(1/R)/dt = N_0/Q_0 \cdot 1/R = 1/Q_0 \cdot f^2(t)$$

de donde se puede definir una constante de tiempo para el arco:

$$\theta = Q_0/N_0$$

Teniendo en cuenta la relación de Prind, entre la conductividad y el flujo de calor :

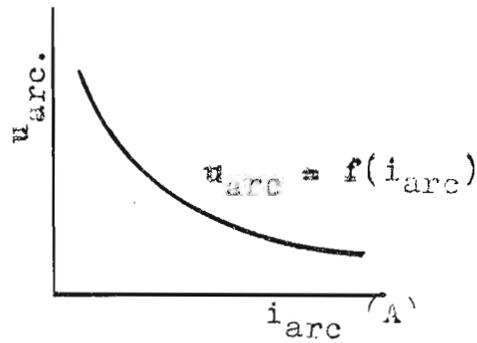
$$\theta = r_0^2/2,4^2k$$

donde r_0 es el radio del arco y k es la difusividad térmica, se puede relacionar la constante de tiempo de un arco con las propiedades del gas y la geometría del arco.

La constante de tiempo es una medida útil de la habilidad de un medio interruptor para recobrar su rigidez dieléctrica, después de la corriente cero.

Característica estática del arco.

La resistencia del arco tiene una característica bastante respecto a la corriente, y por esto la relación voltaje-corriente tiene la forma de la figura 2-10.



Característica estática del arco.

Fig. 2-10.

Para corrientes pequeñas,, podemos expresar la relación entre el voltaje y la corriente por la ecuación de Ayrton:

$$u_{\text{arc}} = A + Bd + \frac{C + Dd}{i_{\text{arc}}}$$

en la que "d" es la longitud del arco, y A, B, C, y D, son constantes; $(A + \frac{C}{i_{\text{arc}}})$ es igual a la suma de las caídas del cátodo y del ánodo, esto es, a la componente constante de voltaje y a la componente dependiente de la corriente, en el caso de arcos largos la última es mucho más pequeña que $(B + \frac{D}{i_{\text{arc}}})d$ que es la caída de voltaje dependiente de la longitud del arco, esto es, la caída de voltaje en el plasma; Para un arco largo se puede escribir:

$$u_{\text{arc}} = (B + \frac{D}{i_{\text{arc}}})d$$

Para un arco corto, las caídas en el cátodo y en el ánodo, constituyen la parte principal del voltaje del arco, y por lo tanto podemos escribir:

$$u_{\text{arc}} = A + \frac{C}{i_{\text{arc}}}$$

La energía que absorbe el arco es el producto del voltaje a los bornes por la corriente que lo

atraviesa, y esta energía debe ser sacada por el medio refrigerante, para un arco estable tenemos que esta energía es :

$$P_{\text{arc}} = i_{\text{arc}} \cdot u_{\text{arc}}$$

La energía del arco determina la característica del arco y por esto hay que definir exactamente el método de refrigeración que se use.

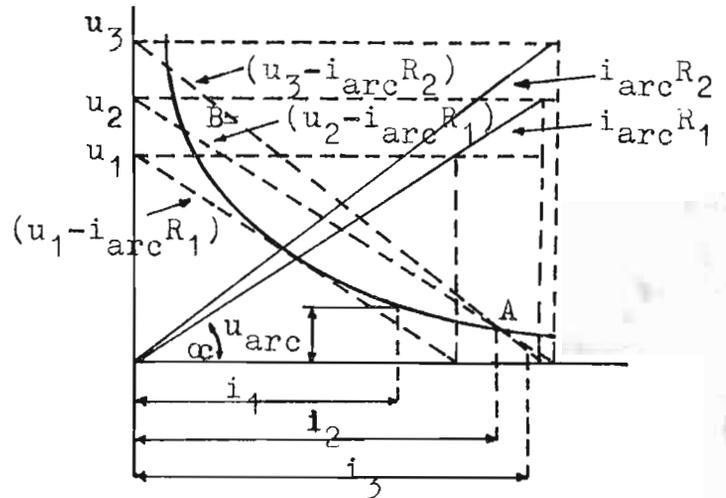
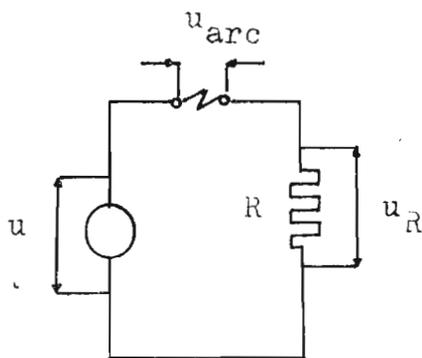
Podemos considerar un ejemplo para determinar la característica de un arco: El circuito consta de una fuente de corriente continua de voltaje U , el arco, y una resistencia. En la resistencia se produce la caída de voltaje $i_{\text{arc}} \cdot R$ que queda indicada en el diagrama por la línea recta inclinada en ángulo α , la tangente del cual es igual a la resistencia; restando del voltaje de la fuente la caída en la resistencia, tenemos el voltaje disponible para el arco.

Supongamos, que el voltaje de la fuente es $U = U_2$, y la resistencia es $R = R_1$, el exceso de voltaje de la fuente, está indicado por la línea recta $U_2 - i_{\text{arc}} R_1$. Sin embargo, el voltaje a través del arco, -- está determinado por la característica del arco: $u_{\text{arc}} = f(i)$ que depende de la forma de enfriamiento.

Si la corriente fuera $i = i_3$, la fuente

tendría un voltaje en exceso y la corriente tendría que incrementarse. Si la corriente fuera $i = i_3$, la fuente tendría un voltaje inferior y la corriente tendría que decrecer; solamente cuando la corriente es $i_{\text{arc}} = i_2$, en el punto A, el voltaje $U_2 - i_{\text{arc}} R$, coincide con el voltaje del arco debido a su propia característica y este puede arder en forma estable.

En el punto B, el arco es inestable, debido a que si la corriente decrece un poco, se produce una deficiencia de la fuente de voltaje y por lo tanto la corriente ^{de} crece en seguida, y por otra parte si la corriente se incrementa suavemente, se desarrolla un vol



Determinación del punto en el cual puede arder el arco.

Fig. 2-11.

taje en exceso y la corriente tiende a incrementarse bas
tante, hacia i_2 . Vemos que la corriente no tiene tenden
cía a retornar al punto B ni en el caso de decremen
to ni en el caso de incremento, por lo que en este punto el
arco es inestable.

La estabilidad del arco puede expresarse
por:

$$A = \frac{\frac{d(u - u_R)}{d i_{arc}}}{\frac{d u_{arc}}{d i_{arc}}} = \frac{d(u - u_R)}{d i_{arc}}$$

En el punto donde $u - u_R = u_{arc}$, el arco arde estable-
mente, mejor mientras mayor que 1 sea A. Si $A < 1$, el arco
no puede arder en ese punto, aunque $u - u_R = u_{arc}$.

Como el grado de estabilidad del arco se
incrementa para valores grandes de A, se puede aumentar
la estabilidad, elevando el voltaje de la fuente y al
mismo tiempo el valor de la resistencia serie del arco.

Quando la fuente tiene un voltaje $u = u_1$,
el arco no puede arder en el circuito dado, porque la
línea recta $u_1 - i_{arc} R_1$ y la de la característica del
arco no se intersectan.

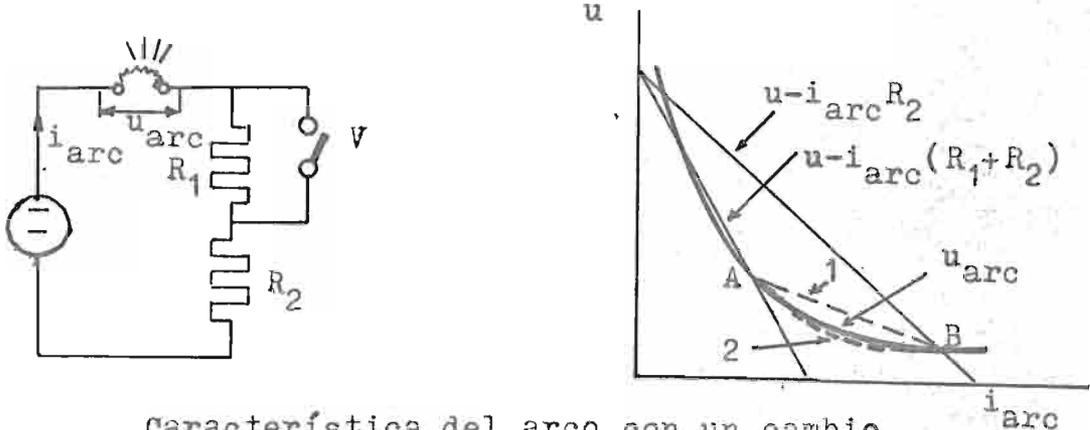
.- Característica dinámica del arco.

La ionización del arco, está determinada por la magnitud de la corriente y se traduce en la desviación de la característica estática u_{arc} . Cuando la corriente varía subitamente, se necesita un cierto tiempo para que el estado de ionización adopte las nuevas condiciones; por esto es que el grado de ionización corresponde siempre a la corriente que estaba fluyendo -- anteriormente.

Si se considera el diagrama en el cual las resistencias R_1 y R_2 limitan la corriente que fluye a través del arco, y el interruptor V se conecta en paralelo con la resistencia R_1 , vemos que el arco progresa de acuerdo a las características presentadas en el diagrama por las líneas delgadas.

El arco arde en la posición abierta de V , en el punto estable A , cuando se cierra el interruptor

la resistencia R_1 se cortocircuita, y de acuerdo a la curva, el arco aparecerá en el punto de intersección B.



Característica del arco con un cambio súbito de la corriente.

Fig. 2-12.

El estado transitorio que ocurre entre los puntos A y B, y la curva que sigue el arco, no coincide con la curva u_{arc} sino con la curva 1 que cae sobre la anterior. Cuando V se a re otra vez, la curva transitoria se resaca de B a A, siguiendo la curva 2 que está debajo de la característica u_{arc} .

Cuando la corriente crece, también crece la resistencia del paso de descarga, causando una gran caída de voltaje, que hace que esta característica dinámica del arco caiga sobre la característica estática.

Cuando la corriente decrece, el grado de ionización corresponde a una corriente más grande que la que está fluyendo en ese momento a través del arco, entonces la característica dinámica cae bajo la característica estática.

Con la corriente pico, la característica del arco de la corriente alterna se aproxima a la característica estática.

Cerca de la corriente cero, la ionización todavía no desaparece totalmente y por lo tanto la característica dinámica se sale de la estática, y la desviación es más rápida mientras mayor es la corriente.

3.- METODOS DE INTERRUPCION.

En los interruptores, con el fin de reducir la longitud y la duración del arco, se usan dispositivos especiales de extinción, y diferentes líquidos y gases.

Comparando la duración y longitud de un arco en el aire con uno en aceite vemos que un arco en el aire tarda en formarse de 1 a 2 segundos con un voltaje igual al 50% del voltaje del sistema y en el aceite 0,1 a 0,2 segundos, con el 25% del voltaje del sistema. La relación de energía que se convierte en calor es de 20:1, lo que significa que se reduce la energía que se tiene que extraer y por lo tanto la dificultad de la interrupción.

Si comparamos los valores para algunos interruptores, tenemos:

Medio de extinción	I	V	% en arco	Longitud	tiempo
Libre en aire	100	60kV	50%	18,00m	1-2 seg.
Libre en aceite	100	60kV	25%	1,80m	,15 seg.
Int. de expansión	100	60kV	12%	0,18m	.02 seg.
Int. neumático	100	60kV	2%	0,05m	.01 seg.

Se pueden considerar dos tipos principales de interrupción, de acuerdo al origen de la energía empleada para la extinción. El primer tipo, es el que usa la energía que proporciona la corriente a cortocircuito, la cual descompone el aceite, o materiales sólidos del interruptor, produciendo gases que ejercen presión sobre el arco.

El factor característico de este tipo de interrupción es la cantidad de energía utilizada, que depende de la magnitud de la corriente de apertura. Debido a esto vale la pena el estudio del proceso de extinción, respecto considerablemente en relación a la corriente de apertura, por esto razón cuando las corrientes de apertura, la extinción del arco es rápida y total.

Cuando las corrientes son bastante pequeñas, la extinción del arco también es rápida, ya que para un arco no muy intenso, el solo contacto con el medio extintor asegura una extinción normal.

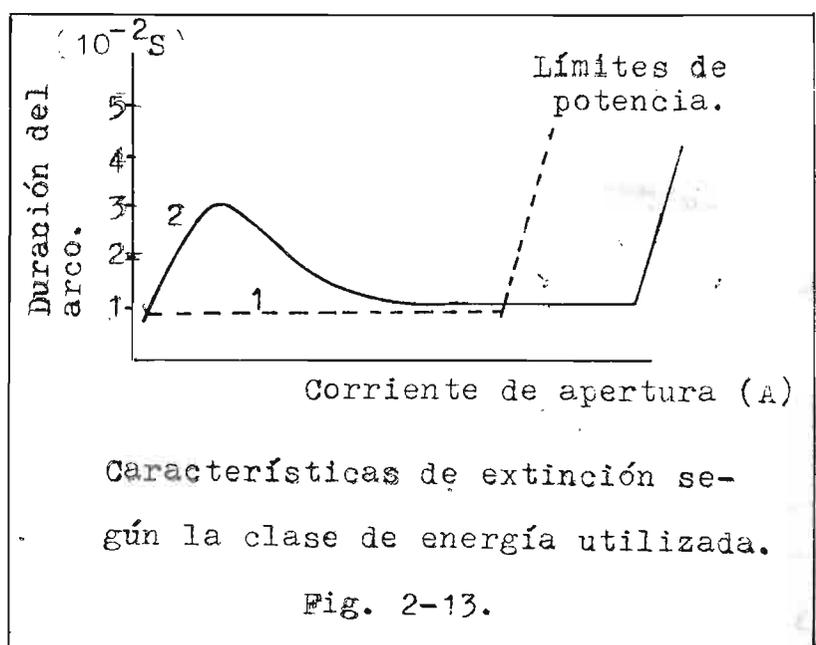
El proceso de extinción para grandes corriente , depende del efecto de expansión de los gases, y el proceso para pequeñas corrientes, depende del efecto de hidrogenación, es decir son factores diferentes - los que producen la extinción.

Para las corrientes que se encuentran entre estos valores, no es adecuado ninguno de los factores de extinción, siendo muy difícil la interrupción para estas corrientes. Las corrientes que tienen que considerarse en este caso, son corrientes termicamente críticas, el arco tiene una duración bastante larga, como se ve en la curva 2 de la figura 2-13.

El valor de la corriente crítica depende de cada tipo de interruptor. Cuando la corriente de apertura supera este valor crítico, la duración del arco se reduce, y queda asegurada la extinción del arco. La capacidad de estos interruptores sólo queda determinada por el esfuerzo que puedan soportar mecánicamente, es decir por la resistencia del tanque, al desgarramiento mecánico.

Se tiene el segundo tipo de interrupción

cuando la energía que se usa para la extinción del arco proviene de una fuente externa, que puede ser un tanque de aire comprimido, que al abrirse una válvula sopla -- aire o gas dentro del dispositivo de extinción, o también puede ser un resorte que al abrirse el seguro pone en movimiento un pistón que insufla aire o aceite.



En el caso de pequeñas corrientes, la extinción del arco es muy rápida, en algunos casos tan rápida que se producen sobrevoltajes indeseables.

La capacidad de estos interruptores para grandes corrientes queda limitada por la cantidad de energía que se pueda almacenar para interrumpir el arco, en la figura 2-13 la curva 1, da estas características de extinción.

Comparando los dos tipos, el primero presenta la desventaja de un tiempo muy largo de extinción para las corrientes en el rango crítico, pero tiene la ventaja de limitar su capacidad para grandes corrientes sólo a la resistencia mecánica a la rotura; en cuanto al segundo tipo, la desventaja que presenta es su funcionamiento no económico, por cuanto hasta para procesos de maniobra sin carga se gasta toda la energía prealmacenada, la ventaja que presenta es su confiabilidad para interrumpir cualquier corriente que se encuentre bajo su capacidad máxima.

Las buenas características de estos dos interruptores se han combinado en un interruptor de aceite en el cual la extinción se alcanza empleando los dos medios extintores anteriores, un arco auxiliar y un pistón fuerzan el aceite dentro del aparato de extinción, para las corrientes grandes la energía interna que pro-

porciona el arco auxiliar se añade a la energía pre-
almacenada, eliminándose así el rango crítico.

Bibliografía.

- .- H. Trencham .- Circuit Breaking.- Butherworths Publications. Londres.
- .- A. Roth.- Técnica de la Alta Tensión.
- .- J. Viqueira.- Redes Eléctricas, Segunda Parte. Méjico.
- .- Gaudencio Zoppety.- Estaciones Transformadoras y de Distribución. Ed. Gustavo Gili S. A.
- .- Koj U. A.- Electrical Breakdown of Insulating Liquids.
- .- Guilbert.- Teoría Funcionamiento y Cálculo de las Máquinas Eléctricas.
- .- Plasma and Circuit Interruptions- Proceeding IEEE march 1969.
- .- D. M. Benenson.- Dynamic Measurements of arc temperature distribution, radius, and current in a pulsed coaxial plasma.- Power Aparatus and Systems N°7 1970.
- .- Interruptor F Siemens de 220 kV, 15 GVA.- Revista Siemens N° 7 1964.

C A P I T U L O I I I .

C O R R I E N T E S .

- 1.- Diferentes corrientes que corta el interruptor.
 - .- Interrupción de corrientes inductivas.
 - .- Interrupción de corrientes capacitivas.
 - .- Corrientes de cortocircuito.
- 2.- Otras corrientes transitorias.
 - .- La corriente de cierre.
 - .- La corriente de post-arco.

1.- DIFERENTES CORRIENTES QUE CORTA EL INTERRUPTOR.

La corriente que fluye en el instante de separación de los contactos, antes de que sea distorcio nada por el interruptor, tiene una importancia decisiva en la evaluación de la capacidad del a arato, porque -- desde el punto de vista eléctrico comienza la operación de interrupción.

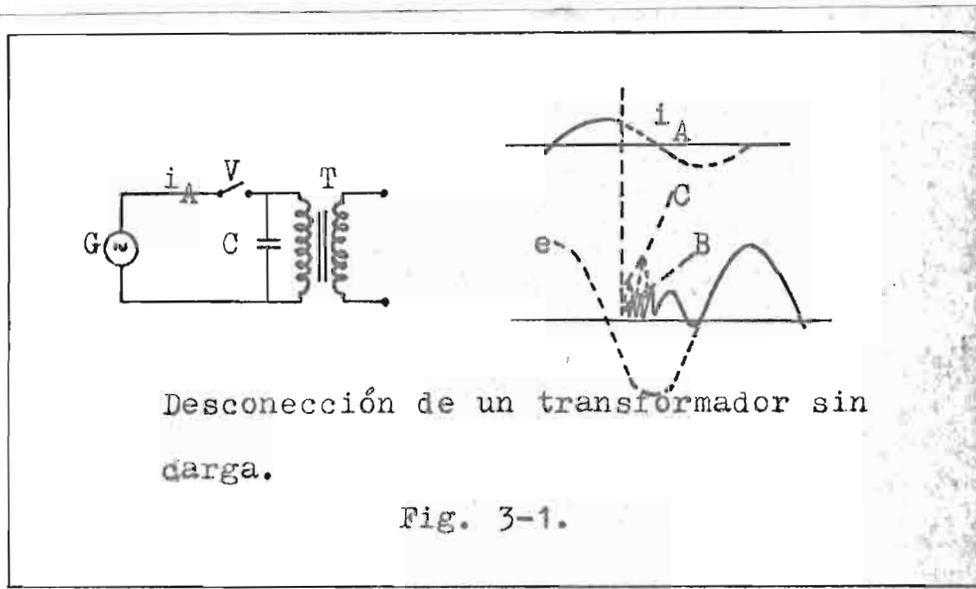
La corriente de ruptura es el valor eficaz de la componente alterna durante la semionda con la cual se inicia el arco entre los contactos, es el valor de I la amplitud total dividido para $2\sqrt{2}$.

.- Interrupción de corrientes inductivas pequeñas.

Este problema se presenta cuando se tiene que desconectar transformadores sin carga, y por lo tan to se trabaja con corrientes muy pequeñas, pero que tie

nen una naturaleza puramente inductiva.

Si consideramos el circuito de la figura, el transformador presenta una inductancia grande porque el secundario está abierto. La capacitancia es pequeña, y está formada por la suma de las capacitancias del transformador, de las líneas y del interruptor.



Quando se abre el interruptor puede pasar, que, si la desionización es intensa, obliga al arco a extinguirse antes de que la corriente pase por cero, produciéndose sobrevoltajes muy peligrosos.

Si consideramos que sucede esto, por ejem

plo en el instante A, la corriente que estaba fluyendo era i_A , y la energía magnética almacenada en el transformador:

$$E_T = \frac{1}{2} \cdot L \cdot i_A^2$$

comienza a fluir hacia la capacitancia C, a la frecuencia natural del circuito:

$$f_0 = \frac{1}{2 \cdot \sqrt{L \cdot C}}$$

El voltaje que aparece a través del condensador es:

$$u_C = U_C \cdot \text{sen } 2f_0 t$$

el valor U_C , se obtiene igualando las dos energías:

$$E_L = E_C$$

$$\frac{1}{2} C U_C^2 = \frac{1}{2} \cdot L i_A^2$$

$$U_C = i_A \sqrt{L/C}$$

Si consideramos el transformador de 138kV y 40MVA, $I = 221A$, la corriente de magnetización es 2 A, de donde, la reactancia de una fase, sin carga es:

$$X_c = \frac{138.000}{\sqrt{3} \cdot 2} = 39,9 \cdot 10^3 \text{ ohms.}$$

$$L_o = \frac{39,9 \cdot 10^3}{377} = 105,8 \text{ H}$$

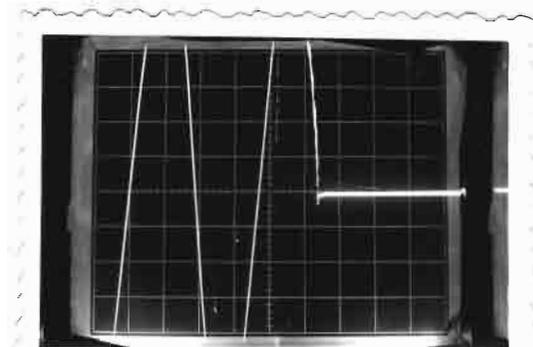
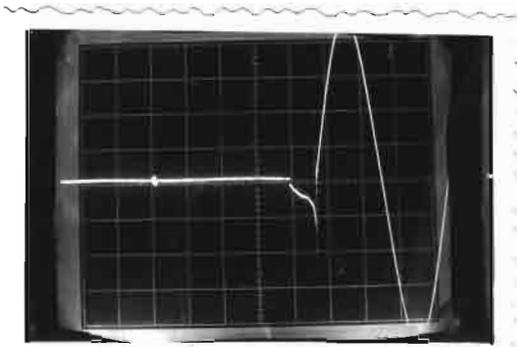
asumiendo que el arco se interrumpe a una corriente pico, esto es, de 2,83 A, la energía almacenada en L es:

$$E_L = \frac{1}{2} \cdot 105,8 \cdot 2,83^2$$

$$E_L = 422 \text{ VA}$$

la capacitancia a tierra de una fase del transformador, incluyendo alimentadores, es aproximadamente 5.000 pF, reemplazando estos valores, tenemos que:

$$U_o = i\sqrt{L/C} = 411 \text{ kV.}$$



Oscillograma de voltaje.

Oscillograma de corriente

Interrupción de una corriente inductiva pequeña.

Si la rigidez dieléctrica no aumenta muy rápido, se producen descargas que permiten que se libere la energía almacenada en la inductancia.

Por lo tanto un interruptor en el cual el dieléctrico se incrementa en forma lenta, protege al sistema de sobrevoltajes, ya que las descargas sucesivas absorben la energía magnética, sin dañar ellas mismas al interruptor.

Los interruptores a base de energía interna operan satisfactoriamente para estas condiciones, pero los interruptores neumáticos presentan problemas de sobrevoltajes.

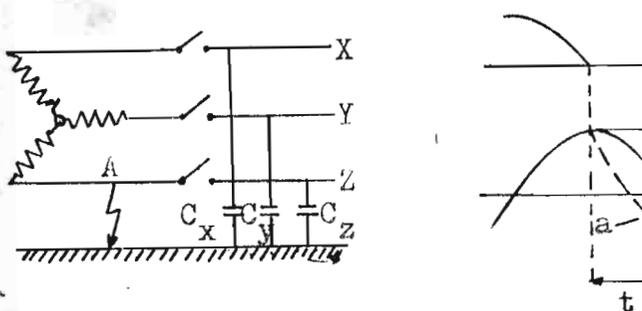
.- Interrupción de corrientes capacitivas.

Tenemos esta clase de interrupción cuando se desconectan baterías de condensadores, redes extensas de cables, o líneas largas que no estén cargadas.

La situación más peligrosa que se puede dar, es la desconexión del circuito en el instante en que ocurre una falla a tierra. Consideremos que un transformador proporciona corrientes i_X , i_Y , y i_Z , a líneas

cuyas capacitancias a tierra sean C_x , C_y , C_z , y que ocurra una falla a tierra en el punto A. La capacitancia C_z se descarga a tierra a través de la falla, y la fuente proporciona corriente sólo a las dos fases restantes.

Si se abre el interruptor el polo Z se desconecta sin carga, pero las condiciones de espeje para los polos X y Y son diferentes. Después del primer paso por cero se interrumpe la corriente i_x , la fase X de la línea queda desconectada de la fuente y cargada a un voltaje pico U_m , luego se desconecta el polo Y.



Interrupción de corrientes capacitivas pequeñas.

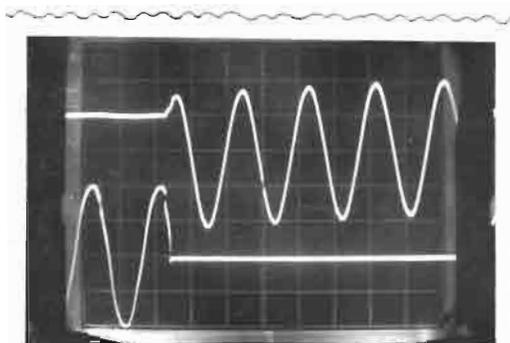
El voltaje que aparece entre los contactos del interruptor (X y Y), está dado por la diferencia entre el voltaje constante del sistema y el voltaje sinusoidal de la fuente, por esto el arco se extingue fácilmente al comienzo de la separación de los contactos.

Si la regeneración dieléctrica del espacio entre contactos crece de forma que se tenga la curva de puntos a, la interrupción es completa y luego de un medio ciclo el voltaje que aparece entre los contactos es $2U_m$.

Si el incremento de la rigidez dieléctrica es menor y el voltaje a través de los contactos coincide con el voltaje de perforación (línea b), ocurre una descarga y la capacitancia C_x se descarga a través del transformador.

Suponiendo que cuando el voltaje del generador está cerca de su valor máximo ocurre una descarga el voltaje alcanza un pico de $3U_{xz}$, si el arco se extingue al próximo cero de corriente la línea queda cargada con $3U_m$ y después de otra media onda el voltaje alcanza un valor de $5U_m$, si continúan las reinicciones, el voltaje continuaría elevándose sucesivamente. Esto no va a suceder, pero se deduce que las características que presenten los interruptores para este tipo de desconexión deben ser contrarias de las que tengan los interruptores que trabajan con corrientes inductivas.

Se ha encontrado sobrevoltajes con descargas sucesivas hasta de seis veces el voltaje nominal, en líneas aéreas, y de 3,5 en sistemas de cables.



Oscilograma de voltaje y corriente de interrupción capacitiva.

.- Corrientes de cortocircuito.

La corriente de cortocircuito es la que determina la capacidad del interruptor. Se necesita conocer de esta corriente, el valor de sus componentes en varios

instantes; los datos más importantes que se deben conocer son : el valor de la componente simétrica, el valor inicial de corriente, su valor total, y la corriente térmica equivalente.

Como la capacidad de los interruptores está graduada en grandes pasos no es necesario conocer los valores de corriente con toda exactitud, se puede utilizar métodos que permitan un cálculo rápido de la corriente de cortocircuito.

Si se conocen los valores de reactancia del sistema visto desde el punto de falla, pueden utilizarse tablas que dan los valores de corriente en pu de acuerdo al tiempo transcurrido desde la incidencia de la falla. Las tablas de Komprda reúnen en valores pu, la corriente permanente de cortocircuito (I_{cp}), la corriente inicial de cortocircuito (I_{ci}), la corriente inicial total de cortocircuito (I_c), y la corriente térmica equivalente.

Con las reactancias resultantes, las tablas tabulan las corrientes por unidad que se obtienen para diferentes tiempos, las que multiplicadas por la corriente nominal del alternador corregida para el voltaje nominal de la falla, dan las corrientes que circulan.

Los porcentajes de reacciones individuales

les de los elementos, se los corrige para la salida total de los alternadores, multiplicándolos por la relación entre la salida total y la salida de cada elemento; las reactancias que resultan se suman según las leyes de Kirchoff.

Consideremos un sistema con tres fallas, en el punto I, en el punto II, y en el punto III:

Los porcentajes de reactancias, corregidos para la salida del alternador son:

$$\text{Alter: } 12\% \quad T_1: 10 \frac{20}{10} = 20\% \quad T_2: 8 \frac{20}{2} = 80\%$$

El porcentaje de reactancia de las líneas de transmisión es la relación de la caída de voltaje al voltaje nominal, es decir, es la caída de voltaje debida a la corriente total de los alternadores, corregida para el voltaje de línea.

La corriente del alternador de 20MVA, corregida para 22 kV, es:

$$I_a = \frac{20.000}{22 \cdot \sqrt{3}} = 525 \text{ A.}$$

la reactancia total de la línea en ohmios:

$$X = 0,35 \cdot 10 = 3,5 \text{ ohms.}$$

el porcentaje de caída de voltaje es:

$$u = \frac{3,5 \cdot 525 \cdot 100}{22.000} = 14,8\%$$

Corriente permanente de cortocircuito I_{cp}

$u[\Sigma]$ t (s)	12	20	30	50	70	100	120	130	150	300	300	500	700	1000
0,01	9,12	5,67	3,75	2,26	1,620	1,134	0,946	0,875	0,757	0,568	0,379	0,228	0,163	0,114
0,05	8,05	5,18	3,56	2,20	1,545	1,116	0,932	0,863	0,747	0,562	0,376	0,226	0,162	0,113
0,1	7,10	4,78	3,37	2,12	1,514	1,093	0,916	0,848	0,737	0,555	0,372	0,224	0,160	0,112
0,2	5,90	4,21	3,08	2,00	1,376	1,059	0,891	0,825	0,719	0,545	0,366	0,221	0,158	0,111
0,5	4,34	3,37	2,59	1,79	1,239	0,989	0,849	0,781	0,654	0,522	0,353	0,215	0,151	0,109
1	3,14	2,68	2,19	1,60	1,112	0,907	0,797	0,743	0,654	0,505	0,343	0,210	0,151	0,107
5	2,10	2,00	1,77	1,30	1,127	0,977	0,771	0,707	0,628	0,485	0,336	0,208	0,149	0,106
10	1,63	1,52	1,38	1,16	0,927	0,789	0,689	0,661	0,594	0,470	0,329	0,207	0,149	0,106
10	1,61	1,48	1,32	1,10	0,906	0,761	0,661	0,641	0,578	0,461	0,325	0,205	0,149	0,106

Corriente inicial de cortocircuito I_{ci}

u (%) t (s)	12	20	30	50	70	100	120	130	150	300	300	500	700	1000
0,01	14,3	8,93	5,78	3,48	2,49	1,740	1,450	1,340	1,16	0,870	0,580	0,348	0,250	0,174
0,05	9,44	5,97	4,06	2,50	1,79	1,262	1,053	0,970	0,845	0,635	0,424	0,255	0,183	0,128
0,1	7,32	4,90	3,45	2,16	1,57	1,115	0,934	0,864	0,751	0,565	0,378	0,228	0,163	0,114

Corriente total inicial de cortocircuito I_{ct}

u (%)	12	20	30	50	70	100	120	130	150	300	300	500	700	1000
	23,9	14,48	9,70	5,84	4,17	4,92	2,436	2,250	1,95	1,463	0,975	0,586	0,420	0,293

Corriente térmica equivalente

u (%) t (s)	12	20	30	50	70	100	120	130	150	300	300	500	700	1000
0,5	6,40	4,40	3,16	2,05	1,51	1,083	0,908	0,845	0,733	0,552	0,372	0,226	0,162	0,114
1	5,22	3,75	2,80	1,88	1,40	1,024	0,864	0,805	0,702	0,533	0,360	0,219	0,157	0,111
2	4,10	3,11	2,42	1,69	1,30	0,964	0,821	0,765	0,670	0,516	0,351	0,214	0,154	0,109
5	2,91	2,37	1,93	1,45	1,15	0,883	0,761	0,716	0,635	0,495	0,340	0,210	0,151	0,106
10	2,36	1,98	1,66	1,30	1,06	0,832	0,725	0,685	0,610	0,479	0,337	0,208	0,140	0,106

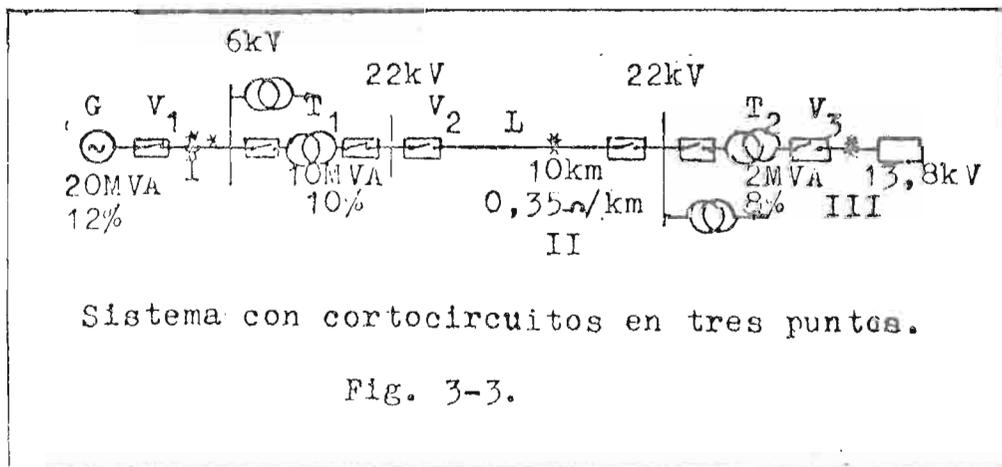


Fig. 3-3.

La reactancia total, para los puntos resulta.

$$\text{Punto I: } u = 12\%$$

$$\text{Punto II: } u = 12\% + 20\% + 7,4\% = 39,4\%$$

$$\text{Punto III: } u = 12\% + 20\% + 14,8\% + 80\% = 126,8\%$$

Con estos valores, de la tabla I, las corrientes por unidad son:

$$I_{\text{I}} = 9,13 ; \quad I_{\text{II}} = 3,05 ; \quad I_{\text{III}} = 0,90$$

Las corrientes del alternador, corregidas para los puntos de falla:

$$\text{Punto I} \quad : \quad 20.000/6\sqrt{3} \quad = \quad 1925 \text{ A}$$

$$\text{Punto II} \quad : \quad 20.000/22\sqrt{3} \quad = \quad 525 \text{ A}$$

$$\text{Punto III} \quad : \quad 20.000/13,8\sqrt{3} \quad = \quad 836 \text{ A}$$

de donde podemos calcular las corrientes simétricas de cortocircuito:

$$I_{\text{I}} = 1925 \times 9,13 = 17.560 \text{ A}$$

$$I_{\text{II}} = 525 \times 3,05 = 1.600 \text{ A}$$

$$I_{\text{III}} = 836 \times 0,9 = 751 \text{ A}$$

De la misma manera se puede obtener las

corrientes asimétricas, tomando los valores para corrientes por unidad de la tabla tres:

$$I_I = 1925 \times 23,9 = 46.000 \text{ A}$$

$$I_{II} = 525 \times 7,84 = 4.100 \text{ A}$$

$$I_{III} = 836 \times 2,31 = 1.937 \text{ A}$$

es

éstas corrientes son las que influyen en las fuerzas dinámicas que actúan sobre los conductores.

De igual manera usando la tabla 4, se pueden conocer las corrientes térmicas equivalentes:

$$I_I = 1925 \times 4,1 = 7.900 \text{ A}$$

$$I_{II} = 525 \times 2,03 = 1.060 \text{ A}$$

$$I_{III} = 836 \times 0,78 = 652 \text{ A}$$

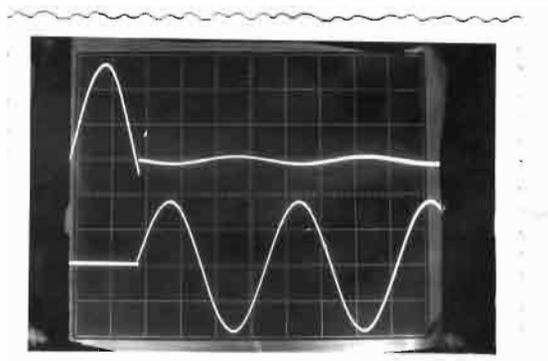
2.- OTRAS CORRIENTES TRANSITORIAS.

.- La corriente de cierre.

En el proceso de cierre los contactos se mueven el uno hacia el otro y cuando se ha llegado a la distancia de arco, este salta. El dispositivo de extinción no tiene participación en la operación de cerrado sino que el arco desaparece al ser cortocircuitado.

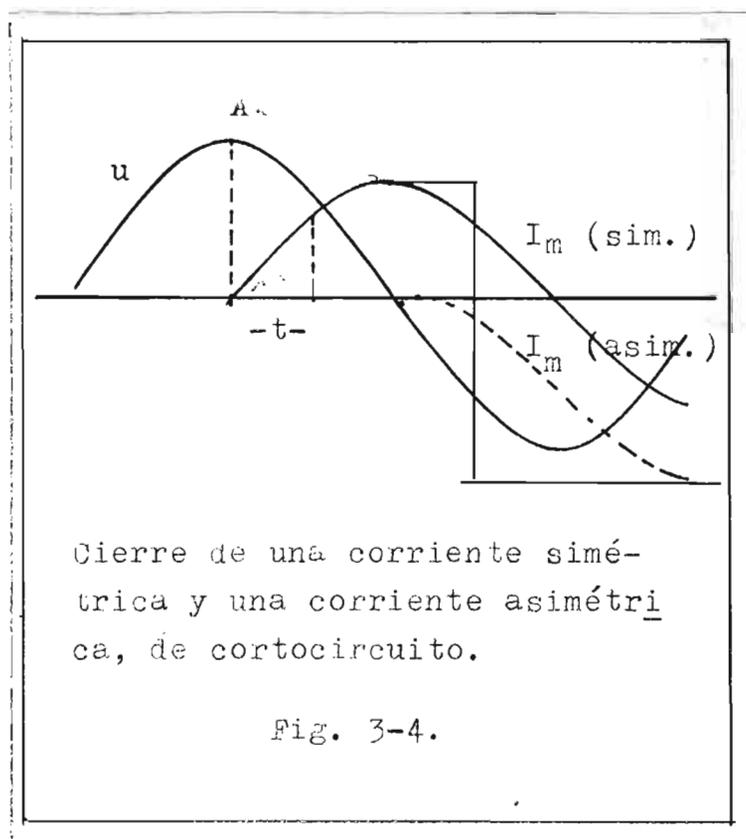
Es conveniente que la velocidad con la que se efectúa el cerrado, sea bastante alta, ya que se tiene que evitar que la corriente sea de la magnitud necesaria para dañar los contactos.

Si tenemos una conexión con inductancia pura, y suponemos que el arco salta en el punto A, arde durante el tiempo "t", hasta que los contactos se encuentran (fig. 3-4.); vemos que la corriente que fluye en el momento de encontrarse los contactos es i_B



Oscilogramas de voltaje y corriente de cierre.

si los contactos tendrían mayor velocidad el tiempo t , sería menor y por lo tanto la corriente que se tendría en el momento de cerrado sería menor.



Si la corriente que se tiene (por las condiciones del circuito) es asimétrica y principia cerca del cero de voltaje, el arco que se forma es muy pequeño. Es decir que en el proceso de cerrado la corriente asimétrica de cortocircuito puede ser menos peligrosa que la corriente simétrica.

.- La corriente de post-arco.

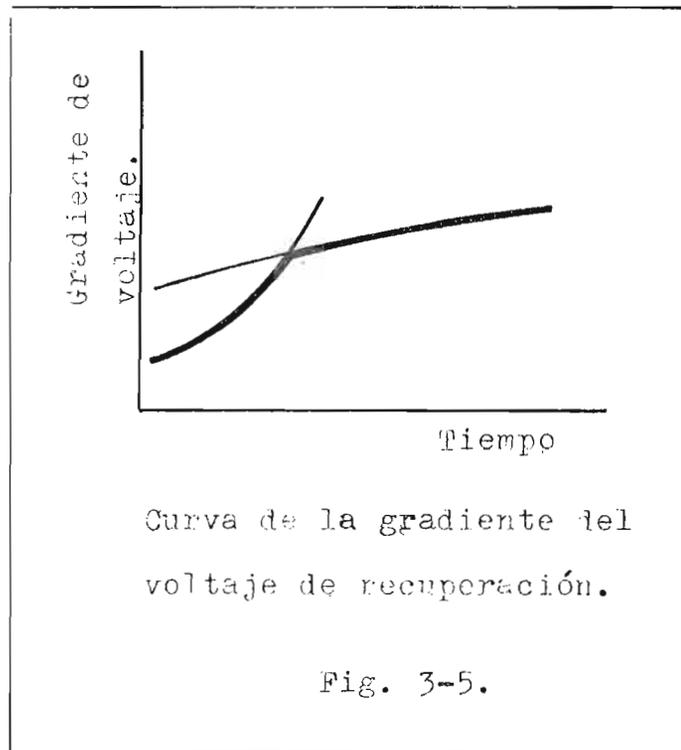
Quando se utiliza interruptores que operan bajo diferentes principios, las componentes del voltaje de recuperación se amortiguan de diferente manera y lo mismo sucede con diferentes operaciones de un interruptor. Esto indica que existe una corriente que fluye después de que el arco se ha reducido a cero; es decir la resistencia no crece inmediatamente a infinito después de la interrupción.

Se puede dar dos explicaciones sobre la variación de la resistencia residual y por lo tanto de las causas de la reignición del arco. La primera explicación considerando que la reignición consiste en la formación de una avalancha de electrones que se

transforma en un arco debido a la acción de un campo eléctrico; de acuerdo a esta explicación el arco no se reinicia si el voltaje no crece con la misma velocidad con que crece la rigidez dieléctrica. La segunda explicación, considerando la existencia de la corriente de post-arco, desde el principio y que la reignición se debe a un desbalance de energía (cuando la energía que entra al espacio entre contactos es mayor que la energía que se elimina).

Examinando la curva de Cassie para los voltajes que no causan descarga, contra tiempo por unidad de longitud, se puede ver que inmediatamente después de la extinción del arco, la regeneración del dieléctrico obedece primero al desbalance de energía y luego al crecimiento de la rigidez dieléctrica, lo que está indicado en la línea gruesa de la figura 3-5.

En cuanto a la influencia del tipo de interruptor, en los neumáticos, la corriente de post-arco, aparece cuando se está llegando a la capacidad máxima de interrupción; con el crecimiento de la presión aparece más rápidamente, y con el incremento del valor de la corriente de ruptura se incrementa su duración. En la figura 3-6, se ven los valores medios estadísticos de la resistencia residual en función del

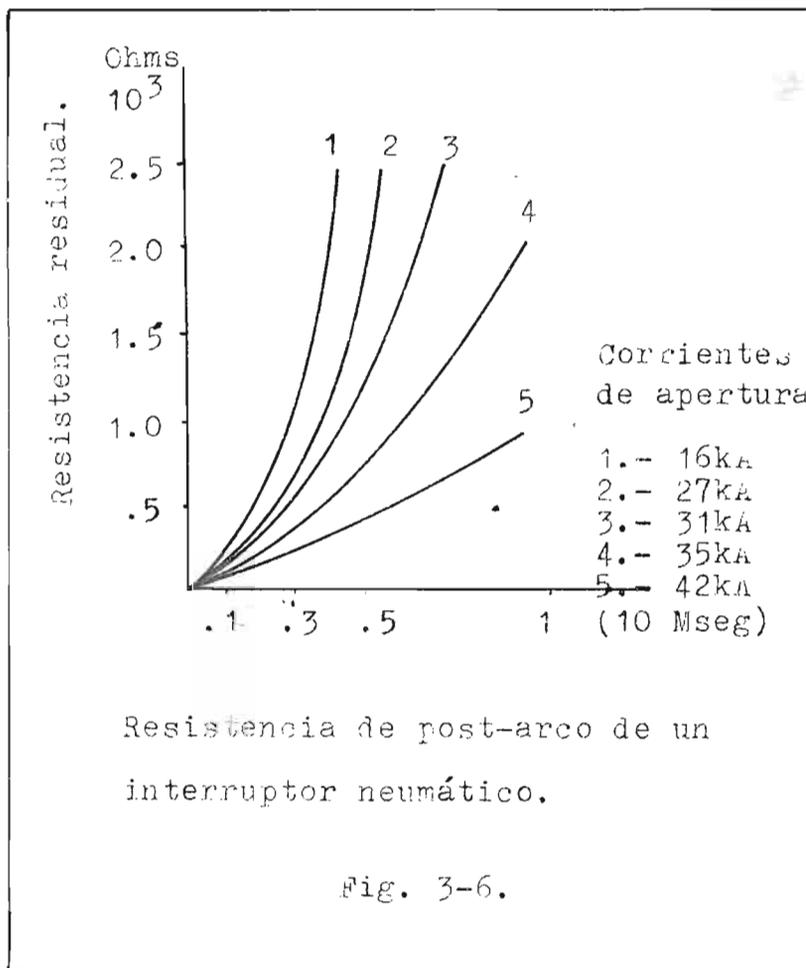


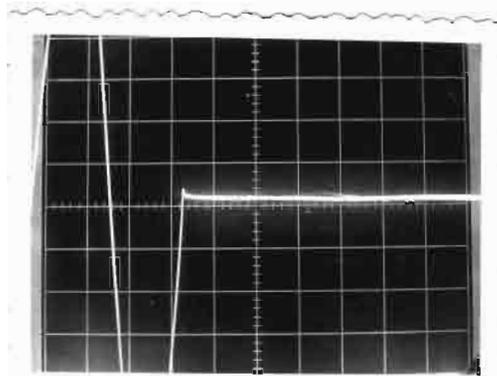
tiempo y de la corriente interrumpida.

En los interruptores de volumen reducido de aceite, la corriente de post-arco aparece siempre después de la interrupción de corriente bajas, la amplitud y duración pasan por un máximo en la zona crítica, y van decreciendo conforme va aumentando el valor de la corriente de ruptura.

En los interruptores de soplo magnético aparece desde valores de corriente bajas, la curva de la corriente tiene dos porciones, una que tiene una caída muy rápida, probablemente debido a la gran re-

frigeración del espacio entre las placas y la otra que más lentamente debido a la pérdida de calor por conduc
ción.





Oscilograma de la corriente
de post-arco.

Independientemente del tipo de interruptor, cuando los parámetros del circuito alteran la frecuencia del voltaje de recuperación todo incremento de esta frecuencia da como resultado un incremento considerable de la amplitud de la corriente de post-arco. Por esto en un interruptor que tenga todas las condiciones necesarias para que circule la corriente de post-arco, el incremento de la frecuencia natural del circuito no afecta a la capacidad de interrupción.

Bibliografía.

- .- H. Trencham.- Circuit Breaking.- Butherworths Publications Londres.
- .- G. Zoppety.- Estaciones Transformadoras y de Distribución.- Ed. Gustavo Gili S. A.
- .- A. Rothe.- Técnica de la Alta Tensión.
- .- J. L. Blase.- Post-arc current in circuit breakers
Acec Review N^o 3 1960.
- .- H. Trencham.- Spring closing mechanisms for circuit
breakers.- AEI Engineering Vol 7 N^o 3 1967.

C A P I T U L O I V .

V O L T A J E S .

- 1.- El voltaje de recuperación.
 - .- Determinación de la magnitud del voltaje fundamental de recuperación.
 - .- Atenuación del voltaje de recuperación.
- 2.- Distribución de voltajes (Varias etapas de interrupción).
 - .- Conexión en serie de varios dispositivos de interrupción.
 - .- Sobrevoltajes de interconexión.
- 3.- Relaciones entre el voltaje y el cero de corriente.
 - .- Paso del voltaje de arco al voltaje de recuperación.

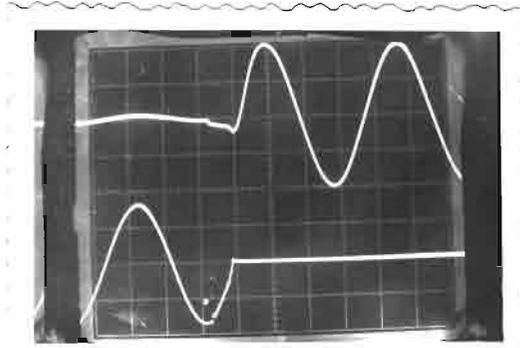
1.- EL VOLTAJE DE RECUPERACION.

El voltaje de recuperación es el valor eficaz de la componente alterna de la primera semionda de tensión que aparece entre los contactos después de la ruptura de la corriente. Tomando la amplitud de la componente alterna.

La forma del voltaje de recuperación es de gran importancia en el proceso de interrupción por su influencia directa en la capacidad de los interruptores y es necesario determinar el valor máximo y la pendiente de este voltaje. Está formado por la onda fundamental de 60 ciclos y por la superposición de oscilaciones de mayor frecuencia.

La interrupción del arco sucede al valor instantáneo de voltaje en el momento de la corriente cero; puede estar entre cero y el valor máximo.

Si por ejemplo el voltaje y la corriente están en fase, y la interrupción se hace con voltaje



Oscilogramas de voltaje y corriente. $\cos \varphi = 1$.

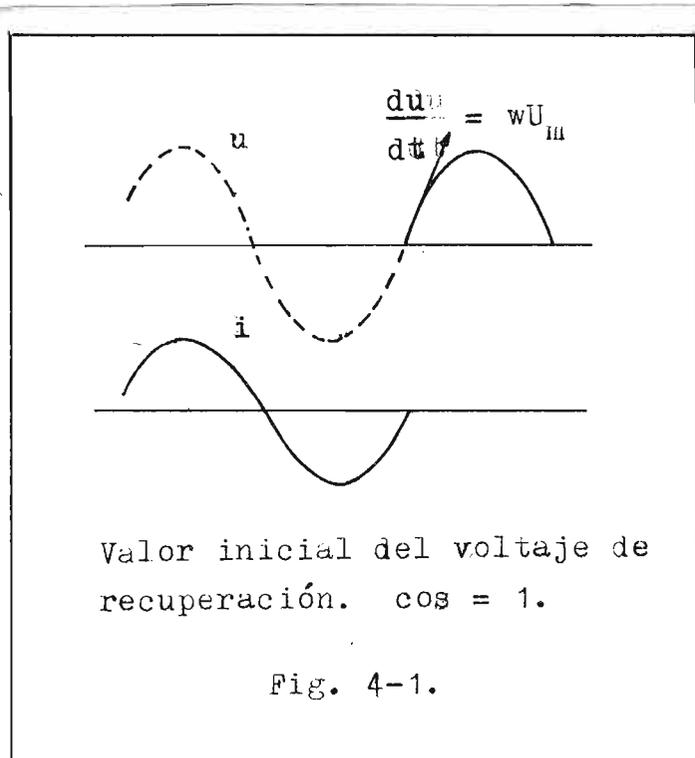


Fig. 4-1.

cercano al cero, la pendiente del voltaje que aparece a los bornes es:

$$u' \approx du/dt$$

con el voltaje de 138 kV:

$$u'_m = 138 \cdot 10^3 du/dt = \frac{138.377 \cdot \sqrt{2} \cdot 10^3}{10^6} = 73,5 \text{ V/}\mu\text{S}$$

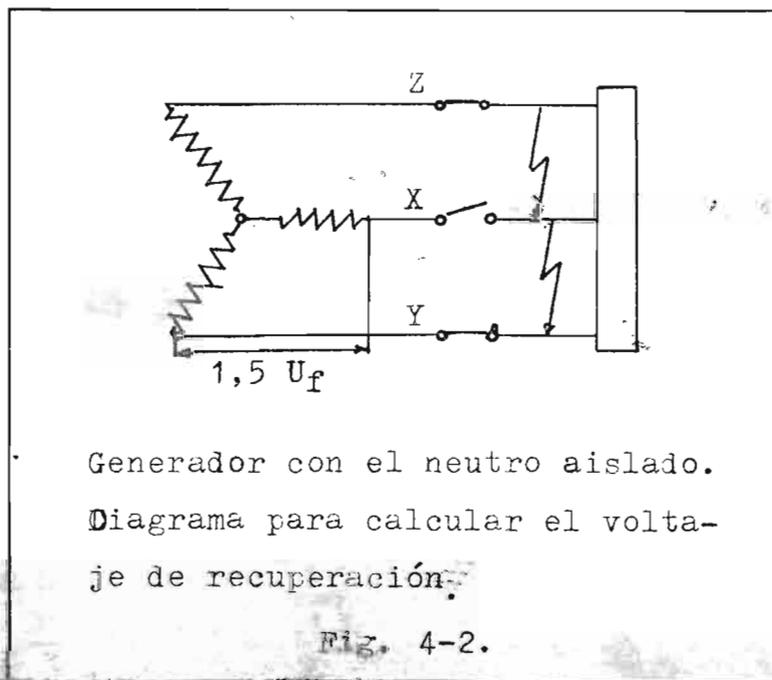
.- Determinación de la magnitud del voltaje fundamental de recuperación.

El voltaje fundamental depende de las características que se presentan en el momento de la interrupción, de la disposición del sistema y de la clase de falla.

Los casos que se pueden tener son: Una fuente trifásica con un neutro conectado permanentemente a tierra, y una falla trifásica a tierra. Cada fase de la fuente trabaja independiente y el voltaje de recuperación es igual al voltaje fase-neutro:

$$u = \frac{u_f}{\sqrt{3}}$$

Si el punto neutro del transformador o del generador está aislado, en el polo que primero se extingue el arco aparece un voltaje de $1,5 u_f$. Al interrumpirse el arco en un polo, el cortocircuito trifásico se convierte en uno bifásico, como los puntos que están en cortocircuito están a tierra, el punto neutro del generador adquiere un potencial de $\frac{1}{2}u_f$; en la práctica el voltaje del primer polo varía entre 1,2 y 1,3 u_f .



Para tener en cuenta la reacción de armadura del generador, se puede considerar que la FEM del generador decrece más o menos en la misma forma

que la corriente del cortocircuito y por lo tanto:

$$u = \frac{I_r}{I_c} u_{cc}$$

es decir que la razón del voltaje de recuperación al voltaje antes de la falla, es igual a la razón de la corriente de apertura a la corriente de cortocircuito.

.- Atenuación del voltaje de recuperación.

Las oscilaciones que se den al final de la interrupción tienen una influencia muy importante, tanto por las sobretensiones que se pueden dar como porqu entre más pequeña sea la frecuencia propia, más lento es el crecimiento de la tensión y mayor el tiempo disponible para la regeneración dieléctrica. La amplitud de la primera semionda del voltaje de recuperación depende del amortiguamiento provocado por el circuito y por el disyuntor así como de la tensión del arco durante el semiperíodo precedente a la extinción.

Como se vió en el capítulo III, cuando la corriente de apertura es grande, la corriente residual también es grande, y por lo tanto la energía que queda entre contactos sólo necesita un pequeño incremento para producir la reignición del arco, por lo que existe una relación entre la capacidad de ruptura y la máxima pendiente del voltaje de recuperación que se puede admitir.

En las investigaciones de redes suizas, se ha encontrado que para cada punto de una red, se tiene gráficos como el de la figura 4-3, que relacionan la pendiente del voltaje de recuperación con la potencia necesaria. Dibujando la curva de máximas pen

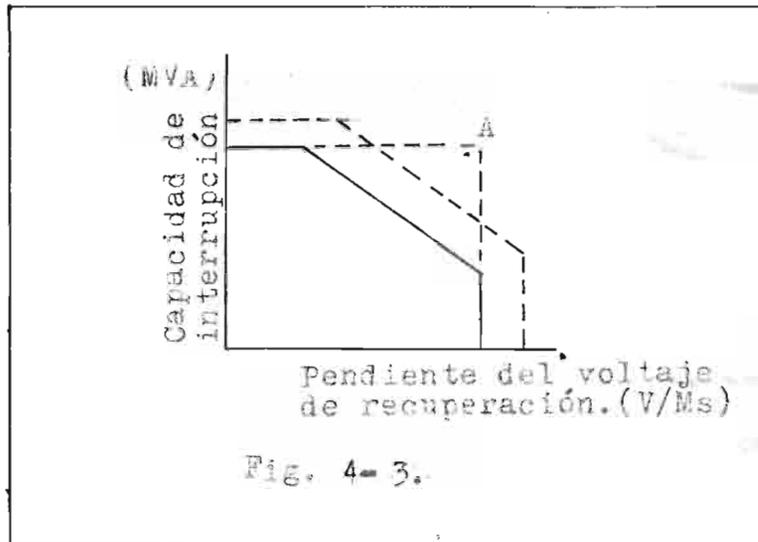
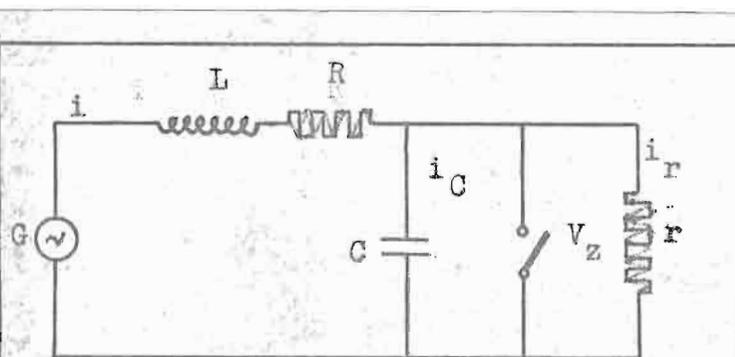


Fig. 4-3.

dientes de voltaje de recuperación para una capacidad dada se obtiene una curva de igual forma, que nos proporciona la base para la adaptación del interruptor a las características de la red, sin necesidad de tener una reserva innecesaria. En la curva 4-3, se ve que la máxima pendiente no coincide con la máxima capacidad de interrupción.

Analizando la interrelación entre los circuitos de las redes y el interruptor, tenemos:

Para un caso general, en el cual R es la resistencia del circuito, r es la resistencia en paralelo al interruptor V_z y C la capacitancia, las ecuaciones son:



Circuito general para calcular el voltaje de recuperación.

Fig. 4-3

Fig. 4-4.

$$\mathcal{U}_m = iR + L \frac{di}{dt} + \frac{1}{C} \int i_c dt$$

$$i_r = \frac{1}{C} \int i_c dt ; \quad i = i_r + i_c$$

de donde:

$$0 = \frac{d^2 i_r}{dt^2} + B_1 \frac{d i_r}{dt} + B_2 i_r$$

$$B_1 = \frac{R}{L} + \frac{1}{rC} \quad B_2 = \frac{1}{LC} + \frac{R}{rLC}$$

cuya ecuación característica tiene las raíces:

$$\alpha_{1,2} = -\frac{1}{2} \left(\frac{R}{L} + \frac{1}{rC} \right) \pm \sqrt{\frac{1}{4} \left(\frac{R}{L} + \frac{1}{rC} \right)^2 - \frac{1}{LC}}$$

las raíces complejas corresponden a un fenómeno transitorio de carácter oscilatorio, con una frecuencia:

$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{1}{LC} - \frac{1}{4} \left(\frac{R}{L} - \frac{1}{rC} \right)^2}$$

y una atenuación:

$$\beta = -\frac{1}{2} \left(\frac{R}{L} + \frac{1}{rC} \right)$$

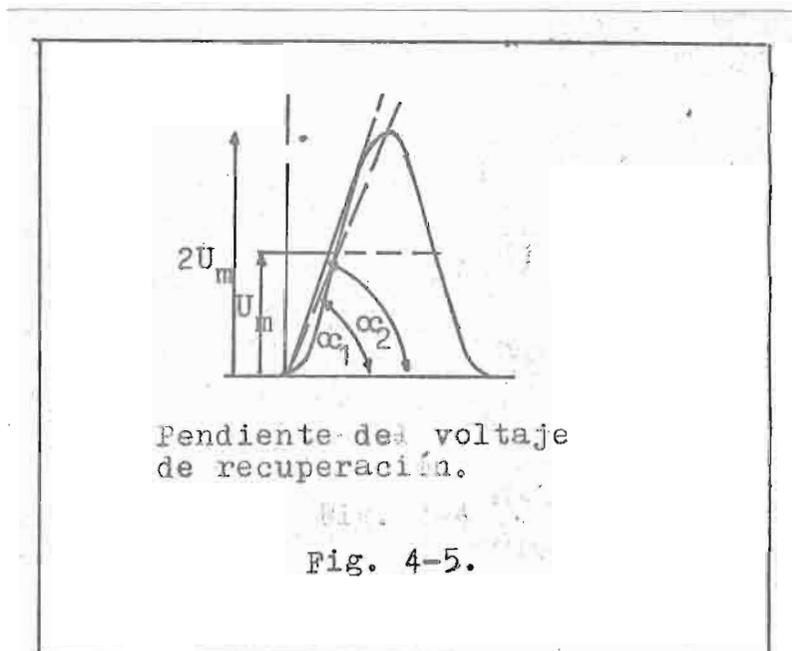
Para el interruptor ideal, $r = \infty$, la frecuencia es:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{1}{LC}}$$

y la atenuación:

$$\beta_0 = -\frac{1}{2} \frac{R}{L}$$

La tangente dibujada a la curva del voltaje desde el origen, da la pendiente del voltaje de recuperación.



De lo anterior podemos concluir que la resistencia r , conectada en paralelo con el interruptor reduce la frecuencia natural e incrementa la atenuación.

Para el caso del interruptor ideal se considera que $r = \infty$, y que la atenuación está dada sólo por la resistencia R , pero en el caso real (efecto de la corriente residual), y cuando la parte bajo la raíz cuadrada de las raíces de la ecuación característica es cero, el fenómeno oscilatorio es aperiódico y entonces tenemos:

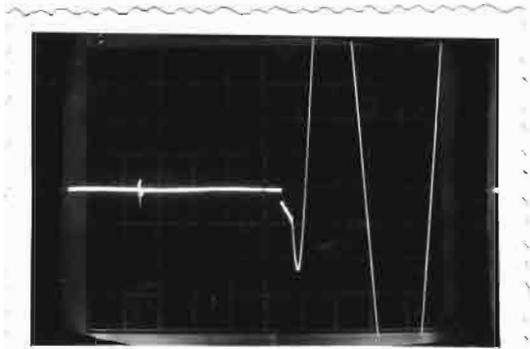
$$\frac{1}{4} \left(\frac{R}{L} + \frac{1}{rC} \right)^2 = \frac{1}{LC} \left(1 - \frac{R}{r} \right)$$

la atenuación causada por la resistencia en paralelo r es muy grande comparada con la atenuación de la resistencia en serie R , que se la puede considerar igual a cero, y se obtiene que:

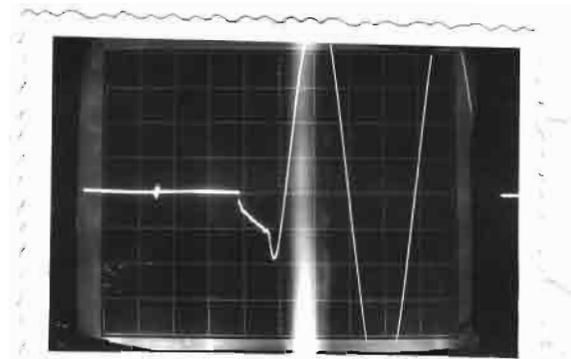
$$r = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{L}{C}}$$

que es el valor de la resistencia que tiene que conectarse en paralelo al interruptor para atenuar completamente las oscilaciones del voltaje de recuperación.

Las resistencias que se usan para atenuar las oscilaciones del voltaje de recuperación, pueden estar bajo o sobre el valor crítico $r = \frac{1}{2}\sqrt{L/C}$



Voltaje de recuperación
cuando $r \rightarrow \infty$



Voltaje de recuperación
cuando $r = 5r_c$.

En general las resistencias que se utilizan en paralelo con los interruptores tienen un valor un poco más grande que el crítico, por la dificultad para interrumpir la corriente que circula por ellas.

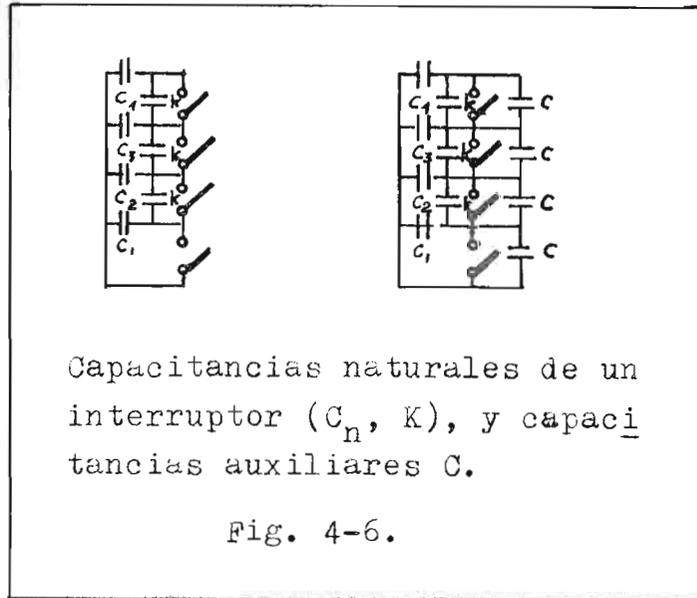
2.- DISTRIBUCION DE VOLTAJES (VARIAS ETAPAS DE INTERRUPCION).

.- Conexión en serie de varios dispositivos de interrupción.

En los interruptores para voltajes muy altos, se usan varios dispositivos de extinción, colocados en serie.

En el instante de la formación del voltaje de recuperación, se manifiestan diferencias en las condiciones eléctricas que se presentan en cada dispositivo, cuando cada uno adquiere una potencial indefinido que depende de la capacitancia entre contactos y de las capacitancias a tierra. Los valores que se presentan dependen del tipo de cortocircuito, el caso más desfavorable se presenta con fallas a tie

rra; en la figura 4-6, K es la capacitancia entre dispositivos y C_1, C_2, C_3, C_4 , son las capacitancias a tierra, como $C_1 > C_2 > C_3 > C_4$, el aparato de extinción



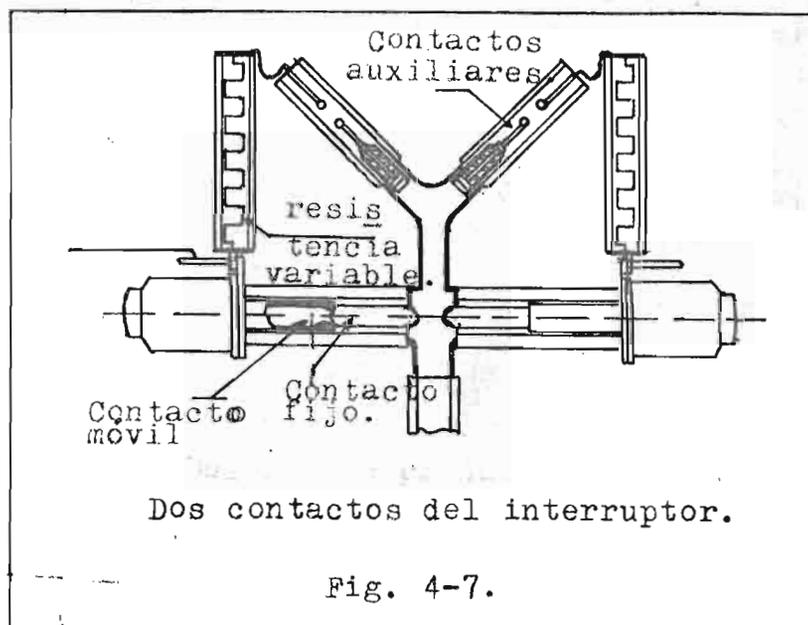
más cercano a la falla está sujeto a un esfuerzo menor a su capacidad y el que se encuentra más alejado a un esfuerzo total.

La capacidad total de la columna está determinada por el dispositivo a través del cual aparece el mayor voltaje, los demás no emplean toda su capacidad.

Para asegurar una mayor capacidad, hay

que distribuir el potencial en forma artificial, a lo largo de toda la columna. Una de las formas de obtener iguales diferencias de potencial para los dispositivos de extinción es colocar capacitancias en paralelo, estas capacitancias C (fig. 4-6.) deben ser mucho más grandes que las capacitancias naturales, para poder anular el efecto de estas últimas.

El método universalmente aceptado para alcanzar la distribución correcta de voltaje es el de usar resistencias, o resistencias y capacitancias.



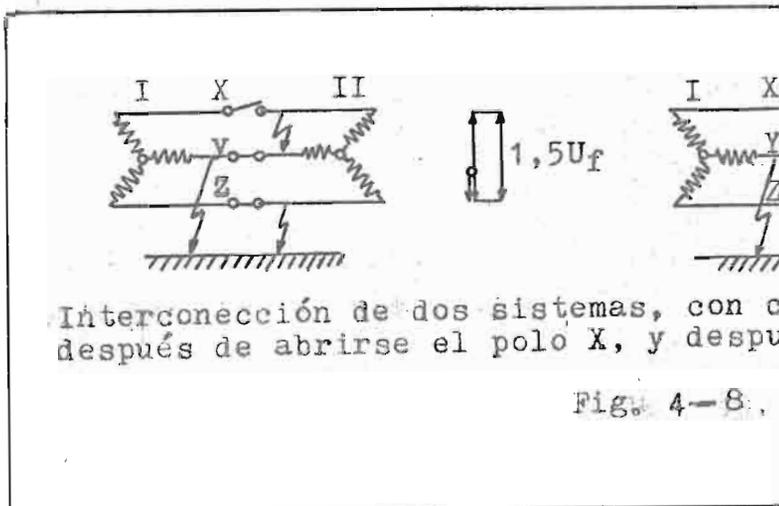
la corriente que fluye por estas resistencias, debe ser mayor que la que carga las capacitancias naturales, para poder neutralizarlas. Las resistencias de cerámica de característica no lineal, del tipo de las usadas en pararrayos, actúan al mismo tiempo como divisores de voltaje y como resistencias de extinción.

.- Sobrevoltajes de interconexión.

Cuando se tiene un interruptor conectado a una barra de salida de una estación generadora, o cuando se tiene la interconexión entre sistemas, en donde el interruptor está alimentado por los dos lados se pueden presentar casos en que los esfuerzos de voltaje son considerables.

Para estudiar los voltajes que se pueden presentar, consideremos dos sistemas interconectados, con los neutros aislados, representados por dos generadores trifásicos. En el sistema I, ocurre una falla de la fase Y a tierra, en el sistema II, ocurre una falla a tierra en la fase A, y las fases X y Y están

en cortocircuito; esta falla puede darse si las dos líneas corren paralelas desde una subestación y cae un rayo en la vecindad de ambas, produciéndose descargas simultáneas de las líneas en los aisladores. Con el interruptor en posición cerrada, ambos sistemas quedan en cortocircuito trifásico.



Si el arco se extingue primero en la fase X, el sistema II, permanece en cortocircuito trifásico, y el sistema I en cortocircuito bifásico.

El voltaje del polo X del interruptor, es $u = 1,5U_f$. Si el polo Y se interrumpe después, la

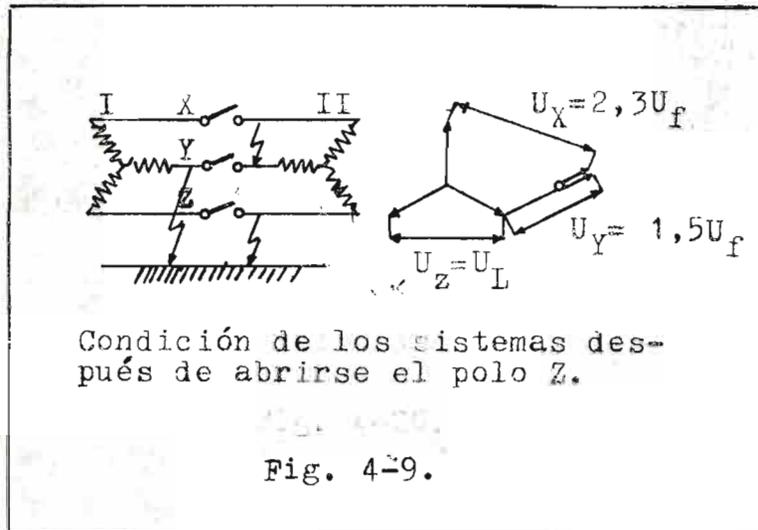
corriente de corriente de cortocircuito bifásico que fluye en el sistema I, pasa por el polo Z. En el diagrama vectorial, vemos que a los bornes de los contactos del polo Y, aparece el voltaje $u = 1,5U_f$, que también aparece en el polo X, pero con un desplazamiento de fase de 60° .

Quando el polo **Z**, se abre, las condiciones cambian, y si las fallas a tierra son permanentes (sin arco), los sistemas permanecen conectados: la fase Y del sistema I, con la fase Z del sistema II. La falla en el sistema I, ha quedado completamente despejada, pero en el sistema II, subsiste un cortocircuito bifásico entre Y y X, que no puede ser removido por el interruptor.

Del diagrama vectorial, se ve que el voltaje fundamental de recuperación alcanza a $2,3U_f$. Es decir, que en un interruptor interconector, el voltaje fundamental de recuperación que aparece, puede ser mucho más grande que cuando se encuentra en otro tipo de conexión.

Los valores, en este caso, que ha quedado alimentado desde un solo lado; son:

$$U_X = 2,3U_f ; \quad U_Y = 1,5U_f ; \quad U_Z = \sqrt{3} U_f$$

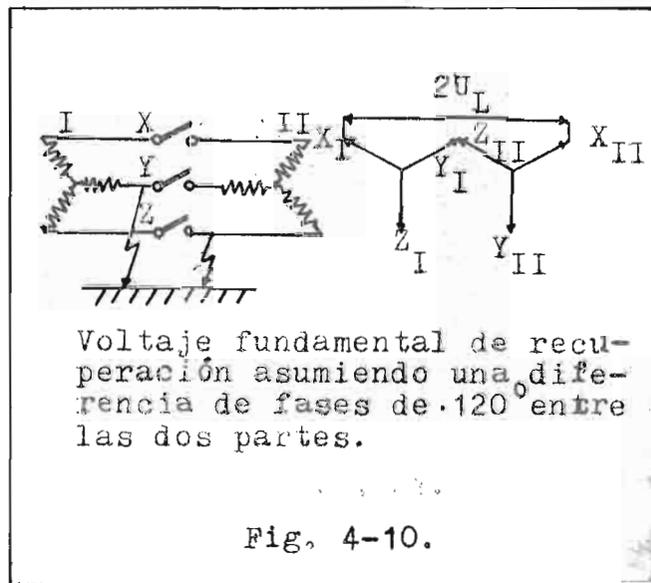


En este caso se ha asumido que no existe ninguna diferencia de fase, ni ninguna otra complicación, pero puede haber muchas otras clases de fallas, por ejemplo diferentes capacidades de cortocircuito - desde cada sistema, etc.

Si se llega a una diferencia de fases de 120° entre los dos sistemas, a través de los polos X y Y, aparece el voltaje de línea, y a través del polo X, aparece un voltaje igual al doble del voltaje de línea.(fig. 4-10).

Cuando se interrumpe el circuito, puede llegarse a la desaparición del sincronismo, y si bien

el tiempo que se emplea en el funcionamiento del interruptor no espera a que se llegue al momento de oposición de fase para abrir el circuito, por la operación de recierre se corre el peligro de tener que abrir el circuito en estas circunstancias, es decir a un voltaje doble del nominal.



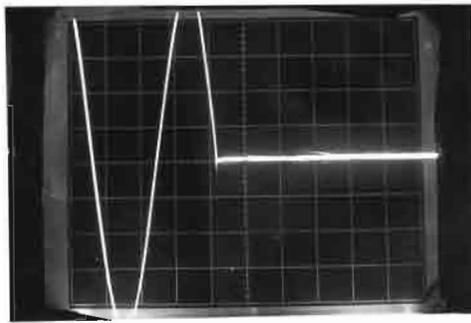
Cuando las potencias de los lados seccionados son aproximadamente iguales, se tiene una potencia máxima puesta en juego por esta causa, que puede como máximo llegar a ser igual a la de cortocircuito; en estos casos el interruptor debe poder conservar su

capacidad de ruptura cuando el voltaje de restablecimiento se hace igual al doble del voltaje nominal del sistema.

De esto se ve, que para funciones de interconexión, se debe escoger un interruptor que trabaje perfectamente a un voltaje mucho mayor que el nominal, y si no se puede, utilizar un interruptor de voltaje nominal mucho más alto que el voltaje nominal del sistema.

3.- RELACIONES ENTRE EL VOLTAJE Y EL CERO DE CORRIENTE.

Como la corriente y el voltaje no son magnitudes independientes sino que se relacionan por la resistencia del arco, la onda de corriente nunca es sinusoidal, sino que se distorsiona de acuerdo a la resistencia del arco



Oscilograma del punto cero de corriente.

Para analizar la distorsión de la corriente, consideremos un circuito en el que se tenga una fuente G , una inductancia L , una resistencia R y un arco de voltaje u_{arc} , asumimos un voltaje conocido, y si analizamos las ecuaciones para el arco, en el capítulo II, vemos que se puede ignorar la caída de voltaje en los electrodos, y en las curvas del voltaje del arco podemos ver que si no se considera el fenómeno que ocurre cerca de la corriente cero, la ecuación

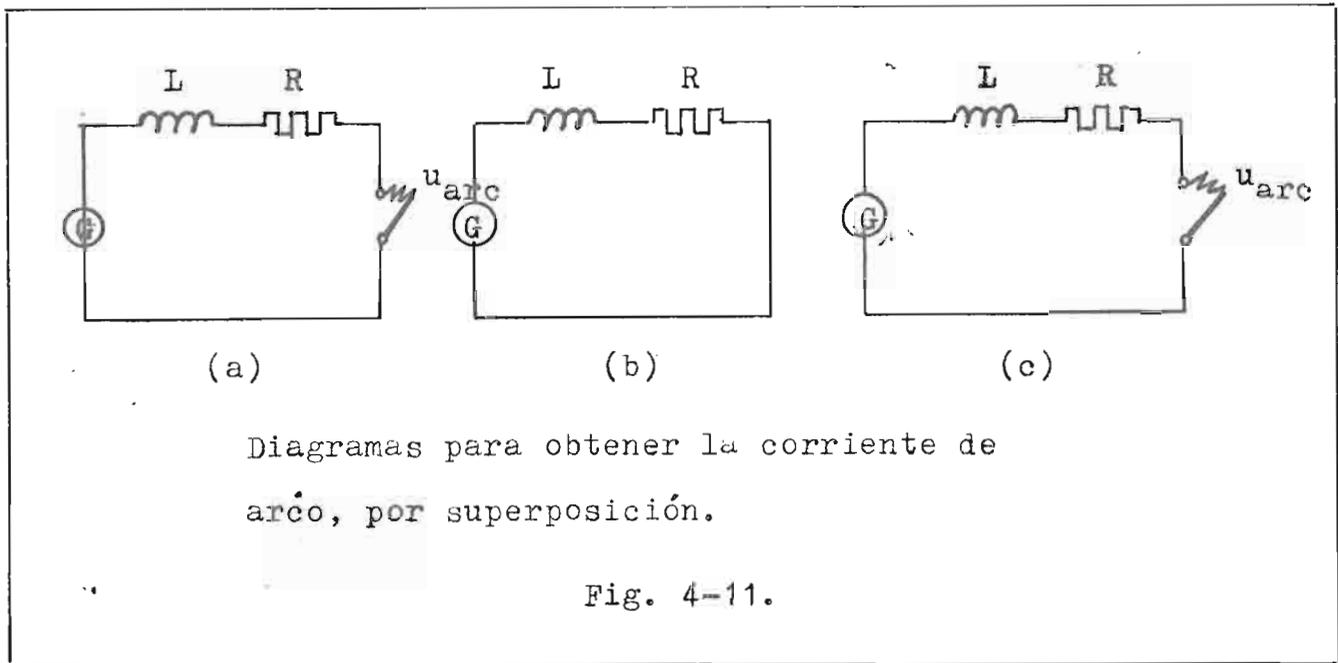
$$u_{arc} = (B + \frac{D}{i_{arc}})d, \text{ se puede simplificar todavía más.}$$

Entonces podemos asumir que el voltaje del arco es independiente de los valores de corriente, para una media onda completa de la corriente alterna y que solamente en las proximidades de la corriente cero, el voltaje se incrementa velozmente, hasta alcanzar un valor pico de extinción, y luego decae a un valor otra vez independiente de la magnitud de la corriente.

Podemos escribir que el voltaje del arco es:

$$u_{arc} = K.d$$

siendo K un valor independiente del método de enfria-



miento, y d es la longitud del arco.

La longitud del arco es un valor dependiente del tiempo. En algunos interruptores como en lo que usan aire comprimido, el arco varía muy rápidamente: se incrementa a un cierto valor casi instantáneamente, y luego permanece constante por todo el proceso de extinción; en los de expansión, y otros tipos de interruptores de aceite, la longitud del arco se incrementa linealmente con el tiempo; para el caso de interruptores magnéticos, hay una variación cuadrática. Teniendo en cuenta esos tres casos, podemos escribir para el voltaje:

$$u_{\text{arc}} = U_a ; \quad u_{\text{arc}} = U_b \cdot t ; \quad u_{\text{arc}} = U_c \cdot t^2$$

U_a, U_b, U_c , son constantes.

Aplicando el principio de superposición podemos considerar dos circuitos, en el primero no se considera el voltaje del arco, y en el segundo se considera que las corrientes se deben sólo al voltaje del arco, omitiendo el del generador. La corriente resultante será la suma de las dos corrientes parciales.

Para el circuito 4-11a, tenemos:

$$\mu_G = R i_1 + L \frac{di_1}{dt}$$

y para el circuito 4-11b:

$$\mu_{arc} = R i_2 + L \frac{di_2}{dt}$$

la corriente resultante es:

$$i = i_1 - i_2$$

si el voltaje del generador es:

$$\mu_G = U_G \cos(\omega t + \varphi)$$

la corriente i_1 , es:

$$i_1 = I_m \cos \omega t$$

Para el caso de $u_{arc} = U_a$:

$$U_a = R i_2 + L \frac{di_2}{dt}$$

de donde:

$$dt = \frac{L di_2}{U_a - R i_2}$$
$$t = L \int_0^{i_2} \frac{di_2}{U_a - R i_2}$$

para las condiciones de $i_2 = 0$ para $t = 0$:

$$t = -\frac{L}{R} \ln \frac{U_a - R i_2}{U_a}$$

$$i_2 = \frac{U_a}{R} \left(1 - e^{-\frac{t}{T}} \right); T = \frac{L}{R}$$

substituyendo

$$\frac{U_m}{I_m} = Z \quad \frac{R}{Z} = \cos \varphi$$

tenemos:

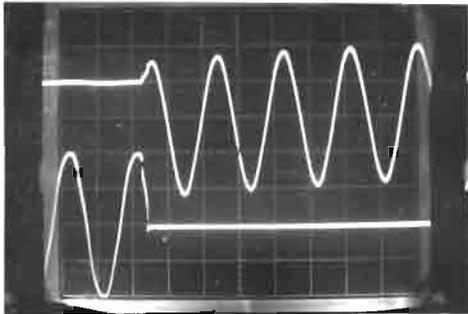
$$i_2 = \frac{I_m \cdot U_a}{\cos \varphi \cdot U_m} \left(1 - e^{-\frac{t}{T}} \right)$$

Para $R = 0$, $\cos \varphi = 0$, $t = 0$, tenemos:

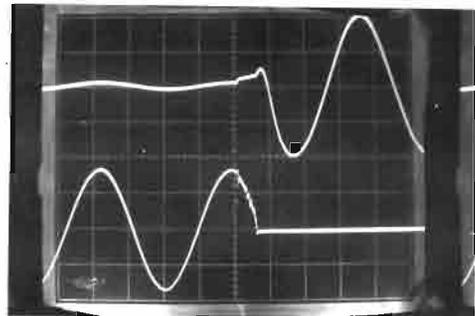
$$i_2 = I_m \frac{U_a}{U_m} \cdot \omega t$$

Por lo tanto, la corriente suma i , no se

comporta sinusoidalmente sino que decrece con el incremento de la relación entre el voltaje del arco al voltaje nominal. Por lo que ocurre que la corriente alcanza su valor cero más pronto que la corriente normal y el arco se extingue a una corriente cero forzada, es decir que tan pronto aparece el arco en el circuito ya no se puede hablar de valores cero naturales, que solamente ocurrirían en el interruptor ideal sincrónico.



Oscillograma de voltaje y corriente (distorcionada)
 $\cos \varphi = 0.$



Oscillograma de voltaje y corriente (distorcionada)
 $\cos \varphi = 1.$

Para el caso en que el arco tiene una

longitud dependiente del tiempo, la corriente i_2 es:

$$i_2 = \frac{I_m \cdot U_b \cdot \tan \varphi}{U_m \cdot \omega \cdot \cos \varphi} \left[\frac{t^2}{T} - (1 - e^{-\frac{t}{T}}) \right]$$

$$i_{2(R=0)} = \frac{I_m \cdot U_b \cdot \omega}{2 U_m} t^2$$

para el caso en que se tiene la relación cuadrática, i_2 :

$$i_2 = \frac{I_m \cdot U_c \cdot 2 \cdot \tan^2 \varphi}{U_m \cdot \omega^2 \cdot \cos \varphi} \left[1 - \frac{t}{T} + \frac{1}{2} \left(\frac{t}{T} \right)^2 - e^{-\frac{t}{T}} \right]$$

En este último caso, cuando el voltaje del arco es alto, la distorsión es sumamente fuerte, el cero forzado puede adelantar al cero natural por un cuarto de onda o más. Esto tiene un efecto muy marcado en la interrupción de corrientes de cortocircuito; durante este proceso, el factor de potencia es muy bajo, y el valor instantáneo del voltaje fundamental de recuperación es igual al voltaje de pico, pero con la distorsión se puede desplazar el punto cero de corriente para que coincida con el cero de voltaje, y durante una media onda de corriente, la carga inductiva se cambia a resistiva, con la gran resistencia del arco. Esta clase de interrupción (de interruptores magnéti-

cos), por la gran cantidad de energía que se concentra, no permite altas capacidades de interrupción.

.- Paso del voltaje de arco al voltaje de recuperación.

Considerando la operación del interruptor, sin voltaje de arco y sin conductancia residual, el voltaje de recuperación sería:

$$u = U_m (1 - e^{pt} \cos \omega t)$$

con la atenuación:

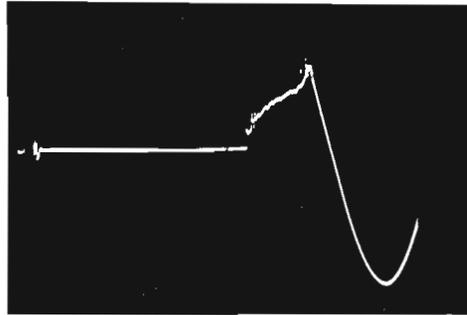
$$p = - \frac{1}{2} \frac{R}{L}$$

Para el caso de $R = 0$:

$$u = U_m (1 - \cos \omega t)$$

y la frecuencia:

$$f = \sqrt{\frac{1}{LC}}$$

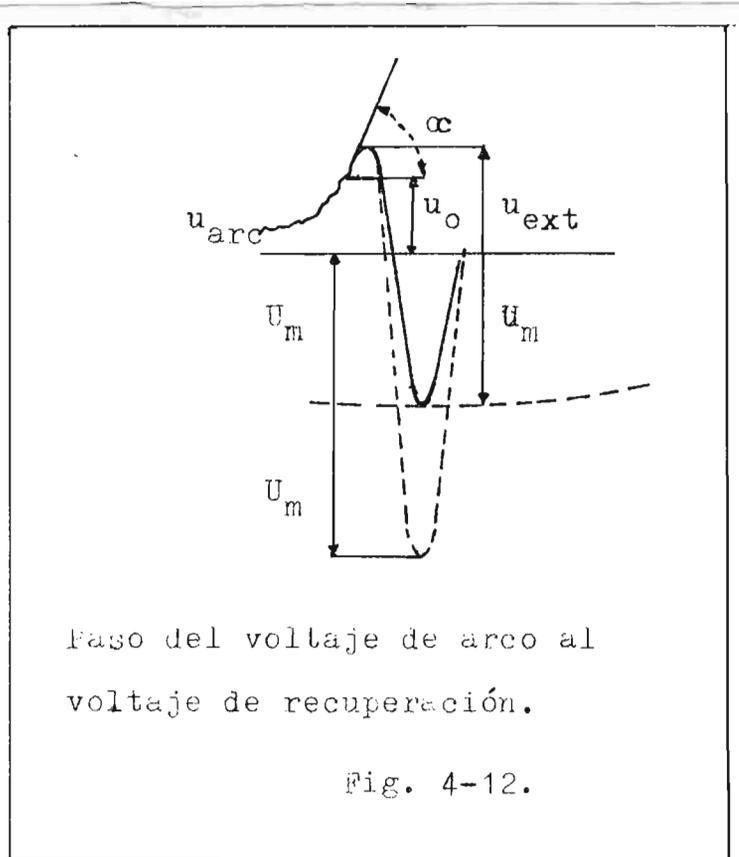


Oscilograma del paso del voltaje
del arco al voltaje de recuperación.

Pero hemos visto que el voltaje del arco y la conductancia residual distorsionan el voltaje de recuperación.

En las proximidades de la corriente cero hay que tener en cuenta la dependencia que tiene el voltaje del arco, de la corriente, es decir la característica dinámica del arco.

Inmediatamente antes de que se alcance la corriente cero (el valor forzado de la corriente cero) el voltaje del arco se eleva rápidamente (curva



u_{arc}), y la corriente que fluye por la capacitancia está dada por la relación: $i_C = C du_{arc}/dt$, que se resta a la corriente del arco, que decrece en forma cortada, este instante de la reducción de la corriente, puede considerarse como el instante de la extinción del arco. Al disminuir la corriente del arco y extinguirse, el voltaje del arco cambia al voltaje de recuperación.

Se puede ver que el voltaje del arco el momento de la extinción no es cero sino u_o , después de este valor, el voltaje de recuperación sobreoscila cer

ca del voltaje final del arco, alcanza el pico de extinción u_{ext} y luego toma la dirección del voltaje de la fuente. La diferencia entre el voltaje fundamental de recuperación y el pico de extinción es $U_m + u_{ext}$.

Con una atenuación cero, el voltaje de recuperación de pico puede alcanzar magnitudes de $2U_m + u_{ext}$.

Bibliografía:

- .- H. Trencham.- Circuit Breaking.- Butterworths Publications Londres.
- .- C. H. Flurscheim.- The Switchgear Handbook Vol. 1 Londres.
- R- R. E. Scott.- Line circuits Part 1.- Japan.
- .- Gaudenci Zoppety.- Estaciones Transformadoras y de Distribución.- Ed. Gustavo Gili S. A.
- .- J. Viqueira.- Redes Eléctricas, Segunda Parte, México.

CAPITULO V.

PARTICULARIDADES PARA DIFERENTES TIPOS DE INTERRUPTORES. T O R E S .

- 1.- Interruptores de aceite.
 - .# Interruptores con cámaras de explosión.
 - .- Cámaras de explosión con chorros adicionales de aceite.
- 2.- Interruptores de aire comprimido.
- 3.- Interruptores con SF6.
- 4.- Interruptores con campo magnético.

1.- INTERRUPTORES DE ACEITE.

Cuando el arco se produce en aceite, el que se encuentra más próximo se evapora y descompone. El arco queda encerrado por una burbuja de los productos de la descomposición del aceite y del aceite evaporado.

Comparando la interrupción cuyo único medio de desionización es el movimiento radial de partículas a partir del arco, con la extinción libre en aceite, presenta las ventajas de:

- 1.- Reducción de la longitud del arco y por lo tanto de la distancia entre los contactos.
- 2.- Se obtiene un buen aislamiento a tierra.
- 3.- Como el gas puede escapar fácilmente hacia las inmediaciones se obtiene una desionización rápida.
- 4.- El aceite separa inmediatamente el arco de la atmósfera explosiva.

Presenta algunas desventajas como:

- 1.- El aceite y los gases producidos durante la operación son inflamables, el hidrógeno combinado con el aire en cierta proporción produce una mezcla explosiva.
- 2.- El aislamiento original se deteriora con la carbonización del aceite.
- 3.- Los contactos grandes se deterioran más fácilmente que en los interruptores de aire.

.- Interruptores con cámara de explosión.

Los contactos del interruptor están sumergidos en aceite en un cilindro. Hay un hueco en la parte inferior del cilindro a través del cual pasa un contacto.

En el instante de la interrupción se forma una burbuja de gas de acuerdo al calor generado, y la presión dentro de la cámara se incrementa, en ese momento el contacto sale por la abertura inferior y los gases escapan de la cámara a gran velocidad soplando el arco hacia afuera. Las ventajas de la cámara de

explosión son:

- 1.- La presión inicial que va creciendo durante la apertura, actúa sobre la cámara y no sobre el tan que del interruptor, la cámara de explosión puede soprtar hasta 80 atm.
- 2.- La fuerza de los gases aceleran la desionización.
- 3.- La duración del arco es corta y la cantidad de - energía generada por el arco disminuye considera- blemente.
- 4.- El arco se extingue con una longitud muy corta, es decir el tamaño del aparato es mucho menor.

Los resultados alcanzados por medio de la cámara de explosión han sido buenos. La duración del arco se reduce 10 veces y proporcionalmente aumenta la capacidad de interrupción.

A cambio de estas características favora bles hay algunas desfavorables, como:

- 1.- Mientras el contacto permanece en la apertura de la cámara el aceite no puede escapar, se forma una presión considerable cuando la corriente cero ocurre inmediatamente después de que el contacto ha llegado a la apertura, y el soplo de los gases extingue el arco; pero si la corriente cero ocurre inmediatamente antes de que los gases puedan es-

capar, el próximo cero de corriente ocurrirá - cuando el contacto se encuentre completamente fuera de la cámara, con una reducción de la pre sión y de la velocidad de extinción del arco, es decir con condiciones desfavorables para la ex tinción del arco.

La presión que se forma en la cá- mara de explosión se la utiliza completamente e sólo si el arco se reduce después de la salida del contacto.

- 2.- El arco se extingue sólo cuando el contacto de- ja la cámara de explosión.
- 3.- El arco recibe un baño de gases que se encuentran disociados y también ionizados, que tienen poder de conducción del calor inferior al del aceite puro.

.- Cámara de explosión con chorros adicionales de aceite.

Con la inyección de aceite, se obtiene dos ventajas adicionales, al evaporarse el aceite qui

ta energía al arco, y después que se ha producido la interrupción queda aceite puro entre los contactos.

S e puede usar algunas formas:

- 1.- a.- chorro de aceite en forma axial.
b. θ chorro de aceite en forma transversal.
- 2.- a.- chorro producido por un arco auxiliar.
b.- chorro producido por un pistón (energía externa).
- 3.- Una combinación de 1 y 2.

2.- INTERRUPTORES DE AIRE COMPRIMIDO.

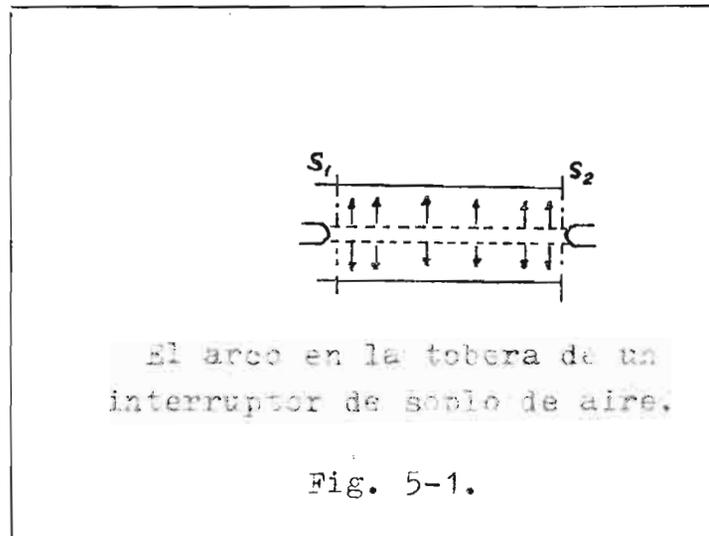
En el proceso de extinción en los interruptores con aire comprimido inmediatamente después de la apertura, la temperatura en el espacio que rodea al arco desciende, debido a la influencia del soplo de aire, y al mismo tiempo se reduce su sección. La característica de crecimiento del dieléctrico sigue la forma de la figura 2-5.

Un fenómeno importante que se produce en los interruptores de soplo de aire es el fenómeno de estrangulamiento, que determina el límite de la capacidad de interrupción.

Supongamos que un arco va a arder en un conducto, como en la figura 5-1, en el cual el aire entra a través de la sección S_1 y sale por la sección S_2 ; cuando el arco no ha comenzado a arder, una cantidad de aire por unidad de tiempo Q_1 , entra, y la mis-

ma cantidad sale por S2, es decir $Q_1 = Q_2$. Suponiendo que no cambia la presión ni la temperatura en el tubo y por lo tanto las velocidades de entrada y salida - permanecen invariables tenemos el estado estable antes de que el arco comience a arder.

Ahora asumamos las nuevas características para un estado estable cuando por el eje arde un



arco de corriente continua, calentando el aire. En el estado estable el aire debe entrar por S1 y salir por S2, descargándose en la atmósfera, el movimiento del aire en el sentido opuesto no es posible porque provie

ne de un receptáculo a mayor presión que la atmosférica. El gas se calienta intensamente, a lo largo del arco, con el resultado que su volumen aumenta y la velocidad en S2 es mayor que en S1; la cantidad Q1 que entra, es igual a la cantidad Q2 que sale.

Antes del arco la cantidad de aire entre la sección S1 y la sección S2 es considerablemente mayor que cuando arde el arco, ya que el aire se dilata con la temperatura.

Al comenzar el arco, el exceso de aire debe escapar del tubo en el instante de la formación del arco y en los instantes siguientes: la cantidad excesiva de aire que se encontraba, escapa hacia ambos lados, por lo que el valor de Q1 desciende a Q1' y la cantidad Q2 aumenta a Q2'. Es importante la cantidad de calor absorbido por el soplo de aire que escapa, si es pequeña, Q1 decrece, y si es grande, Q1 puede adquirir valores negativos después de algún tiempo, esto significa que las corrientes grandes pueden producir un movimiento temporal invertido del chorro de aire.

Para corrientes que den valores bajos de **esparidad** del interruptor, el retorcido del aire sólo puede darse cerca del pico de corriente, cerca

de la corriente cero se mantiene el flujo correcto de aire, el estrangulamiento de la tobera es parcial y no causa mucha pérdida de la capacidad de interrupción; el decremento de la velocidad del soplo de aire se traduce solamente en un tiempo más largo de apagado del arco y en una relación menos marcada entre la capacidad de interrupción y la pendiente del voltaje de recuperación.

Para grandes corrientes el período de reversión del aire es más largo que una onda de corriente, el interruptor entonces ~~ya~~ resulta incapaz de interrumpir el arco, que da como resultado el estrangulamiento total de la tobera y que determina la capacidad máxima del interruptor.

Considerando el problema desde el punto de vista físico del proceso que resulta con el estrangulamiento de la tobera, la capacidad del interruptor aumenta al aumentar la presión del tanque almacenador. El incremento en la capacidad de interrupción no se debe a la mayor velocidad de flujo del aire, sino que tiene que convertirse más energía eléctrica en calor para que el aire en la tobera pueda moverse en dirección contraria a la natural.

3.- INTERRUPTORES CON EXAFLUORURO DE AZUFRE.

Estos interruptores son sumamente importantes y es conveniente considerar las diferentes características del SF₆:

Propiedades físicas.- El SF₆ gaseoso es incoloro, inodoro no tóxico y no inflamable. Es uno de los compuestos más estables y uno de los gases más pesados; a 20°C y a la presión atmosférica su densidad es 5 veces la del aire. El SF₆ gaseoso obedece aproximadamente a la ley de los gases perfectos: $PV = nRT$, por lo tanto - existe sólo un pequeño cambio en la presión con grandes cambios de temperatura.

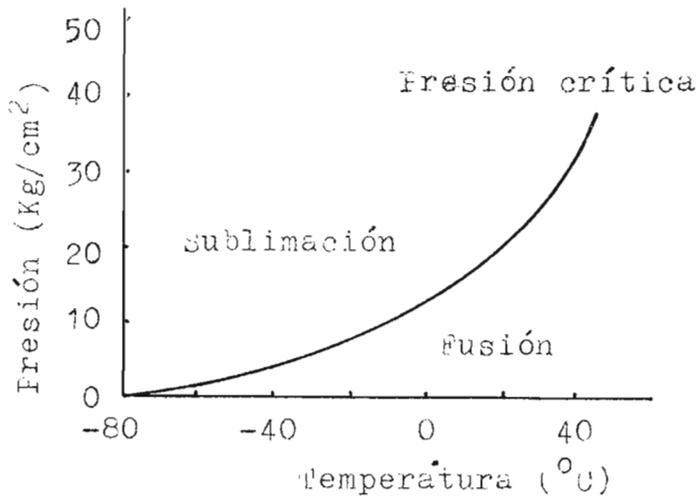
De la curva de la presión de vapor contra temperatura se ve que el punto de sublimación a presión atmosférica es -64°C con el resultado de que el gas posee mejor resistencia dieléctrica a bajas - temperaturas que otros gases. Como la presión de vapor del SF₆ es alta a bajas temperaturas, la rigidez die-

létrica, que se incrementa con la presión, también es alta. El punto de licuefacción del gas es -51°C a la presión de $2,2 \text{ Kg/cm}^2$, y se eleva a $45,5^{\circ}\text{C}$ a la presión de 37 Kg/cm^2 .

El coeficiente de conductividad térmica a la presión atmosférica es 1,6 veces mayor que el del aire y a la presión de 2 Kg/cm^2 es aproximadamente 2,5 veces el del aire a la presión atmosférica; esta propiedad es importante, porque facilita la disipación rápida del calor y reduce la elevación de la temperatura del equipo que emplee SF₆.

Propiedades químicas.- El SF₆ es un halógeno cuya estructura molecular comprende un átomo central de azufre ligado a seis átomos de fluor colocados en los vértices de un octaedro. Es un gas de los más inertes; a temperaturas inferiores a 500°C no ataca ningún material, excepto ciertos compuestos fluorados, y permanece estable a temperaturas a las que el aceite se oxida y se descompone.

A la temperatura del arco eléctrico, se descompone en sub-fluoruros, pero el grado de descomposición es muy pequeño, se necesitan más de 100 interrupciones de alta potencia para descomponer 25 dm^3 a la presión atmosférica. Este pequeño valor de descom-



Curva de presión de vapor
para el SF6.

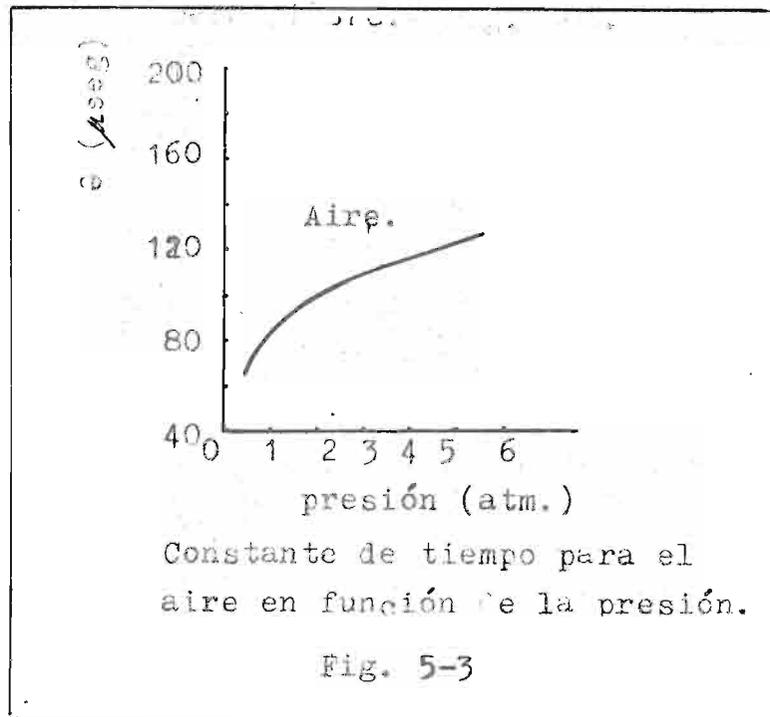
Fig. 5-2.

posición se debe al hecho de que la mayoría de los productos de la descomposición se recombinan inmediatamente para dar nuevamente SF6, lo que quiere decir que el SF6 permanece prácticamente intacto. Los productos principales de la descomposición son: el difluoruro de azufre y el tetrafluoruro, que es absorbido por aluminio activado.

Durante el paso del arco se producen fluoruros metálicos, que se depositan como un polvo blanco de gran valor dieléctrico, por lo que no causa problemas.

Propiedades eléctricas.- La rigidez dieléctrica del SF6 a la presión atmosférica es más o menos dos veces la del aire, CO2 o nitrógeno.

La rigidez dieléctrica que es 30% menor que en aceite, a la presión atmosférica, aumenta rápidamente con el incremento de la presión. Alcanza un valor igual al del aceite a una presión de 650 gr/cm² y a una presión de 1250 gr/cm² es 15% mayor. La mezcla de aire y exafluoruro no tiene mucha importancia en la rigidez dieléctrica, una mezcla con 20% de aire la reduce en un 5%.



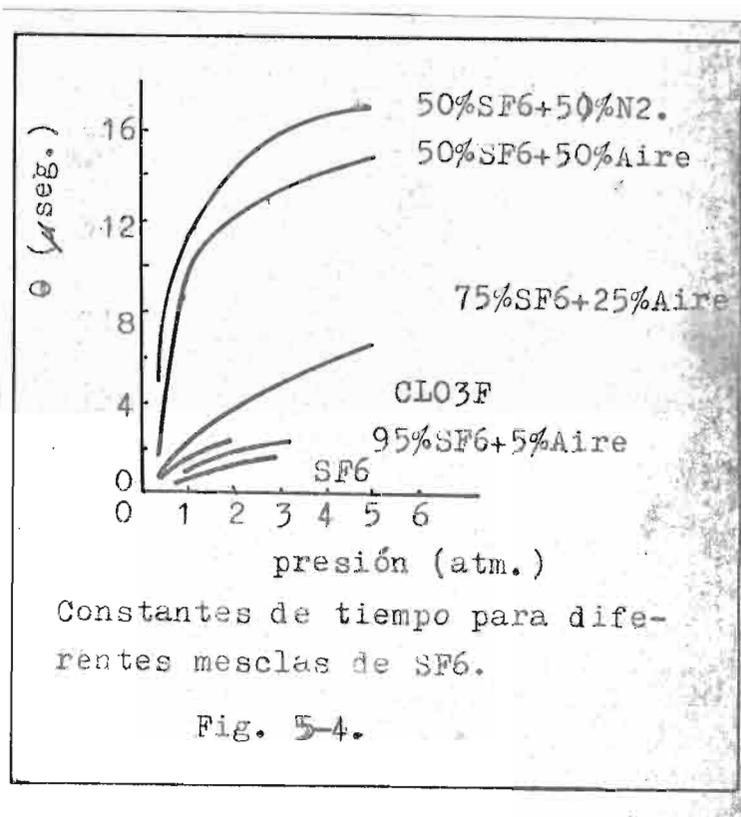
El SF₆ es uno de los gases más electronegativos, sus moléculas tiene una gran afinidad con los electrones libres, formando iones de SF₆, que por ser muy pesados no actúan como portadores de corriente.

El tamaño de la molécula es $4 \cdot 10^{-8}$ cm que es igual al diámetro teórico que da la probabilidad de choque molecular en un 100%, esta es la característica que da al SF₆ sus excelentes cualidades dieléctricas y por la que los fenómenos físicos que se producen en el arco y en la extinción son muy diferentes a los de otros gases.

El voltaje disruptivo es 2,4 veces mayor que el del aire, y la corriente que puede interrumpir es muchas veces mayor que la que puede interrumpir el aire en idénticas condiciones, ya que la constante de tiempo $\theta = Q_0/N$, es muchas veces menor que la del aire.

La electronegatividad del SF₆ hace que el arco quede rodeado por una cubierta de iones negativos que forman una capa aislante que reduce el diámetro de la columna y disminuye la energía térmica que puede contener, por lo que Q_0 disminuye.

El coeficiente de conductividad térmica del SF₆ es mayor que el del aire, por lo que se extrae



rapidamente el calor del arco, lo que da un valor grande de N . Combinados un valor pequeño de Q y un valor grande de N , dan un valor muy pequeño de θ .

Considerando la fórmula simplificada para el valor límite del voltaje de recuperación, cuando el voltaje de caída en el arco es pequeño con relación al voltaje aplicado: $u = u_{\text{arc}}/8 (\theta \cdot \omega)^2$, se ve que el valor de la frecuencia puede ser mucho mayor que para el aire; lo que explica por qué el interruptor de SF6 no está influenciado por la frecuencia natural del cir

cuito ni por la distancia a la falla.

En el interruptor de SF6 el arco se extingue por disipación radial del calor en una cámara cilíndrica de gran diámetro, este proceso se acelera al impulsar SF6 a la cámara a una presión de 14 Kf/cm^2 el soplo es tan violento como en los interruptores de aire y el arco se apaga casi sin producir sobrevoltajes. Por esta razón los interruptores de SF6 son aconsejables para abrir líneas en vacío y para bancos de capacitores de alto voltaje, en los que la velocidad de recuperación de la rigidez dieléctrica entre contactos es de especial importancia.

4.- INTERRUPTORES CON CAMPO MAGNETICO.

La figura 5-5, muestra diagramaticamente un interruptor en el cual el arco se extingue por medio de un campo magnético. La corriente que se va a interrumpir energiza la bobina que envuelve la cámara de extinción. El arco arde entre los contactos durante el movimiento del brazo desconectador hacia la posición de abierto, y el campo magnético lo empuja hacia la cámara, donde se extingue. El arco pasa a través de unas cornetas que al principio se van separando y luego siguen una dirección paralela. La bobina de soplado generalmente no está conectada permanentemente al circuito, durante el proceso de apertura se energiza automáticamente por medio de un contacto auxiliar. Es importante conectar la bobina en la polaridad correcta de tal manera que la fuerza sea hacia la cámara de extinción.

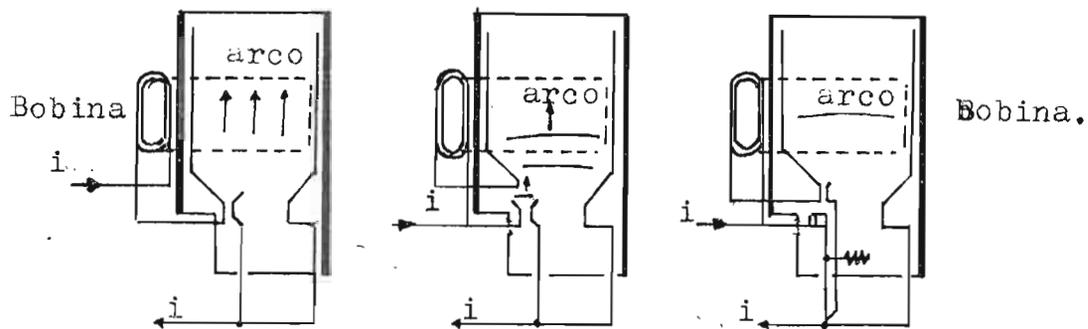


Diagrama de las formas de conexión de la bobina en interruptores magnéticos : Conexión permanente, conexión por arco --- auxiliar, y conexión por contactos auxiliares.

fig. 5-5.

El campo magnético no es por si mismo un medio de extinción. El factor decisivo es el movimiento rápido del arco en el aire y su penetración en la rejilla de extinción (favorece la desionización). A medida que el arco se mueve, va creciendo su longitud, con una velocidad : $v_l = dl/dt$, donde l es la longitud del arco; la velocidad transversal es : $v_t = ds/dt$, donde s es el paso perpendicular del arco. Es de fundamental importancia el hecho de que la velocidad de

crecimiento del arco V_1 , no tiene efecto en la caída de voltaje por centímetro del arco. Esto se ha establecido experimentalmente haciendo crecer el arco, moviendo un contacto axialmente, el arco se extingue a la misma distancia y al mismo voltaje, desde luego que el tiempo de extinción decrece proporcionalmente al incremento de velocidad.

El voltaje al cual es posible extinguir un arco que se encuentra ardiendo entre dos alambres paralelos, incrementa con el incremento de la velocidad. de crecimiento del arco, es decir con el incremento de la fuerza del campo magnético.

El hecho de que la velocidad de la elongación del arco no incrementa la gradiente de la columna positiva de la descarga, puede explicarse porque el arco no está en contacto con partículas ionizadas nuevas, pasa a través de aire que es siempre fresco, cuyo efecto de enfriamiento es mejor si el arco es estable y la corriente de aire se encuentra directamente perpendicular al eje del arco.

Bibliografía.

- .- H. Flurscheim.- The switchgear Handbook.- Vol 1.
Londres.
- .- Air Blast Circuit Breakers.- Instruction Book .
Brown Bovey.
- .- V. Delevoy.- Sulphur Hexapluoride High Voltage
circuit Breakers.- Acec Review N° 3 1960.
- .- G. P. Guaglione .- A New Line of Dead Tank SF6 High
Voltage Circuit Breakers.- Power Apparatus and Sys
tems N° 8 1970.

C A P I T U L O V I .

E S P E C I F I C A C I O N D E I N T E R R U P T O R E S .

- 1.- Características generales.
- 2.- Características específicas.
- 3.- Ejemplo de aplicación.

1.- CARACTERISTICAS GENERALES.

El tipo de interruptor que mejor se adapta a determinada parte de un sistema, ya ha sido estudiado a lo largo del trabajo; en cuanto a las características comunes de los sistemas que se deben considerar, tenemos:

1.- Voltaje del sistema.- Los interruptores se encuentran clasificados por clases de voltajes, que corresponden a rangos que reúnen varios voltajes nominales más o menos cercanos.

2.- Tipo de puesta a tierra.- Señala los tipos de aislamientos que se deben utilizar.

3.- Frecuencia nominal.- Que se la considera tanto para estimar el calentamiento de las partes que conducen la corriente, como para la determinación de la pendiente del voltaje fundamental de recuperación.

4.- Frecuencia natural.- Con el circuito equiva-

lente del sistema, o utilizando tablas, se puede conocer la frecuencia natural del sistema.

5.- Potencia de cortocircuito.- En los puntos en los que se va a instalar los interruptores.

6.- Nivel de aislamiento.- Debe coordinar con el nivel de aislamiento de todo el sistema. El nivel de aislamiento del espacio entre contactos debe corresponder al de los aislamientos internos de los transformadores.

7.- Tiempo máximo de interrupción.- Con la tendencia a reducir a un mínimo la duración de los cortocircuitos, debe tener en cuenta la coordinación entre relés en diferentes puntos y el ahorro en potencia del interruptor, con mayor tiempo de despeje.

8.- Tiempo de reenganche.- Está dado por el tiempo necesario para la desionización del paso del arco de la falla, y por el tiempo que no produzca perturbaciones en la estabilidad de los generadores.

Los tiempos necesarios para la desionización del paso del arco de un cortocircuito, varían desde 0,10 seg. para 10 kV hasta 0,3 seg. para 150 kV; Cuando la estabilidad no se encuentra muy afectada, el tiempo de reenganche puede ser de 0,25 seg.

2.- CARACTERISTICAS PARTICULARES.

Los interruptores deben reunir varios requisitos para encontrarse en condiciones de prestar el servicio en el punto considerado de la red, con la seguridad correspondiente.

1.- Corriente de ruptura.- Esta corriente, depende en valor eficaz de los valores eficaces de la corriente inicial de cortocircuito (I_{ci}) y de la corriente permanente de cortocircuito (I_{cp}).

$$I_r = I_{cp} + (I_{ci} - I_{cp}) K$$

La primera semionda de la corriente de cortocircuito, que comprende la corriente unidireccional, define la corriente total inicial de cortocircuito (I_c), el valor eficaz de esa corriente, es la corriente inicial de cortocircuito (I_{ci}).

K es una constante que depende del tiempo

po que transcurre desde que se inicia el cortocircuito hasta que se separan los contactos del interruptor, y decrece con el aumento del tiempo.

El coeficiente K, puede tener los valores de la siguiente tabla:

Seg.	0	.05	.1	.15	.2	.3	.5	1	1.5	2	2.5	3
K	1	.85	.75	.68	.6	.5	.4	.25	.15	.1	.05	0

2.- Capacidad de ruptura.- Para corrientes trifásicas es el valor del producto de $\sqrt{3}$ por la tensión de ejercicio entre dos fases por la corriente de ruptura.

$$Pr = \sqrt{3} \times U \times Ir$$

3.- Corriente de corto tiempo momentanea.- Es la corriente total inicial de cortocircuito. La amplitud de la corriente inicial de cortocircuito, multiplicada por 1,8, da la amplitud de la corriente total inicial:

$$Ic = Ici \times \sqrt{2} \times 1,8$$

4.- Corriente de cortocircuito para cuatro segundos.- Es la corriente inicial de cortocircuito (Ici).

5.- Nivel mínimo de aislamiento con baja frecuencia.- Se considera que en condiciones normales de servicio, los sobrevoltajes producidos por la interrupción de circuitos con factores de potencia bajos, raras veces causan picos de voltajes a tierra, mayores que:

$$4\left(\frac{E}{\sqrt{3}} \times \sqrt{2}\right) = 3,3 E$$

que es el nivel para aislamiento de baja frecuencia.

6.- Nivel mínimo de aislamiento para onda de impulso.- El nivel mínimo para ondas de impulso, se encuentra tabulado para cada nivel de voltaje nominal.

Para sistemas solidamente puestos a tierra se tiene:

Impulso (kV)	150	190	160	330	450	550	630	730	1050
V. nominal (kV)	22	33	44	66	88	110	132	165	220

3.-EJEMPLO DE APLICACION.

Se va a seleccionar los interruptores para la barra DA, del sistema cuyo diagrama se acompaña.

Los valores de flujo de carga que se indican, son para 100% de carga, y dan la corriente de trabajo continuo de los interruptores.

Los valores de cortocircuito se obtuvieron para cortocircuito en las barras.

Los valores de las corrientes de cortocircuito trifásico, obtenidos a partir de las componentes de secuencia positiva, negativa y cero, para la barra DA, y las barras conectadas a ella son:

Barra DA:

Suma de corrientes de sec. positiva : 8,07 pu
Suma de corrientes de sec. negativa : 8,07 pu
Suma de corrientes de sec. cero : 7,60 pu

De donde:

$$X_1 = 12,40\% ; \quad X_2 = 12,40\% ; \quad X_0 = 13,18\% ; \quad X = 37,98\%$$

$$i_a = 2,64 \text{ pu}$$

$$\text{Desde DC} = 2,02 \text{ pu}$$

$$\text{Desde Dj} = 1,66 \text{ pu}$$

$$\text{Desde DB} = 1,24 \text{ pu}$$

$$\text{Desde C} = 3,04 \text{ pu}$$

Barra DC

Suma de corrientes de sec. positiva : 7,62 pu
Suma de corrientes de sec. negativa : 7,62 pu
Suma de corrientes de sec. cero. : 4,60 pu

De donde:

$$X_1 = 13,12\% ; \quad X_2 = 13,12\% ; \quad X_0 = 20,8\% ; \quad X = 47,04\%$$

$$i_a = 2,125 \text{ pu}$$

$$\text{Desde DA} = 2,16 \text{ pu}$$

$$\text{Desde DD} = 4,21 \text{ pu}$$

Barra DB

$$\text{Suma de corrientes de sec. positiva} : 6,26 \text{ pu}$$

$$\text{Suma de corrientes de sec. negativa} : 6,26 \text{ pu}$$

$$\text{Suma de corrientes de sec. cero} : 3,09 \text{ pu}$$

De donde:

$$X_1 = 15,97\% ; \quad X_2 = 15,97\% ; \quad X_0 = 32,36\% ; \quad X = 64,3\%$$

$$i_a = 1,555 \text{ pu}$$

$$\text{Desde DA} = 2,656 \text{ pu}$$

$$\text{Desde DI} = 2,004 \text{ pu}$$

Barra DJ

Suma de corrientes de sec. positiva : 8,21 pu

Suma de corrientes de sec. negativa : 8,21 pu

Suma de corrientes de sec. cero : 4,54 pu

De donde:

$$X_1 = 12,18\% ; \quad X_2 = 12,18\% ; \quad X_0 = 22,08\% ; \quad X = 46,8\%$$

i_a

Desde DA = 1,638 pu

Desde DI = 1,384 pu

Desde EA = 1,96 pu

Desde DD = 1,471 pu

Con estos datos y teniendo en cuenta que X desde el punto de falla es 37,98% en las tablas de Komprda (Cap. III) podemos ver los coeficientes necesarios para encontrar la potencia de ruptura de los disyuntores de las líneas que salen de la barra DA.

Línea DC-DA.

$$I_{cp} = 2,02 \text{ pu}$$

$$I_{cp} = 2,02 \times 525 = 1060 \text{ A.}$$

$$I_{ci} = 1060 \times 4,86 = 5.170 \text{ A.}$$

$$I_c = 1060 \times 8,17 = 8.650 \text{ A.}$$

$$I_r = 1060 + (1060 \times 4,86 - 1060) \times 0,8 = 4.350 \text{ A.}$$

$$P_r = 4.350 \times 110 \times \sqrt{3} = 830 \text{ MVA}$$

Línea DJ-DA.

$$I_{cp} = 1,66 \text{ pu}$$

$$I_{cp} = 871 \text{ A.}$$

$$I_{ci} = 871 \times 4,86 = 4240 \text{ A.}$$

$$I_c = 871 \times 8,17 = 7.100 \text{ A.}$$

$$I_r = 871 + (871 \times 4,86 - 871) \times 0,8 = 3.570 \text{ A.}$$

$$P_r = 3.570 \times 110 \times \sqrt{3} = 680 \text{ MVA.}$$

Línea DB-DA.

$$I_{cp} = 2,64 - 1,24 = 1,40 \text{ pu}$$

$$I_{cp} = 736 \text{ A.}$$

$$I_{ci} = 736 \times 4,86 = 3.590 \text{ A.}$$

$$I_c = 736 \times 8,17 = 6.000 \text{ A.}$$

$$I_r = 871 + (3.590 - 871) \times 0,8 = 3.012 \text{ A.}$$

$$P_r = 3.012 \times 110 \times \sqrt{3} = 575 \text{ MVA.}$$

Línea Gen.-DA.

$$I_{cp} = 3,04 \text{ pu}$$

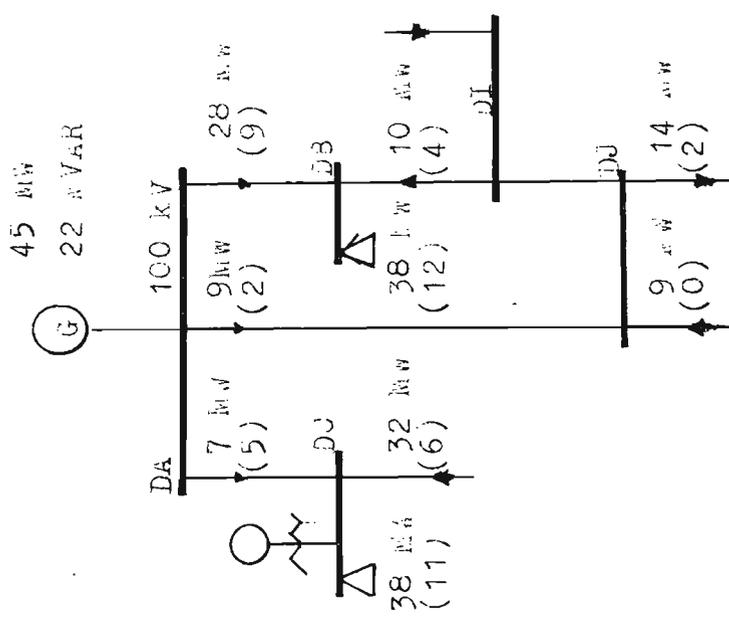
$$I_{cp} = 1595 \text{ pu}$$

$$I_{ci} = 7.760 \text{ A.}$$

$$I_c = 13.000 \text{ A.}$$

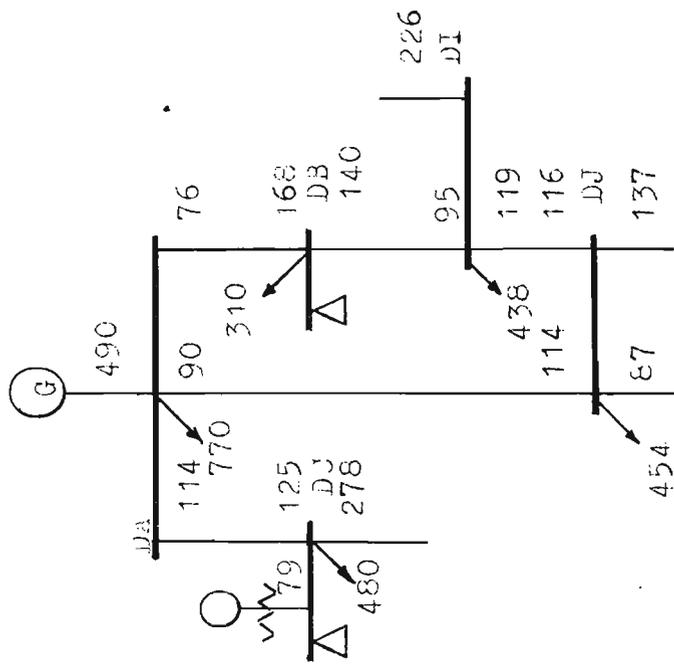
$$I_r = 1.595 + (7.760 - 1.595) \times 0,8 = 6.520 \text{ A.}$$

$$P_r = 6.520 \times 110 \times \sqrt{3} = 1.240 \text{ MVA.}$$



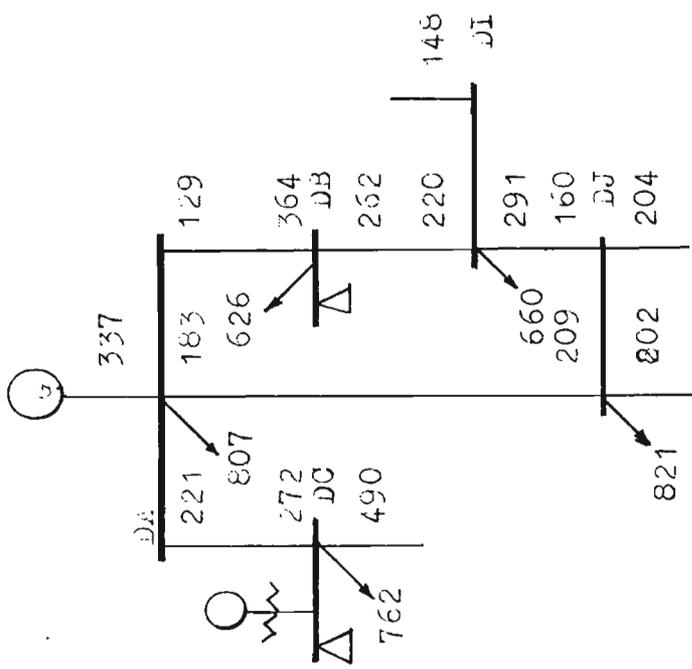
FLUJO DE POTENCIA

100% DE JARGA.

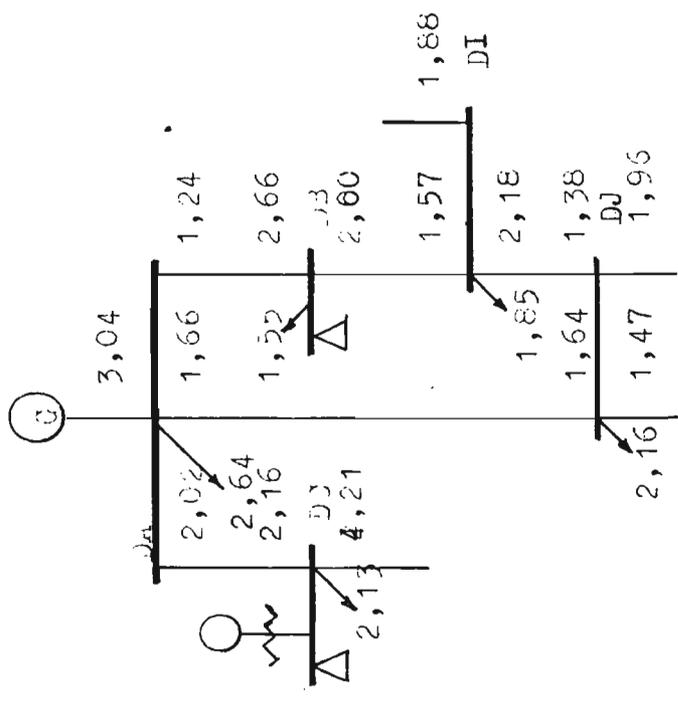


CORRIENTES DE SECUENCIA

CERC. MVA_B = 100 MVA



CORRIENTES DE SECUENCIAS POSITIVA Y NEGATIVA.



CORRIENTES DE CORTOCIRCUITO DE FALLA TRIFASICA (I_u).

.- Interruptor para la línea DB-DA.

El interruptor puede ser trifásico de aceite o de volumen reducido de aceite, de funcionamiento completamente automático, para montaje a la intemperie.

Características.

Voltaje nominal del sistema. (kV).....	110
Puesta a tierra del sistema.....	sólida
Altitud sobre el nivel del mar.....	2.800 m
Frecuencia.....	60 c
Fases.....	3
Corriente de servicio (A).....	1.200
Capacidad de interrupción CA-15 seg-CA (MVA).....	575
Corriente de interrupción (A).....	3.0 12
Corriente de corto tiempo momentanea (A).....	6.000
Corriente de corto tiempo de 4 seg. (A).....	3.590
Tiempo máximo de interrupción.....	5 c
Tiempo de recierre automático.....	20 c
Nivel mínimo de aislamiento con baja frecuencia.	310 kV
Nivel mínimo de impulso, kV cresta a cresta.....	650

Bibliografía:

C. H. Flurscheim.- The Switchgear Handbook. Vol 1.-
Londres.

Gaudencio Zoppety.- Estaciones Transformadoras y de
Distribución.- Ed. Gustavo Gili S.A.

C A P I T U L O V I I .

R E S U M E N Y
C O N C L U S I O N E S .

Teniendo en cuenta las capacidades que se deben manejar en los sistemas modernos, el control de los sistemas eléctricos constituye un problema sumamente importante. El aparato que pueda manejar tanto corrientes normales, como corrientes de falla, es totalmente necesario.

Los disyuntores en consecuencia son elementos indispensables en toda instalación.

Se analiza la relación que existe entre las características de las redes y las características del aparato en las diferentes circunstancias desde el punto de vista de la utilización en la ingeniería, haciendo las demostraciones matemáticas in--dispensables.

El primer capítulo trata sobre la operación de maniobra y las características que se de--ben considerar. La explicación general sobre el proceso de interrupción, el funcionamiento del interruptor y una relación entre las características mecánicas y las características eléctricas.

El segundo capítulo se refiere a la física del arco. La forma en que se da el arco, como resultado natural del proceso de interrupción, comparando el proceso en el interruptor real con el que se daría en un interruptor ideal, analizando los problemas fundamentales de : sincronización y velocidad de interrupción. Estudia el proceso transitorio durante el tiempo que está ardiendo el arco, y también la situación de la columna residual en cuanto a la relación entre el crecimiento de la rigidez dieléctrica en gases a alta temperatura, las características de sus regiones principales, los elementos que transportan la corriente y sus relaciones con las diferentes cantidades físicas que determinan el plasma, como la gradiente de temperatura, la transferencia de energía entre regiones, el proceso de conducción, de radiación y la relación entre la constante de tiempo, las propiedades del gas y la geometría del arco.

Hace un análisis de las características estática y dinámica del arco, Considera también la utilización de la energía proporcionada por el arco para su propia extinción.

El capítulo tercero, estudia las corrientes

tes que corta el interruptor, la corriente inductiva, la corriente capacitiva, y la forma de calcular corrientes de cortocircuito dentro del rango de exactitud necesario en esta clase de problemas.

Examina la corriente de post-arco en cuanto a la relación con el balance de energía y la variación de temperatura.

El cuarto capítulo hace un análisis del voltaje de recuperación, su relación con las resistencias que se encuentran en el circuito y las atenuaciones que sufre. Presenta los casos en los cuales los esfuerzos de voltaje son especialmente grandes.

Analiza el proceso que sucede en el punto cero de corriente, es decir en el momento mismo de la interrupción, con las relaciones entre la corriente y el voltaje, para diferentes tipos de interruptores.

El capítulo quinto, hace referencia a las más importantes particularidades de algunos tipos de interruptores. En los de aceite al suyo de distintas formas de cámaras de explosión, en los interruptores neumáticos, a la forma en que se llega al límite máximo de potencia de ruptura, en los inter-