



Universidad Nacional Autónoma de México

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES
CUAUTITLAN

ESTUDIO Y ESTABLECIMIENTO DE UN SISTEMA
DE PROTECCION EN UN SISTEMA ELECTRICO
DE POTENCIA.

TESIS PROFESIONAL

Que para obtener el título de
INGENIERO MECANICO ELECTRICISTA

presentan:

OSCAR CERVANTES TORRES

FERNANDO MANUEL ESPINOSA AGUILAR

JAIME RODRIGUEZ MARTINEZ

Director de la Tesis: ING. JOSE ANGEL LOPEZ BUCIO

1 9 8 2



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

INDICE

I.- INTRODUCCION.

- I.1.- Características Generales de los Sistemas Eléctricos de potencia.
- I.2.- ¿ Que es Protección ?
- I.3.- Tipos de Fallas.
- I.4.- Métodos de Protección.
- I.5.- Formas Generales de Protección.
- I.6.- Protección por relevadores electromecánicos..

II.- FUNDAMENTOS TECNICOS EN LA PROTECCION POR RELEVADORES Y ESTABILIDAD EN LOS SISTEMAS DE POTENCIA.

- II.1.- Fasores.
- II.2.- Polaridad.
- II.3.- Fallas en Sistemas de Potencia.
- II.4.- Componentes Simetricos.
- II.5.- Estabilidad en los Sistemas de Potencia.

III.- ESTUDIO DE RELEVADORES.

- III.1.- Generalidades.
- III.2.- Características de los relevadores de protección.
- III.3.- Principios de operación de los relevadores.
- III.4.- Clasificación de relevadores.
- III.5.- División de relevadores en cuatro grupos.

IV.- PROTECCION DE GENERADORES.

- IV.1.- Causas de las diferentes fallas y dispositivos de

protección.

- IV.2.- Protección contra sobrecargas y cortos circuitos exteriores.
- IV.3.- Protección contra sobretensiones debidas a maniobras normales de excitación.
- IV.4.- Protección contra las cargas asimétricas.
- IV.5.- Protección contra el funcionamiento del generador como motor síncrono.
- IV.6.- Protección contra cortos circuitos entre fases.
- IV.7.- Protección contra los defectos a tierra en el arrollamiento del estator.
- IV.8.- Protección contra los defectos a tierra en el arrollamiento del rotor.
- IV.9.- Protección contra cortos circuitos entre espiras de la misma fase.
- IV.10.- Protección contra pérdidas de la excitación.

V.- PROTECCION DE MOTORES.

- V.1.- Generalidades.
- V.2.- Protección de sobrecorriente.
- V.3.- Protección de sobrecarga.
- V.4.- Protección contra los arcos.
- V.5.- Protección de motores trifásicos al fallar una fase.
- V.6.- Protección contra la baja tensión.
- V.7.- Protección contra la pérdida de sincronismo.

VI.- PROTECCION DE TRANSFORMADORES.

- VI.1.- Generalidades.
- VI.2.- Protección por relevador Buchhols

- VI.3.- Protección diferencial de transformadores.
- VI.4.- Protección diferencial de transformadores de dos arrollamientos.
- VI.5.- Protección diferencial de transformadores con tres arrollamientos.
- VI.6.- Protección diferencial de autotransformadores.
- VI.7.- Protección contra defectos internos de transformadores de mediana potencia.
- VI.8.- Protección de los transformadores contra sobrecargas.
- VI.9.- Protección de los transformadores contra defectos externos.

VII.- PROTECCION DE BUSES.

- VII.1.- Introducción.
- VII.2.- Sistema conector lineal o transformador de corriente con núcleo de aire.
- VII.3.- Sistema diferencial multilimitante.
- VII.4.- Sistema diferencial de impedancia y voltaje elevados.
- VII.5.- Protección diferencial de sobrecorriente.
- VII.6.- Protección diferencial parcial.
- VII.7.- Protección por comparación direccional.
- VII.8.- Método del bus de falla.
- VII.9.- Protección diferencial de corriente con relevadores de porcentaje.
- VII.10.- Protección diferencial de corriente con relevadores de sobretensión.
- VII.11.- Protección combinada de transformadores de potencia

y barra colectora.

VIII.- PROTECCION DE LINEAS.

VIII.1.- Clasificación de líneas.

VIII.2.- Formas de protección.

VIII.3.- Tipos de fallas.

VIII.4.- Protección de líneas con relevadores de sobrecorriente.

VIII.5.- Como ajustar los relevadores de sobrecorriente de tiempo inverso para la coordinación.

VIII.6.- Protección de líneas con relevadores de distancia.

VIII.7.- Ajuste de un relevador de distancia.

VIII.8.- Protección de líneas con relevadores piloto.

VIII.9.- Descripción de un esquema de protección.

VIII.10.- Esquema de protección de hilo piloto de C.A.

IX.- ESTABLECIMIENTO DE UN PROGRAMA DE MANTENIMIENTO PREVENTIVO AL SISTEMA DE PROTECCION.

IX.1.- La importancia del mantenimiento.

IX.2.- Filosofía del mantenimiento.

IX.3.- Funciones de la Ingeniería de mantenimiento.

IX.4.- Seguridad de operación de los relevadores de protección.

IX.5.- Mantenimiento de los relevadores de protección.

IX.6.- Pruebas a relevadores de protección.

X.- EJEMPLO DE SELECCION.

XI.- Aplicación de la computadora.

XI.- CONCLUSIONES.

BIBLIOGRAFIA.

I.- INTRODUCCION.

I.1.- CARACTERISTICAS GENERALES DE LOS SISTEMAS ELECTRICOS DE POTENCIA

Un sistema eléctrico de potencia consiste en una gran diversidad de cargas eléctricas repartidas en una región, en las plantas generadoras para producir la energía eléctrica consumida por las cargas, una red de transmisión y distribución, para transportar esa energía de las plantas generadoras a los puntos de consumo y todo el equipo adicional necesario para lograr que el suministro de energía se realice con las características de continuidad de servicio, regulación de voltaje y control de frecuencia requeridas.

El suministro de energía eléctrica debe realizarse con una calidad adecuada, de manera que los aparatos que utilizan energía eléctrica funcionen correctamente. La calidad del suministro de energía eléctrica queda definida por los siguientes tres factores: 1) Continuidad de servicio, 2) Regulación de voltaje y 3) Control de la frecuencia.

I.1.1.- Continuidad de servicio. Se debe tener un servicio sin interrupciones para no provocar problemas y tener pérdidas. Para asegurar la continuidad del suministro deben tomarse las disposiciones necesarias para hacer frente a una falla en algún elemento del sistema. A continuación se mencionan las principales disposiciones:

a).- Disponer de la reserva de generación a-

decuada para hacer frente a la posible salida de servicio o indisponibilidad, de cierta capacidad de generación.

b).- Disponer de un sistema de protección automático que permita eliminar con la rapidez necesaria cualquier elemento del sistema que ha sufrido una avería.

c).- Diseñar el sistema de manera que la falla y la desconexión de un elemento tenga la menor repercusión posible sobre el resto del sistema.

d).- Disponer de los circuitos de alimentación de emergencia para hacer frente a una falla en la alimentación normal.

e).- Disponer de los medios para un restablecimiento rápido del servicio disminuyendo así la duración de las interrupciones, cuando estas no sean evitadas.

I.1.2.- Regulación de voltaje. Los aparatos que funcionan con energía eléctrica están diseñados para operar a un voltaje determinado y su funcionamiento será satisfactorio siempre que el voltaje aplicado no varíe más allá de ciertos límites.

I.1.3.- Control de la frecuencia. Los sistemas de energía eléctrica funcionan a una frecuencia determinada, dentro de cierta tolerancia. En general el equipo eléctrico de un sistema y los aparatos de utilización están diseñados para funcionar también a una determinada frecuencia.

La energía eléctrica ha adquirido tal importancia en la vida moderna, que una interrupción de su suministro o una mala calidad de suministro causaría transtornos y pérdidas económicas considerables. Para esto, todo sistema de protección que se utilice para proteger al sistema de potencia debe llenar varios requisitos como son: a) debe ser confiable, b) debe ser selectivo, c) debe operar rápidamente, si no se cumplen estos requisitos, la protección sería completamente inefectiva e incluso podría convertirse en un peligro.

I.2.- ¿ QUE ES PROTECCION ?

Un sistema eléctrico existe para proveer a la humanidad de energía eléctrica la cual, mediante un grupo de aparatos o máquinas puede convertir esta energía en movimiento, luz, calor, etc. indispensable para la vida moderna. Como todo sistema eléctrico está formado por partes creadas por el hombre, por lo tanto, está sujeto a fallas. El conjunto de aparatos y sistemas puestos al servicio del sistema eléctrico, que vigilan que se cumpla adecuadamente el propósito para lo que fue creado, es lo que se conoce como protección.

Con el desarrollo de los sistemas y sus frecuentes interconexiones, las condiciones han cambiado radicalmente y la técnica de la protección ha evolucionado, considerándose ahora en primer lugar las medidas tendientes a mantener la estabilidad del conjunto por la eliminación rápida y efectiva de los elementos fallantes y dejando al ul-

timo las que tienden a la conservación de los elementos la razón es que ahora se dispone de elementos duplicados y aún triplicados de cada especie y además porque cuesta más una hora de interrupción general que la reparación de un elemento perjudicado por sobrecarga.

I.3.- TIPOS DE FALLAS.

En un sistema eléctrico de potencia se deben mantener protegidas las instalaciones y las redes de alimentación de: 1) Fallas producidas por fenómenos atmosféricos que inciden sobre las líneas de transmisión o cerca de las mismas. 2) Fallas por fenómenos internos en los elementos del sistema, como: a) fallas de aislamiento (desviación de la trayectoria normal de la corriente), b) fallas de conducción (desaparición de los elementos conductores de un sistema causando la interrupción indebida de la corriente o una caída de potencial exagerada), y c) fallas de operación (cuando los elementos del sistema son sometidos a condiciones anormales al ser operados inadecuadamente). Proteger las instalaciones eléctricas reducirá el tiempo de interrupción, ya que de otra forma originaría pérdidas económicas por daños o destrucción del equipo y por energía no suministrada al consumidor.

I.4.- METODOS DE PROTECCION.

Para proteger en forma eficiente las instalaciones y los diversos equipos que comprenden el sistema, es necesario recurrir a los siguientes métodos de protección,

los cuales son:

I.4.1.- Protección Primaria. Protege una zona determinada alrededor de cada elemento; cualquier falla que ocurra dentro de ésta zona, originaría el disparo de los interruptores que se encuentran en su ámbito.

I.4.2.- Protección de Respaldo. Protege los circuitos adyacentes en cada extremo remoto, así como también de fallas de corto circuito originadas fuera de la zona que protege la protección primaria o por falla de ésta protección.

La Protección Primaria puede fallar debido a una falta de corriente o tensión de alimentación a los relevadores, falta de tensión de disparo en la alimentación de C.D., una falla en los relevadores de protección, una falla en el circuito de disparo o en el mecanismo del interruptor o una falla en el propio interruptor.

Las protecciones, dependiendo de las fallas, deben cumplir las siguientes funciones:

a).- Aislar todo tipo de falla con alta rapidez, tanto con la protección primaria como con la protección de respaldo.

b).- Aislar una mínima protección del sistema en estas condiciones, para reducir el área interrumpida.

Proporcionar una máxima confiabilidad tanto en los relevadores como en los elementos asociados (transformadores de instrumentos, cables de control, fuentes de alimentación para control, etc.)

I.5.- FORMAS GENERALES DE PROTECCION.

I.5.1.- Fusibles.

I.5.2.- Pararrayos.

I.5.3.- Hilos de Guarda.

I.5.4.- Ventilación.

I.5.5.- Aislamientos.

I.5.6.- Sistemas de Tierra.

I.5.7.- Protecciones Físicas.

I.5.8.- Protección por Relevadores.

I.5.9.- Protección por Dispositivos Electrónicos.

La protección evita fallas y disminuye los efectos de estas. Con aislamientos adecuados se mantiene en operación correcta evitando que agentes externos intervengan en el funcionamiento; dando distancias y capacidades adecuadas se puede evitar fallas debidas a agentes externos. Dotando de un sistema de ventilación efectivo al equipo eléctrico, se expulsa el acumulamiento de energía nociva. Diferentes alturas de conexiones de partes metálicas al sistema de tierra, señales y herramientas adecuadas evitan falla o fallas y accidentes.

Los pararrayos son aparatos que disminuyen los efectos de sobretensiones creadas en el sistema interior por agentes exteriores e interiores, por ejemplo, descargas atmosféricas, operación de interruptores desviando sus efectos hacia tierra.

Los hilos de guarda y demás hilos son sistemas de protección con finalidad semejante. Interruptores o fusibles llevan en sí ciertas capacidades interruptivas, por lo que pueden desligar una parte del sistema que ha sido afectada por una falla disminuyendo así los estragos que pudiera ocasionar ésta. Los fusibles debido a su elemento térmico al suceder una falla se funde éste y en esta forma aíslan la falla.

En cambio los interruptores deberán recibir una señal de apertura de relevadores que detectan la falla y por ésta razón un interruptor sin relevadores nada más es un aparato para abrir sin carga o cerrar con ella.

I.6.- PROTECCION POR RELEVADORES ELECTROMECHANICOS.

Todo sistema eléctrico debe ser protegido mediante uno o varios sistemas que sean prácticos. Para que un sistema fuera protegido en forma correcta tendrían que usarse muchas protecciones ya que el sistema protector puede fallar también, sin embargo desde el punto de vista práctico y económico se abandonan los que resultan ser más complicados y costosos.

Las características esenciales del sistema eléctrico son: voltaje, corriente, frecuencia, fase, polaridad, potencia, etc. las cuales se alteran al suceder una falla en el sistema. Los relevadores tienen conocimiento de una o varias de estas características y están arreglados para mantenerse inactivos mientras no varían estas; al ocurrir --

una falla el relevador selecciona la característica del sistema que le conviene y actúa sobre otros sistemas aparte, ya sea cerrando o abriendo algún contacto que pertenezca al circuito de apertura o cierre del interruptor que conviene para el aislamiento de la falla o de la parte del sistema donde se originó la falla.

Hay un elemento intermedio entre los relevadores y el sistema por proteger, los transformadores de instrumentos, que son de dos clases: transformadores de corriente y transformadores de potencial, la existencia de este eslabón es necesaria debido a las altas corrientes y altos voltajes de los sistemas por proteger y no será práctico que los relevadores fueran diseñados para soportar esos voltajes y esas corrientes.

Un relevador eléctrico es un dispositivo que colocado en un circuito eléctrico produce cambios, y en otros si no es que en su propio circuito.

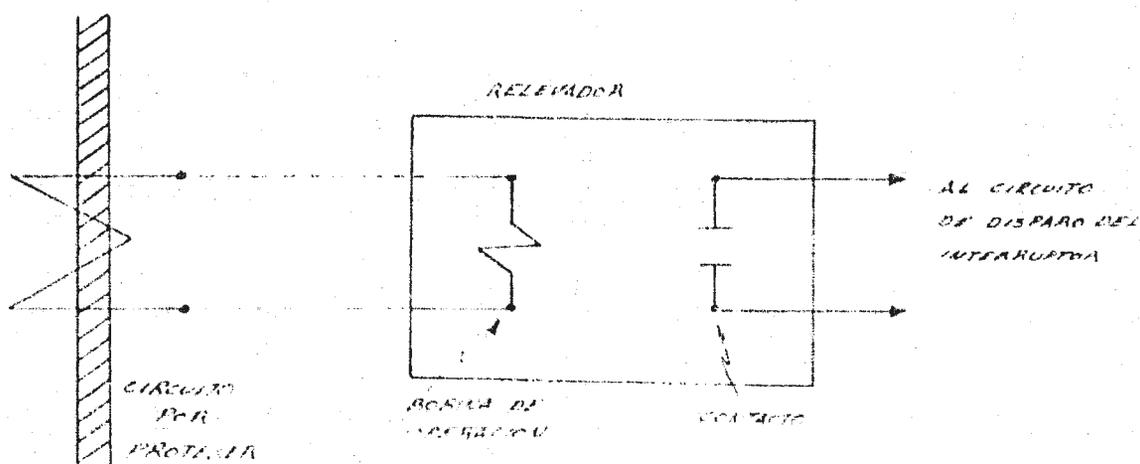


Fig.1.1.- Esquema de la disposición general de un relevador de protección.

II.- FUNDAMENTOS TECNICOS DE LA PROTECCION POR RELEVADORES Y ESTABILIDAD EN LOS SISTEMAS DE POTENCIA.

II.1.- FASORES.

En el estudio de la protección por relevadores es requisito importante tanto el tener un conocimiento general de los sistemas de potencia eléctrica como el comprender la práctica de los fasores, polaridad y componentes simétricas.

El diagrama fasorial consta de diferentes utilidades:

1.- Ayuda en la aplicación de los relevadores y para realizar las conexiones correctas.

2.- Es útil para el análisis y estudio del funcionamiento y operaciones de los relevadores antes y --- despues de una falla.

Todo diagrama fasorial debe estar acompañado por un diagrama del circuito. Si no se hace esto, entonces dicho diagrama debe ser obvio o debe suponerse con el fin de interpretar el diagrama fasorial. El diagrama fasorial muestra solamente la magnitud y el ángulo relativo de fase de las corrientes y voltajes mientras que el diagrama de conexión muestra la localización, la dirección y la polaridad de las corrientes y los voltajes.

Estas son distinciones importantes, y generalmente hay confusión cuando no se reconocen o combinan -- los diagramas.

II.2.- POLARIDAD.

Polaridad de transformadores: La teoría sobre la polaridad de los transformadores, en el estudio de los sistemas de protección, se aplica principalmente en el uso de transformadores de corriente o de potencial con polaridad sustractiva o aditiva.

Los signos o marcas de polaridad indican:

- 1.- Que la caída de voltaje entre la terminal marcada con polaridad y la no marcada en el primario está sustancialmente en fase con la caída entre las terminales marcada y no marcada en el secundario.
- 2.- Que la corriente que fluye de la terminal marcada en el secundario está sustancialmente en fase con la corriente que fluye hacia la terminal marcada en el primario.

La expresión " sustancialmente en fase " toma en consideración el pequeño error en el ángulo de fase.

En relevadores, la polaridad siempre está asociada con la unidad relevadora de tipo direccional. También se asocia con otras tales como los relevadores de distancia.

La polaridad del relevador se indica en los diagramas esquemáticos o de alambrado mediante un pequeño signo (+) arriba o cerca del símbolo de terminal o relevador junto con una nota que indique su significado.

Esas dos marcas son necesarias porque una sola carece de significado. Un ejemplo típico para una unidad direccional se muestra en la figura 2.1. Esto significa que cuando la caída de voltaje es de polaridad a no polaridad -

en la bobina de voltaje y en fase con el flujo de corriente de polaridad a no polaridad en la bobina de corriente, el relevador cerrará sus contactos.

El circuito de prueba que se muestra en la Fig.2.2, ilustra lo anterior.

La aplicación práctica de fasores y polaridad queda bien ilustrada considerando las unidades direccionales. Además de polaridad estas unidades poseen un ángulo de fase característico el cual debe comprenderse para conectarlas apropiadamente al sistema de potencia.

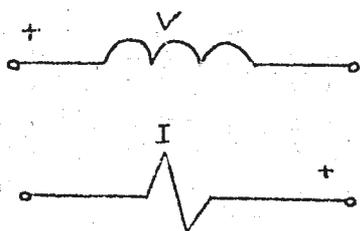


Fig.2.1.- Marcas de polaridad para relevadores. Con polaridad instantánea relativa como se muestra, los contactos se cierran.

Existen varias unidades direccionales, entre las cuales las más comunes son:

Unidad direccional tipo Watt. La característica es como se muestra en la Fig. 2.3, en este tipo de relevador los contactos se cierran todavía al cambiar la corriente de 90° de adelanto a 90° de retraso.

El torque máximo ocurre cuando el voltaje aplicado y la corriente están en fase con la polaridad co---

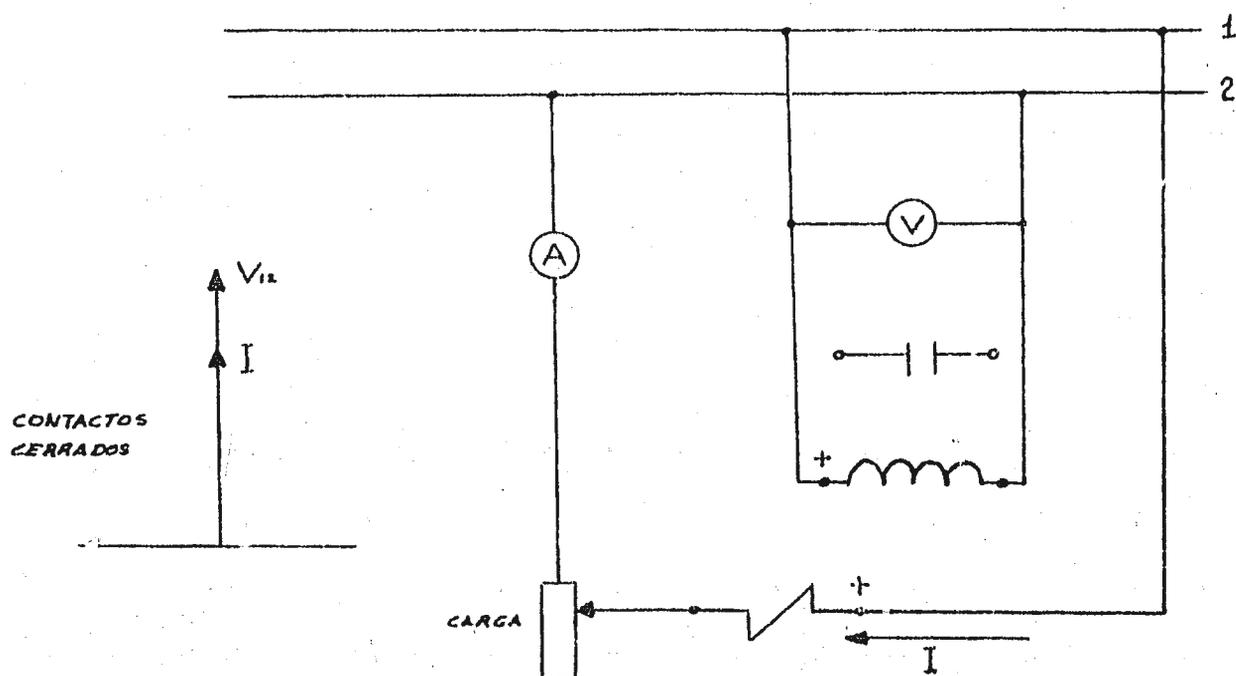


Fig.2.2.- Circuito de prueba para revisar la polaridad del relevador.

recta para cerrar los contactos. Los valores mínimos de -- contacto del relevador normalmente se especifican a éste án gulo máximo de torque. Obviamente si I atrasa o adelanta su posición de factor de potencia de unidad, se requerirá más corriente para producir el mismo torque suponiendo a V co-- mo constante hasta 90° de adelanto con 90° de atraso cuando teóricamente no resulta ningún torque para ninguna magnitud.

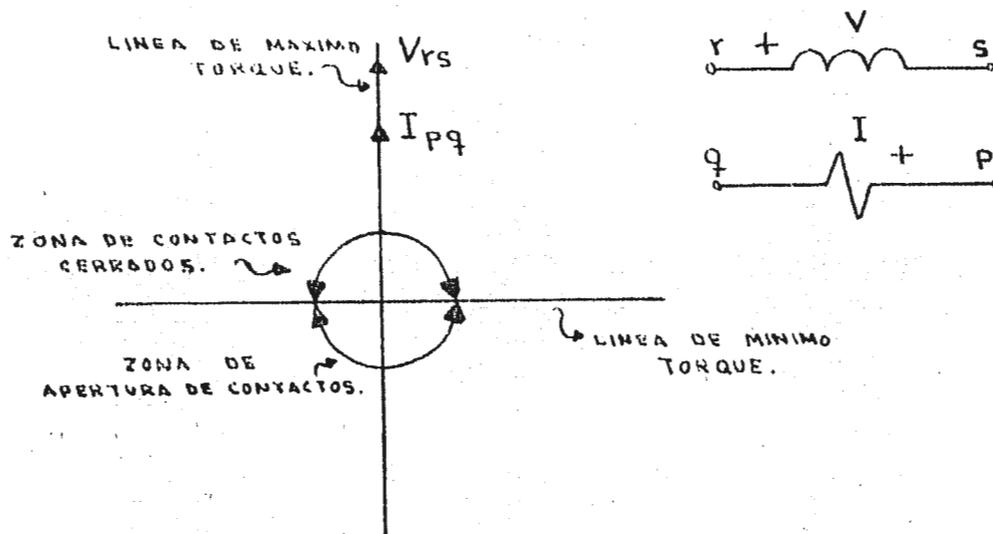


Fig.2.3.- Características de ángulo de fase para unidad re-
levadora direccional de tipo Watt.

Unidad Direccional tipo Cilindro. Esta unidad tiene un torque máximo cuando I adelanta 30° a V , así pues, el torque de cierre de contacto se produce en el área cuando la corriente se adelanta 120° hasta una corriente con 60° de retraso.

Unidad Direccional de Tierra. Estas generalmente tienen una característica de torque máximo cuando I se atrasa 60° respecto a E .

Esto puede ser inherente al diseño de la uni-
dad pero generalmente requiere de un cambiador de fase auxi-
liar.

Hasta ahora se ha discutido la característi-

ca individual de la unidad relevadora. Esta es la característica que debe medirse en la prueba de una sola fase que se describió anteriormente.

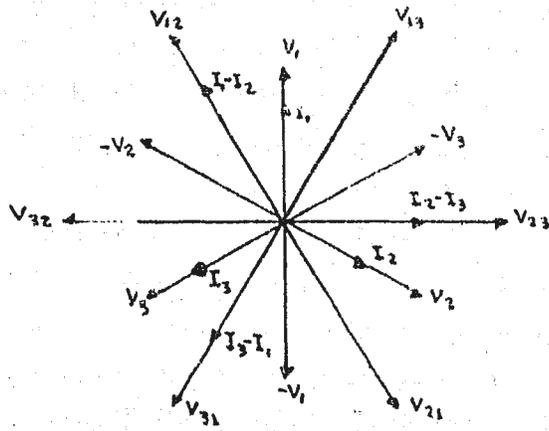
Las fallas en sistemas trifásicos de potencia pueden producir varias relaciones entre voltajes y corrientes, y por lo tanto es necesario seleccionar las cantidades adecuadas para aplicarlas a las unidades direccionales y obtener una correcta operación del relevador. Durante muchos años se han usado cuatro tipos de conexiones de elementos direccionales. Estos se muestran en la Fig. 2.4.

La conexión más adecuada para la mayoría de los sistemas es la conexión de 90° donde las cantidades del sistema aplicadas al relevador están a 90° de la corriente balanceada del factor de potencia unidad. Con ella el torque máximo puede ocurrir a varios ángulos dependiendo del diseño del relevador.

Para una mejor operación global el torque máximo debe ocurrir a 60° de retraso. Esto se llama conexión $90^\circ - 60^\circ$.

Un diagrama monofásico compuesto que ilustra la mayoría de estas conexiones y las conexiones para un relevador direccional de tierra se muestra en la Fig. 2.5.

Nº	CONEXION	TIPO DE RELEVADOR	FASE 1		FASE 2		FASE 3		OCURRE EL MAXIMO TORQUE A:
			I	V	I	V	I	V	
1	30°	WATT	I_1	V_{12}	I_2	V_{21}	I_3	V_{32}	I ATRASADA 30°
2	60° DELTA	WATT	$I_1 - I_2$	V_{12}	$I_2 - I_3$	V_{21}	$I_3 - I_1$	V_{32}	I ATRASADA 60°
3	60° ESTRELLA	WATT	I_1	$-V_2$	I_2	$-V_1$	I_3	$-V_3$	I ATRASADA 60°
4 A	90° - 45°	WATT *	I_1	V_{13}	I_2	V_{21}	I_3	V_{32}	I ATRASADA 45°
4 B	90° - 60°	CILINDRO	I_1	V_{23}	I_2	V_{31}	I_3	V_{12}	I ATRASADA 60°



* LAS CONEXIONES Y FASORES PARA LA UNIDAD TIPO WATT SON:

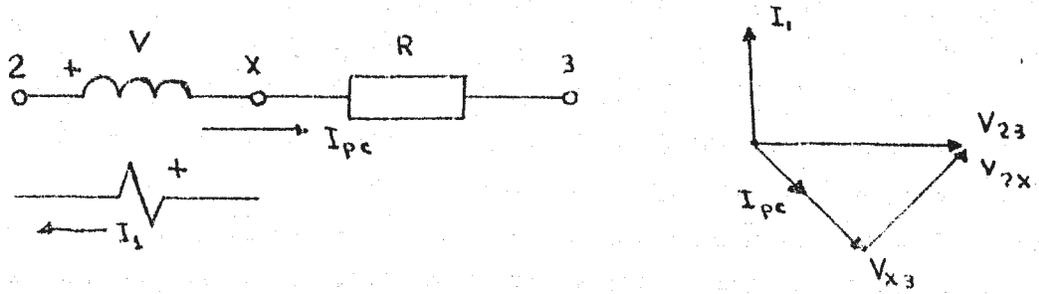


Fig.2.4.- Diversos tipos de conexiones de unidad direccional en uso común.

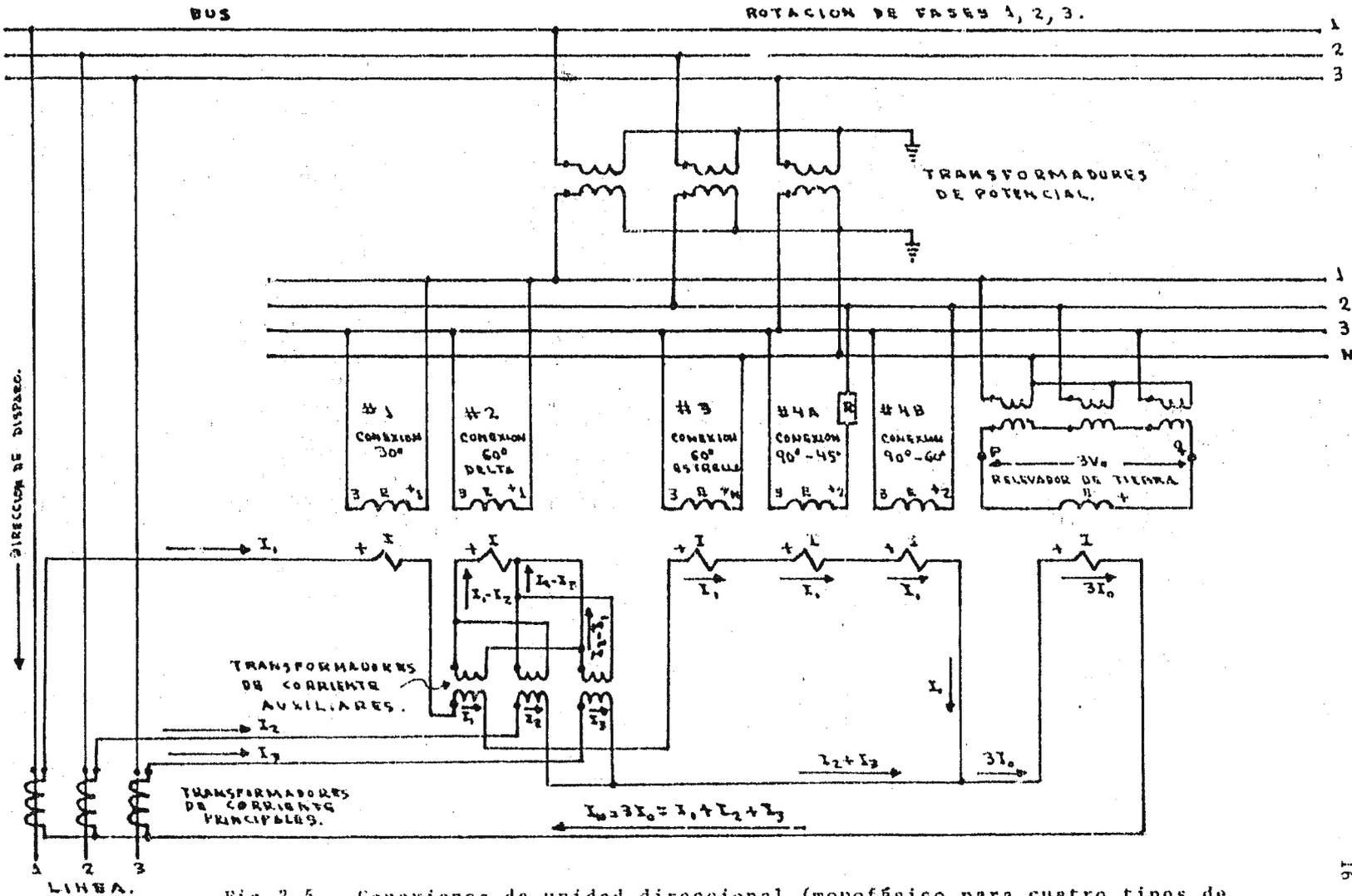


Fig.2.5.- Conexiones de unidad direccional (monofásico para cuatro tipos de conexiones además de las conexiones del relevador direccional de tierra.

II.3.- FALLAS EN SISTEMAS DE POTENCIA.

Un sistema a prueba de fallas no es práctico ni económico. Los sistemas de potencia modernos están contruidos con un nivel de aislamiento tan elevado como práctico y una flexibilidad suficiente de tal forma que uno o más de los componentes pueden quedar fuera de servicio sin la más mínima interrupción del mismo.

Es necesario el conocimiento de las condiciones existentes en un sistema durante las fallas con el fin de proporcionar una protección adecuada. Estas son las condiciones anormales que proporcionan los medios de discriminación para la operación de relevadores.

Los relevadores deben operar para varios tipos de fallas:

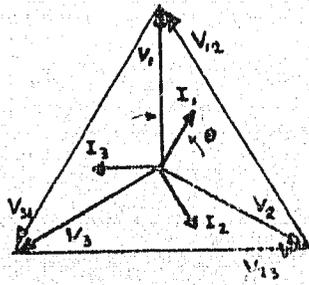
- 1.- Trifásica.
- 2.- Fase a Fase.
- 3.- Dos fases a tierra.
- 4.- Fase a tierra.

Estas se muestran en la Fig.2.6.

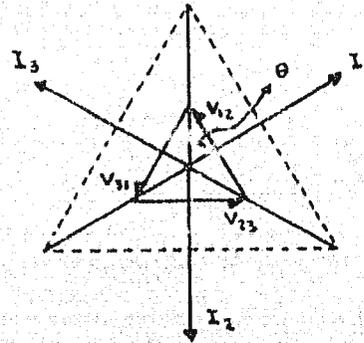
Los sistemas trifásicos de c.a. pueden dividirse en dos clases generales:

- 1.- Neutro aislado o sistema sin conexión a tierra.
- 2.- Sistemas neutrales conectados a tierra:
 - a.- Conectados a tierra sólidamente.
 - b.- Conectados a tierra a travéz de una impedancia (reactancia, resistencia).

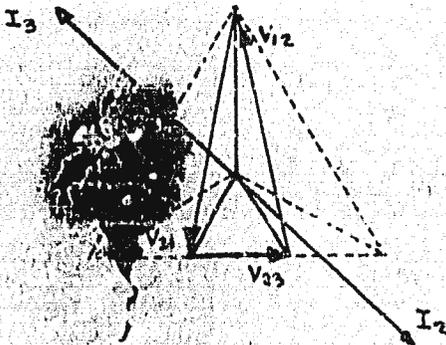
En un sistema no conectado a tierra, existe una pequeña corriente de carga que fluye hacia la tierra y-



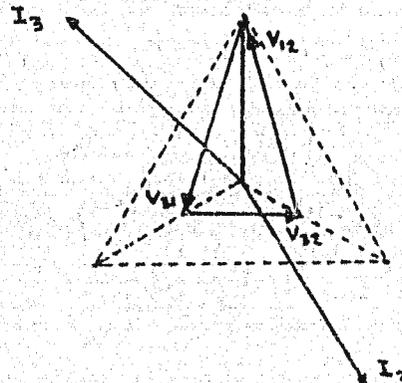
CONDICIONES NORMALES BALANCEADAS.



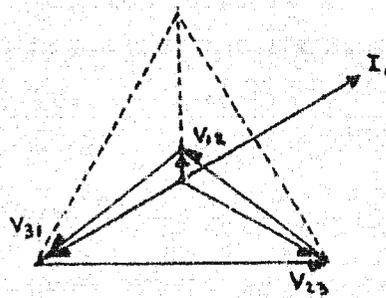
FALLA TRIFASICA.



FALLA ENTRE LAS FASES 2 Y 3.



FALLA ENTRE LAS FASES 2-3 Y A TIERRA.



FALLA DE LA FASE 1 A TIERRA.

Fig.2.6.- Diagramas fasoriales para varios tipos de fallas en un sistema típico de potencia.

que es el resultado de la capacidad neutral hacia la tierra de un circuito de c.a. La magnitud depende de la capacitancia del sistema hacia tierra y del voltaje. Cuando una de las fases se conecta accidentalmente a tierra, los fasores de los sistemas se distorsionan.

Resistencia de arco. A menos que la falla sea sólida generalmente se produce un arco en el aire cuya resistencia varía con la longitud del arco y la magnitud de la corriente de falla.

Para fallas de tierra, la resistencia de arco puede ser un factor importante para limitar apreciablemente la corriente de falla al ocurrir arcos más largos aunados a la posibilidad de resistencias de base de torre elevadas.

II.4.- COMPONENTES SIMÉTRICAS.

Antes de que los relevadores de protección puedan aplicarse satisfactoriamente a un sistema de potencia es necesario tener un conocimiento preciso de las condiciones que existen en el sistema durante las fallas.

Para muchas aplicaciones de relevadores la información importante que se requiere es la magnitud de las corrientes de corto circuito en todas las estaciones para la capacidad conectada mínima y máxima que se genera. Sin embargo, para otras aplicaciones, es necesario un conocimiento de las condiciones de voltaje en las mismas estaciones desde el punto de vista de su magnitud y su relación de fase respecto a las corrientes. Cuando se dispone de ésta in-

formación, puede hacerse la selección del tipo correcto del relevador con equipo selectivo para proteger todas las partes del sistema en un mínimo de tiempo.

Existen dos métodos para obtener la información de corto circuito.

El primero es por un método analítico para obtener aquella, consiste en el cálculo de las magnitudes de corriente y voltaje y, cuando se requieren los ángulos de fase. Entre más complejo sea el sistema más laboriosos y difíciles serán los cálculos. La introducción del método de componentes simétricas simplifica el proceso de cálculo de corriente y voltaje de corto circuito. Consiste en reducir cualquier sistema trifásico de vectores desbalanceados en tres sistemas balanceados que se conocen como componentes de secuencia de fase positiva, negativa y cero.

Los componentes de secuencia positiva consisten en tres vectores de igual magnitud, 120° fuera de fase y que retornan en una dirección de manera que alcanzan sus máximos valores positivos en una secuencia ABC. Los componentes de secuencia negativa son tres vectores de igual magnitud y separados 120° y que rotan en una secuencia ACB. Los componentes de secuencia de fase cero consisten en tres vectores iguales en magnitud y fase.

11.4.1.- IMPEDANCIA DE SECUENCIA.

Un sistema balanceado o simétrico es aquel en el cual los voltajes generados por la maquinaria girato-

ria son iguales en la magnitud y defasados 120° y en el cual las impedancias en todas las fase hasta el punto de falla son iguales. En dicho sistema, Las corrientes de secuencia positiva producen solamente caídas de voltaje de secuencia positiva y las corrientes de secuencia negativa producen solo caídas de voltaje de secuencia negativa, y las corrientes de secuencia cero solo producen caídas de voltaje de secuencia cero. Esto significa que no hay interacción entre las secuencias de fase y que pueden tratarse separadamente. Generalmente se supone que los sistemas están balanceados - hasta el punto de falla cuando se calculan cortos circuitos por el método de componentes simétricos, aún cuando, en el último análisis, un sistema perfectamente balanceado es muy raro. Una causa de desbalanceo que se encuentra frecuentemente en un sistema de potencia es no poder trasponer los buses y la línea de transmisión. Esto significa que las impedancias de las tres fases no son las mismas y que habra interacción entre las secuencias de fase. Generalmente se desprecia éste efecto porque el error que introduce no es serio y por lo general no es mayor que el error involucrado al determinar las constantes del sistema. Por otra parte, cuando teóricamente se involucran corrientes sumamente grandes, como un corto circuito sólido en un bus de bajo voltaje y capacidad muy alta (440 V) puede tomarse en cuenta el efecto de no trasposición del bus.

Nuevamente, las cargas desbalanceadas representan una condición que teóricamente requiere consideración, pero en general se desprecian todas las cargas en cál

culo de corto circuito. Una fuente más de desbalanceo sería un alambre de fase roto, lo que en efecto, introduce una impedancia infinita en esa fase.

Las cantidades Z_1 , Z_2 y Z_0 son las impedancias del sistema al flujo de las corrientes de secuencia positiva, negativa y cero respectivamente. Esas impedancias características varían con el tipo de equipo que se considera.

II.4.2.- REDES DE SECUENCIA.

Se ha establecido que para un sistema balanceado o simétrico, hasta el punto de falla, las tres componentes de secuencia son independientes, y no reaccionan una con otra. Por lo tanto, son necesarios tres diagramas de red separados con el fin de dividir los componentes de las tres secuencias con el fin de hacer las consideraciones individuales. Estas son las redes de secuencia, una para la secuencia positiva, una para la negativa y otra para la cero. La red de secuencia positiva debe mostrar los voltajes del generador, las impedancias de generadores, transformadores y líneas de transmisión. La red de secuencia negativa, idéntica a la positiva exceptuando que no se mostrarán voltajes de generadores y que las reactancias de secuencia positiva y negativa serán diferentes.

Cálculo de fallas desbalanceadas. En un sistema balanceado pueden fluir las corrientes de secuencia no negativa o cero, puesto que las máquinas síncronas o de inducción generan solamente voltajes de secuencia positiva. Cuando ocurre una falla, puede considerarse como un conver-

tidor que cambia los voltajes de secuencia positiva en voltajes de secuencia negativa y cero en la falla, dependiendo del tipo de ésta. Así pues, la distribución de los componentes de secuencia negativa y cero pueden determinarse estructurando las redes de secuencia negativa y cero con una sola fuente de voltaje en la falla.

II.5.- ESTABILIDAD EN LOS SISTEMAS DE POTENCIA.

La estabilidad es un término que es aplicado a los sistemas eléctricos de corriente alterna. Es la condición con la cual varias máquinas síncronas en un sistema -- permanecen en sincronismo o en paso con respecto a otras.

Lo contrario es aquello conocido como la inestabilidad, es decir la condición que denota la pérdida de sincronismo, o bien cuando varias máquinas síncronas están fuera de paso.

La estabilidad de los sistemas de potencia se puede dividir en tres estados:

- a.- Estabilidad en estado transitorio, con una escala de tiempo de 0 a 1 segundo.
- b.- Estabilidad dinámica, de 1 a 300 segundos.
- c.- Estabilidad en estado permanente o estacionario, para más de 300 segundos.

II.5.1.- ESTABILIDAD EN ESTADO ESTACIONARIO.

Antes de cualquier cambio en la entrada mecánica mediante acción manual o reguladora, un aumento en ---

la carga resultará en una reducción en la frecuencia del sistema (inercia del rotor reducida). Con el fin de reintegrar al sistema a la frecuencia que existía antes del aumento en la carga debe incrementarse la entrada mecánica a los generadores. Esta entrada debe ser mayor que los requerimientos de carga del estado estacionario o estable, puesto que las máquinas deben acelerarse aún más que antes. Cuando se alcanza una nueva aceleración en la máquina, la entrada mecánica excede los requerimientos de carga por lo que ahora debe reducirse la entrada mecánica para mantener la frecuencia y transferencia de potencia requeridas.

Se observará, por lo tanto, que los cambios de carga resultan en variaciones u oscilaciones mientras el sistema se ajusta a estos cambios. La estabilidad del estado estacionario es la capacidad del sistema para ajustarse a pequeños cambios de carga graduales.

La condición inestable extrema es el punto u mostrado en la Fig.2.7. Si la operación está en este punto, sólo puede lograrse una carga incrementada mediante el aumento en el voltaje V_s o V_r .

Un aumento en el ángulo δ (ver Fig.2.7) provocarían una reducción en lugar de un aumento en la transferencia de potencia.

II.5.2.- ESTABILIDAD TRANSITORIA.

La estabilidad transitoria podría definirse como la capacidad para ajustarse (permanecer en sincronía)

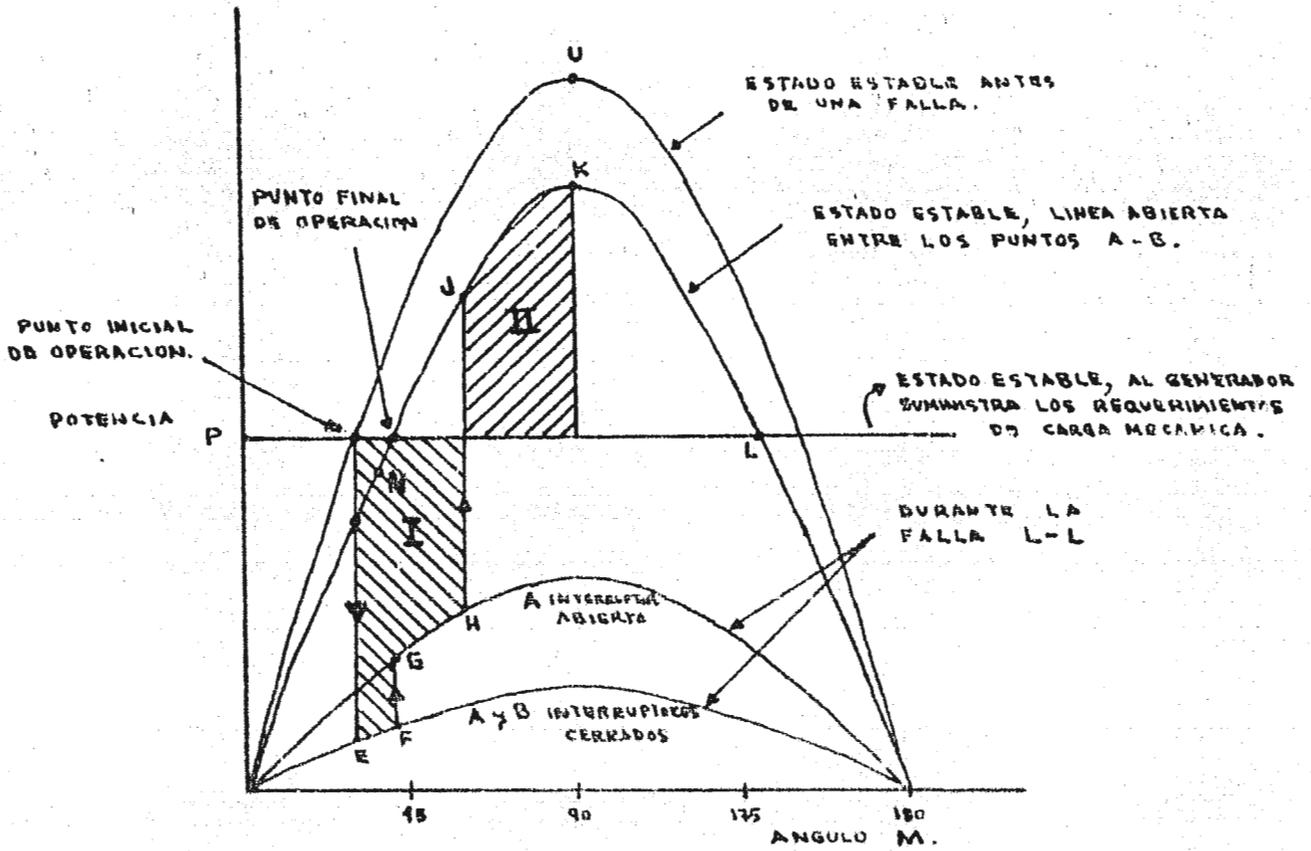
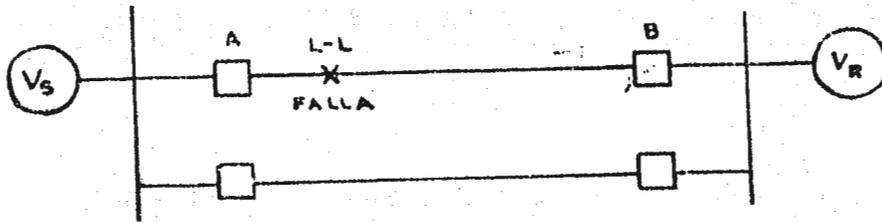


Fig. 2.7.- Curvas de transferencia de potencia durante, antes y después de una falla de línea a línea. --- (ver ecuación 6.1).

a grandes cambios repentinos dentro del sistema, como resultado de cambios de carga, fallas e interrupción.

Las fallas trifásicas son el tipo de falla más severo en lo que a estabilidad se refiere, puesto que el voltaje se reduce en todas las fases. El efecto de las fallas en la transmisión de potencia como se define en la ecuación:

$$P = \frac{V_S \cdot V_R}{X} \text{ Sen } M \dots\dots\dots 6.1$$

Es el incremento de la reactancia equivalente en serie, X, y por lo tanto la disminución de la potencia eléctrica que puede transmitirse. Durante la falla la salida eléctrica de los generadores en el extremo de envío es menor que la entrada mecánica, de manera que se aceleran, incrementando el ángulo M (Fig.2.7).

Al mismo tiempo el equipo giratorio en el extremo receptor se desacelera, puesto que la carga es mayor que la entrada mecánica correspondiente.

El extremo receptor pierde velocidad al aumentar más el ángulo M. En la Fig.2.7, cuando ocurre la falla de línea a línea, la potencia transmitida se reduce al punto E, y la variación empieza a lo largo del segmento E - F.

En el punto F, el interruptor A se abre y a la potencia transmitida aumenta a G. La oscilación continúa a lo largo de G - H y en H la falla es eliminada. En el mo-

mento que se alcanza H, ha aumentado la inercia del rotor del extremo de envío, como lo representa el área I ya que - la entrada mecánica ha sobrepasado a la potencia eléctrica transmitida con la falla eliminada, la potencia transmitida es J, la cual excede a la entrada mecánica, de manera que - empieza la desaceleración en la generación del extremo de - envío y la aceleración del extremo receptor.

La oscilación continúa hasta el punto K donde la inercia adicional del rotor del extremo de envío resultante de la falla es absorbida completamente por la carga (área II = área I) puesto que en K la salida eléctrica del extremo de envío sobrepasa a la entrada mecánica, la oscilación se invierte hasta un punto como M, donde la oscilación se invierte otra vez. El regulador de voltaje y la acción reguladora así como la resistencia del sistema, amortiguarán la oscilación hasta que se alcance el punto de operación.

Cabe notar que si la oscilación inicial llegara al punto L y los generadores del extremo de envío tuvieran aún exceso de inercia del rotor (área II más pequeña que área I) la variación continuaría en la misma dirección y el sistema se desincronizaría. Cuando se pasa el punto L, la entrada mecánica de los generadores del extremo de envío excede nuevamente a la salida eléctrica y la oscilación se acelera.

II.5.3.- RELEVACION EN DESINCRONIZACION.

Idealmente, la tarea de los relevadores de -

falla es eliminarla lo suficientemente rápido de manera que pueda mantenerse la estabilidad, además, estos mismos relevadores no deben operar en oscilaciones de las que el sistema pueda recuperarse. Cuando el sistema se desincroniza, el sistema debe idealmente dividirse mediante la apertura del circuito en unos cuantos lugares preseleccionados, de tal manera que exista un balance razonable entre generación y carga de cada lado de la división. Por ejemplo, no es deseable dividir de tal forma que la mayor parte de la generación quede separada de la carga principal del sistema. Antes de que se aplique los relevadores para desincronización, debe examinarse el rendimiento del relevador para falla, puesto que en algunos casos estos operen durante la inestabilidad y en tales casos no se requiere relevadores adicionales. Análogamente, en lugares donde la operación es definitivamente indeseable, el lugar de la oscilación puede no interceptar la característica de operación del relevador de fallas. En esos casos, no son necesarios los relevadores bloqueadores.

La mayoría de los relevadores para desincronización basan su discriminación entre fallas y oscilaciones en el tiempo finito que se requiere para que el lugar de la impedancia se mueva dentro del área de operación del relevador. Por el contrario de la impedancia cambia instantáneamente cuando ocurre la falla.

III.- ESTUDIO DE RELEVADORES.

III.1.- GENERALIDADES.

Un Relevador es un dispositivo que responde a cambios en las condiciones de un circuito eléctrico, accionando otros dispositivos en el mismo ó en otros circuitos.

Los primeros relevadores fueron dispositivos electromecánicos, tipos de gran aceptación debido a su sencillez y a su construcción robusta. Los relés para los sistemas de transmisión de energía deben ser de alta fiabilidad ya que deben permanecer desatendidos durante largos periodos pero, al mismo tiempo, deben estar preparados para operar con la rapidez y la precisión necesaria.

En los últimos años se han desarrollado relés en estado sólido ó estáticos, que han tenido gran aceptación para la protección de los sistemas de energía. Se ha puesto a punto circuitos de funcionamiento casi totalmente independientes de las variaciones ocasionadas por la temperatura o por el uso en las características de sus componentes.

Sus componentes básicos tienen tal velocidad de respuesta que normalmente hay que agregar elementos de retardo para evitar falsas operaciones debidas a fenómenos transitorios momentáneos en los sistemas de transmisión de energía.

La función de los relevadores de protección en un sistema de potencia es detectar rápidamente un distur

bio e iniciar una acción para aislar las partes dañadas o en peligro, lo cual permite al resto del sistema mantener un alto grado de continuidad en el servicio.

Una función secundaria de los relevadores de protección es indicar el sitio y el tipo de falla. Dichos datos no solo ayudan a su reparación oportuna, sino también evitan que la falla se repita por dicha causa.

En cuanto a la aplicación de relevadores, estos se van integrando para formar esquemas de protección -- bien definidos para una función específica a cierta área o equipo de un sistema de potencia, lo cual lógicamente, divide a éste en varias partes, cada una con sus problemas particulares especiales, tanto de operación como de diseño.

III.2.- CARACTERISTICAS DE LOS RELEVADORES DE PROTECCION.

Para cumplir con las condiciones que les han sido asignadas, es decir, reaccionar a las perturbaciones -- producidas en las redes y máquinas de manera eficiente, -- los relés de protección han de cubrir y satisfacer un conjunto de exigencias de las que las más importantes son:

- 1.- Confiabilidad.
- 2.- Selectividad.
- 3.- Rapidez.
- 4.- Simplicidad.
- 5.- Economía.
- 6.- Sensibilidad.
- 7.- Automaticidad.

III.2.1.- Confiabilidad. Todo esquema de protección debe reponder a cualquier tipo de falla que se presente en su área de aplicación.

III.2.2.- Selectividad. Se debe garantizar la máxima continuidad del servicio, aislando unicamente la parte del sistema con falla o disturbio.

III.2.3.- Rapidez. La respuesta del esquema de protección debe ser en un tiempo mínimo, para evitar poner en peligro al equipo y la estabilidad del sistema.

III.2.4.- Simplicidad. Los esquemas de protección deberán requerir el mínimo necesario de equipo y circuitos de interconexión.

III.2.5.- Economía. Se debe tener la máxima protección al mínimo costo.

III.2.6.- Sensibilidad. Los relés de protección han de ser sensibles, es decir, que su funcionamiento ha de ser correcto para el valor mínimo de la perturbación que pueda aparecer en el lugar del defecto.

III.2.7.- Automaticidad. Los relés de protección han de ser automáticos, es decir, que su funcionamiento debe realizarse sin intervención humana.

Obtener el máximo de estos principios a la vez es una utopía, debiendose mantener todas ellas en un punto medio conveniente, sin sacrificar una por las otras, lo cual obliga a hacer una evaluación de todos los factores tanto de una manera general del sistema, como particular de cada equipo o aplicación, comparando riesgos, y en base a esto garantizar una seguridad y flexibilidad adecuada al

sistema eléctrico de potencia a proteger.

III.3.- PRINCIPIOS DE OPERACION DE LOS RELEVADORES.

Todos los relevadores que consideramos funcionan en respuesta a una o más magnitudes eléctricas, ya sea para cerrar o para abrir contactos.

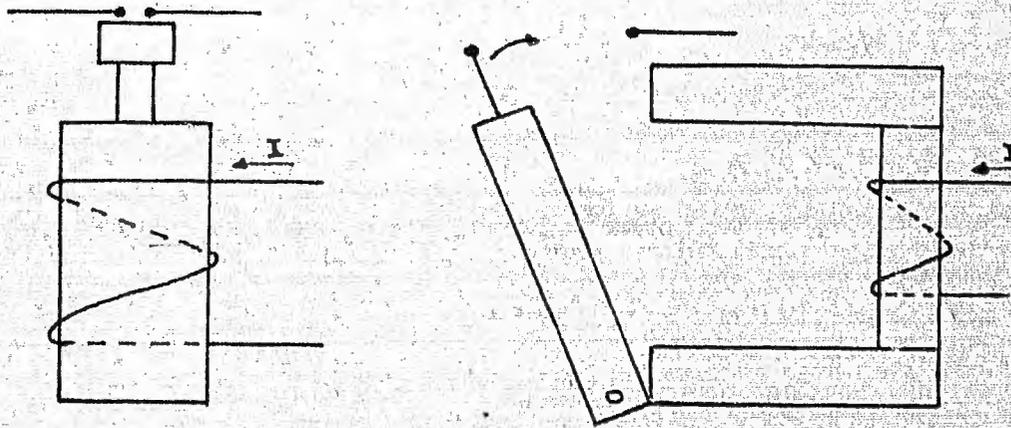
En realidad sólo hay dos principios de funcionamiento fundamentalmente diferentes: 1) Atracción electromagnética, 2) inducción electromagnética.

Los primeros funcionan en virtud de un embolo que es atraído dentro de un solenoide, o una armadura que es atraída por los polos de un electroimán. Dichos relevadores pueden ser accionados por magnitud de C.D. o C.A. Los relevadores de inducción electromagnética utilizan el principio del motor de inducción por medio del cual el par se desarrolla por inducción rotor; este principio de funcionamiento se aplica sólo a relevadores accionados por C.A.

III.3.1.- RELEVADORES DE ATRACCION ELECTROMAGNETICA.

El principio de funcionamiento de estos relevadores como su nombre lo indica es la fuerza de atracción ejercida sobre un elemento móvil de una estructura actuante, ya sea del tipo solenoide o del tipo armadura atraída; esta fuerza es proporcional al cuadrado del flujo en el entrehierro.

La corriente al pasar por el devanado crea una fuerza de magnetización; bajo la acción de la cual aparece el flujo magnético que se cierra a través del núcleo



A.- SOLENOIDE.

B.- ARMADURA ATRAIDA.

Fig.3.1.- Relevadores de atracción electromagnética.

del entrehierro y el elemento móvil el cual se magnetiza y como resultado es atraído hacia el polo del electroimán.

Esta fuerza de atracción es proporcional al cuadrado del flujo en el entrehierro.

$$F_a = K \phi^2 \dots \dots (1)$$

donde:

F_a = fuerza de atracción

K = constante de conversión

ϕ = flujo en el entrehierro

El flujo magnético y la corriente que lo origina están relacionados de la siguiente manera:

$$\phi = IN / R_m \dots \dots (2)$$

donde:

I = valor eficaz de la corriente

N = número de espiras del devanado

R_{μ} = resistencia magnética del camino por el cual se cierra el flujo \emptyset

sustituyendo (2) en (1):

$$F_a = KN^2 I^2 / R_{\mu} = K_1 I^2 \Rightarrow F_a = K_1 I^2 \dots (3)$$

Como la fuerza de atracción depende del cuadrado de la corriente, entonces el signo de la misma no tiene importancia en este tipo de relevadores; por lo tanto se pueden emplear en C.D. Y C.A.

III.3.2.- PRINCIPIOS DE RELEVADORES DE INDUCCION ELECTROMAGNETICA.

Este principio se basa en la producción de una fuerza en una sección de un rotor que está atravesado -- por dos flujos de C.A. adyacentes y fuera de fase.

Por lo tanto si un disco de material no magnético se somete a una acción de un campo magnético giratorio aparece una f.e.m. en el disco, que a su vez producen corrientes parasitas en el mismo. La corriente producida -- por el flujo reacciona con el otro y viceversa, lo cual -- produce un par motor que tiende a hacer girar al disco en el mismo sentido en el que gira el campo.

La fuerza neta está dirigida desde el punto donde el flujo adelantado atraviesa al rotor. La fuerza ne-

ta es la misma en cada instante. Este par se invierte, si u no de los flujos se invierte.

La producción del par en un relevador de inducción la podemos representar con la siguiente figura:

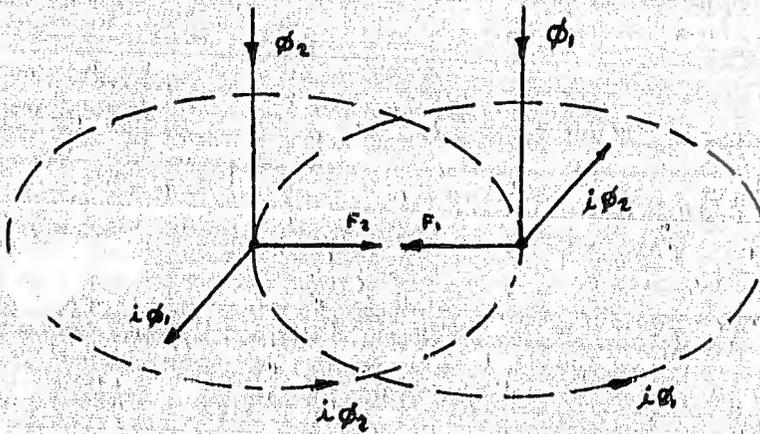


Fig. 3.2.- Relevador de Inducción Electromagnética.

Si expresamos:

$$\Phi_1 = \Phi_1 \text{ sen } \omega t$$

$$\Phi_2 = \Phi_2 \text{ sen } (\omega t + \theta)$$

θ = ángulo de fase por el que Φ_2 adelanta a Φ_1

por la ley de Lenz:

$$i\Phi_1 \propto \frac{d\Phi_1}{dt} \propto \frac{d(\Phi_1 \text{ sen } \omega t)}{dt} \propto \Phi_1 \cos \omega t$$

$$i\Phi_2 \propto \frac{d\Phi_2}{dt} \propto \frac{d(\Phi_2 \text{ sen } (\omega t + \theta))}{dt} \propto \Phi_2 \cos (\omega t + \theta)$$

de la figura anterior, vemos que la fuerza neta será:

$$F = (F_2 - F_1) \propto (\Phi_2 i\Phi_1 - \Phi_1 i\Phi_2) \dots (A)$$

sustituyendo los valores de $i\phi_1$ e $i\phi_2$ de las ecs. anteriores y aplicando las identidades trigonométricas correspondientes:

$$F \propto \Phi_2 \operatorname{sen}(\omega t + \theta) \Phi_1 \cos \omega t - \Phi_1 \operatorname{sen} \omega t \Phi_2 \cos(\omega t + \theta)$$

$$F \propto \Phi_2 \Phi_1 [\operatorname{sen}(\omega t + \theta) \cos \omega t - \operatorname{sen} \omega t \cos(\omega t + \theta)] \dots (5)$$

$$F \propto \Phi_1 \Phi_2 [\operatorname{sen}(\omega t + \theta) - \omega t]$$

$$F \propto \Phi_2 \Phi_1 \cos \theta \dots (6)$$

Lo cual nos indica que la fuerza resultante es constante en todo momento dependiendo únicamente de los valores de los flujos y el ángulo de fase entre ellos.

III.4.- CLASIFICACION DE RELEVADORES.

Para estudiar las posibilidades de utilización de los relevadores de protección, se ha de intentar -- una clasificación sistemática de estos relés, la cual resulta en extremo difícil por la gran variedad de equipos existentes. Sin embargo, vamos a intentarlo utilizando diferentes criterios de clasificación:

III.4.1.- Por las características constructivas.

III.4.2.- Por la magnitud eléctrica que controlan o miden.

III.4.3.- Por las características del tiempo de funcionamiento.

III.4.4.- Por la forma de conexión.

III.4.1) Clasificación de los relés de protección por las características constructivas:

III.4.1.1) Relés electromagnéticos (atracción).

- III.4.1.2) Relés de inducción.
- III.4.1.3) Relés electrodinámicos.
- III.4.1.4) Relés electrónicos.
- III.4.1.5) Relés térmicos.

III.4.1.1.- Los relés electromagnéticos están basados en la fuerza de atracción ejercida entre piezas de material magnético. Estas fuerzas mueven una pieza móvil en el sentido de disminución de la reactancia del circuito magnético.

Las principales ventajas de los relés electromagnéticos están en su simplicidad, su robustez y su economía.

Estas ventajas hacen que los relés electromagnéticos sean universalmente utilizados como relés de tensión, relés de corriente, etc.

III.4.1.2.- Los relés de inducción son muy empleados en la actualidad por las muchas aplicaciones y combinaciones que admiten; están basados en el mismo principio que los motores de inducción.

III.4.1.3.- El funcionamiento de los relés electrodinámicos está basado en la acción de una bobina fija sobre una bobina móvil, lo mismo que los aparatos electrodinámicos de medida; frecuentemente incluyen también un circuito magnético de hierro u otro material magnético.

La sensibilidad de estos relés es muy grande aunque no permiten tener una temporización larga en su funcionamiento, debido al débil desplazamiento angular en ----

su bobina móvil. Tienen el inconveniente de su elevado costo de construcción.

III.4.1.4.- Los relés electrónicos recurren para su funcionamiento, a dispositivos electrónicos tales como válvulas, diodos, tiristores, transistores, etc. Estos relés se emplean en la técnica de la protección desde hace relativamente poco tiempo y aún no se han cubierto todas las posibilidades que los dispositivos electrónicos pueden proporcionar en la protección de máquinas y redes.

III.4.1.5.- Los relevadores térmicos tienen su fundamento en la deformación sufrida por unas láminas de distinto material unidas firmemente entre sí, las que al dilatarse desigualmente por poseer diferentes coeficientes de dilatación y debido al calor producido por la corriente, sufrirán una deformación en sentido perpendicular a sus ejes, al curvarse las láminas bimetalicas accionan un sencillo mecanismo de palancas desconectando el contacto que abre el circuito de alimentación de las bobinas.

En la Fig.3.3 se muestra un relevador térmico que funciona de la siguiente manera: al circular una sobrecorriente de línea por el elemento bimetalico del relevador, éste se calienta y abre el contacto por el cual circula la corriente de la bobina de control, lo que provocará que abra el sistema de contactores por el cual circula la corriente de línea.

Los relés térmicos se emplean sobretodo, contra sobrecargas. Estos relés desconectan la máquina cuando sus devanados por causa de una sobrecarga, alcanzan una temperatura

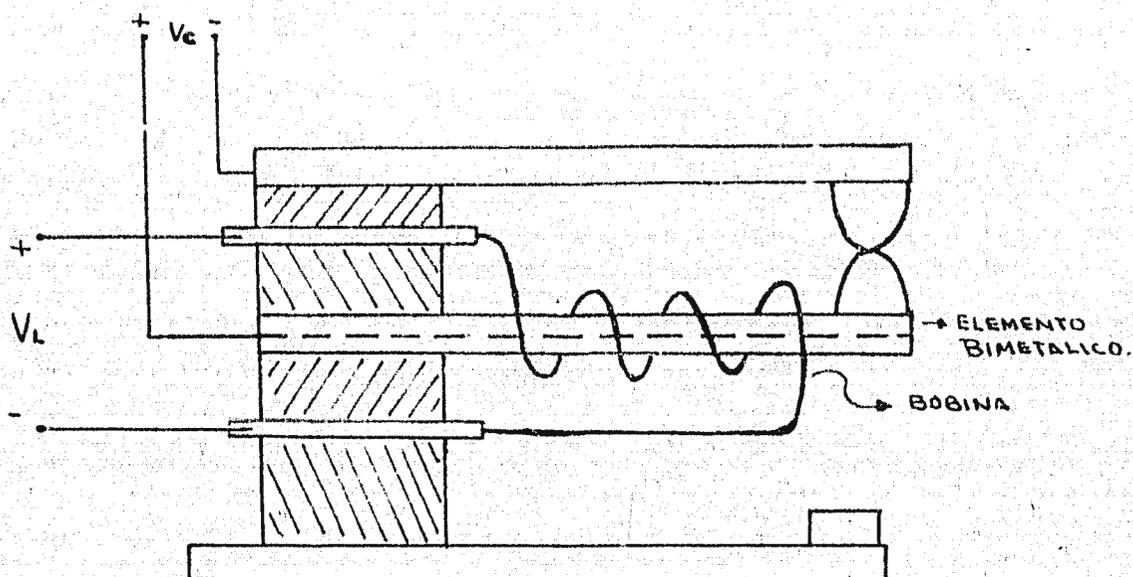


Fig.3.3.- Relevador térmico.

perura capaz de dañar los aislantes. Constan de una imagen térmica del objeto que han de proteger, es decir, de un dispositivo cuya ley de calentamiento sea análoga al objeto protegido.

III.4.2.- Clasificación de los relés de protección por la magnitud eléctrica que controlan o miden.

III.4.2.1) Relés de corriente.

III.4.2.2) Relés de tensión.

III.4.2.3) Relés de producto (direccionales).

III.4.2.4) Relés de cociente (distancia).

III.4.2.5) Relés diferenciales.

III.4.2.6) Relés de frecuencia.

III.4.2.1.- Los relés de corriente actúan por la acción de la intensidad de corriente que atraviesa el relé, por ésta razón se les llama relés de intensidad y relés-ampérimétricos. Estos dispositivos pueden ser:

a).- relés de sobrecorriente, cuando entran en funcionamiento si la intensidad del organo protegido sobrepasa un cierto valor previamente determinado.

b).- relés de mínima corriente, si el funcionamiento tiene lugar cuando la intensidad disminuye por debajo de un valor previamente fijado.

Por lo general, estos relés son electromagnéticos y en algunas ocasiones, térmicos.

III.4.2.2.- Relés de tensión, se llama también relés voltimétricos y actúan por variaciones de la tensión a que está sometido el relé.

Se llaman relés de sobrevoltaje, si actúan al sobrepasar la tensión el valor previamente fijado y relés de bajo voltaje, si entran en funcionamiento cuando la tensión-baja del valor prefijado. Generalmente, los relés de tensión son electromagnéticos.

III.4.2.3.- Los relés de producto actúan como su nombre lo indica, por la acción del producto de dos magnitudes eléctricas. A los relevadores que reciben dos magnitudes de influencia y que emplean a una de estas como referencia, se les llama relevadores direccionales, ya que están capacitados para distinguir el flujo de corriente en una dirección o en la otra, reconociendo diferencias de ángulo entre la corriente y la magnitud de polarización.

Los más conocidos son los relés direccionales de potencia y sobrecorriente los cuales entran en funcionamiento por la acción del producto de la corriente que atraviesa el relé por la tensión a que están sometidos los bornes de este mismo relé.

III.4.2.4.- Los relés de cociente entran en funcionamiento cuando el cociente de dos magnitudes eléctricas llega a cierto valor prefijado. Los más conocidos son los relés de mínima impedancia o distancia, que actúan cuando la impedancia del relé o sea la relación V / I disminuye por debajo del valor prefijado.

El principio de los relevadores de distancia, se basa en que la impedancia o reactancia de un circuito entre el relevador y el punto donde ocurre la falla es proporcional a la distancia entre ellos, ya que la impedancia por unidad de longitud de un conductor es constante, por lo tanto la impedancia total es proporcional a la distancia.

Existen actualmente tres tipos de relevadores de distancia que son:

III.4.2.4.1) De impedancia.

III.4.2.4.2) De reactancia.

III.4.2.4.3) De admitancia o de tipo mho.

III.4.2.4.1.- En un relevador de distancia tipo impedancia, el par producido por un elemento de corriente está equilibrado por el par producido por un elemento de tensión. El relé de tipo impedancia está en el límite de funcio

namiento a un valor constante dado de la relación V en I que puede expresarse como una impedancia cuya característica se representa en un diagrama $R-X$ en la Fig.3.4a.

III.4.2.4.2.- Un relevador de distancia tipo-reactancia es un relevador de sobrecorriente con retención direccional, es decir que en la unidad de operación de reactancia un elemento de sobrecorriente desarrolla par positivo y un elemento direccional corriente-tensión se opone o ayuda al elemento de sobrecorriente, según sea el ángulo de fase entre la corriente y tensión.

La gran ventaja de este relevador es que no influye en su operación el valor de la resistencia, por lo cual a esquemas donde la resistencia de arco sea un problema, tal es el caso de fallas a tierra en los sistemas de potencia aterrizados.

La característica en un diagrama $R-X$ es una línea paralela al eje de las abscisas, como se representa en la Fig.3.4b.

III.4.2.4.3.- El relevador de distancia tipo admitancia (MHO) es un relevador direccional de tensión de retención, cuya característica en un diagrama $R-X$ se muestra en la Fig.3.4c en la cual se ve que es una característica circular que pasa a través del origen del diagrama $R-X$ por lo cual es inherente su direccionalidad.

Analizando las características de operación de los relevadores de distancia, se observa que estos se adaptan para responder a todos los problemas que se presentan en la protección de líneas de transmisión, ya que ésta fami-

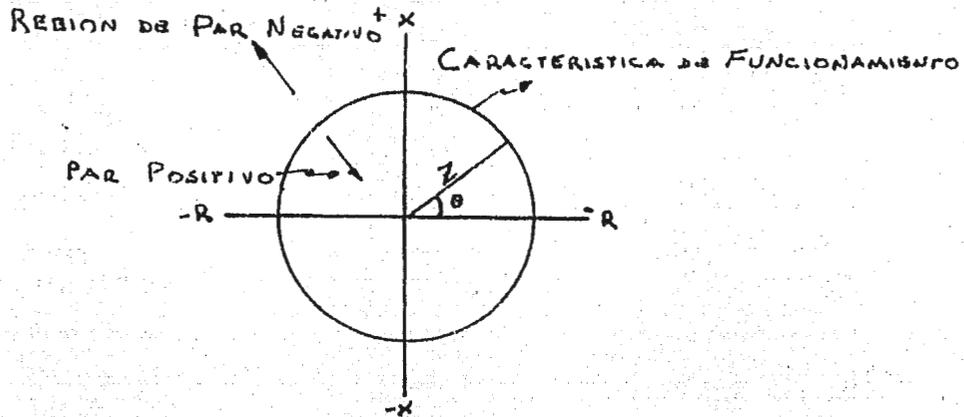


Fig. 3.4a.- Característica de funcionamiento de un relevador de impedancia.

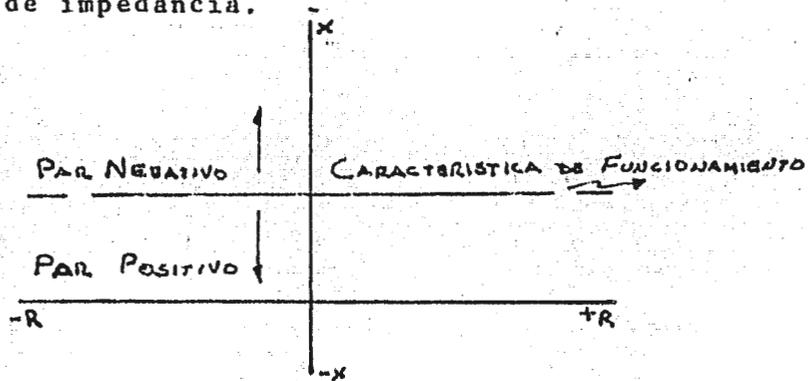


Fig. 3.4b.- Característica de funcionamiento de un relevador de reactancia.

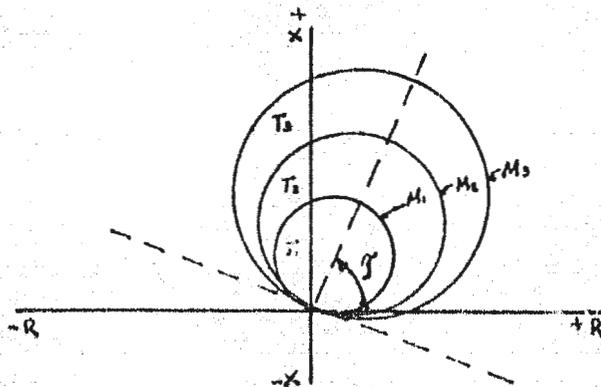


Fig. 3.4c.- Característica de funcionamiento de un relevador de admitancia (MHO),

lia de relevadores es muy versátil; además encuentran aplicación como protección de respaldo a generadores y transformadores.

Una de sus grandes ventajas, es que no se ven afectados por los cambios en el sistema de protección, es decir que no se influye en su operación ningún cambio en el nivel de falla de corto circuito.

Otra de sus ventajas es también su alta velocidad de operación y de reposición, con lo que se pueden lograr recierres en las líneas sin perder el sincronismo.

III.4.2.5.- Relevadores diferenciales. Como su nombre lo indica, entran en funcionamiento cuando la diferencia de dos o más magnitudes eléctricas del mismo tipo sobrepasa un valor fijado de antemano. Los relés diferenciales se caracterizan por su sensibilidad y por su selectividad.

Generalmente cualquier tipo de relevador puede funcionar como un relevador diferencial, si se conecta adecuadamente, es decir, no es tanto la construcción del relé como su forma de conexión, lo que le hace ser un relevador diferencial.

En la Fig.3.5, el cuadro (A) representa el elemento del sistema que está protegido por el relevador diferencial. Este elemento del sistema puede ser un generador, un motor, un transformador, etc. En cada conexión al elemento a proteger, se muestra un transformador de corriente (b), los canales están conectados a través de la bobina del relevador (C).

(C_1 : bobina de funcionamiento; C_2 : bobina de retención)

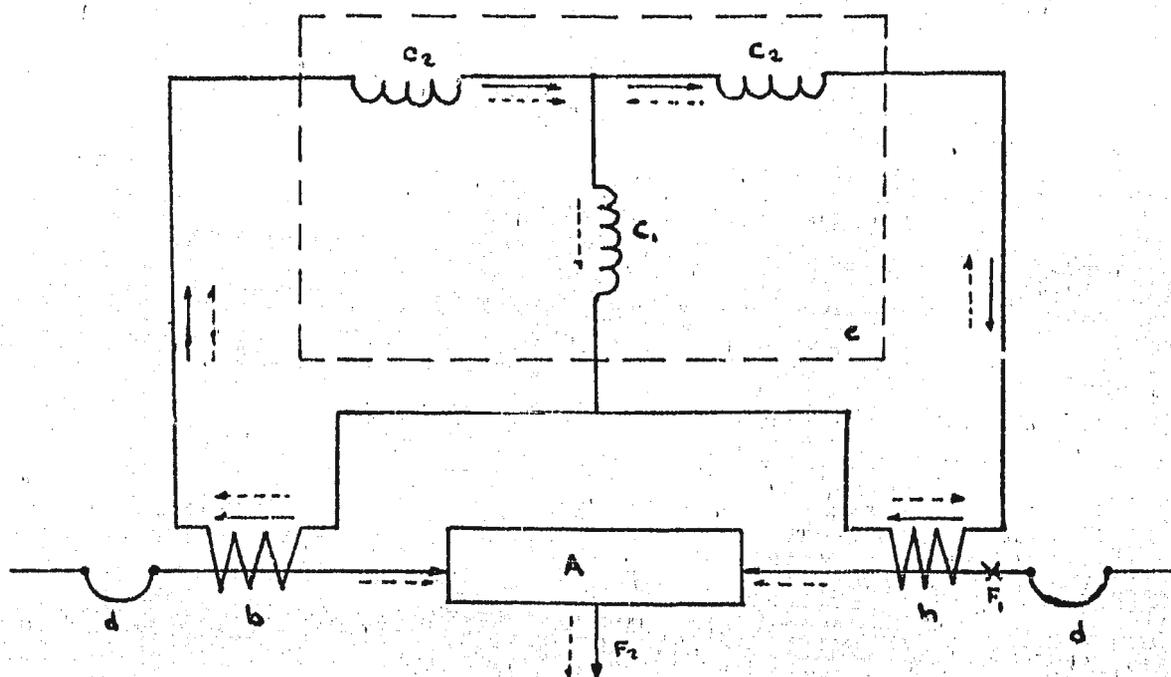


Fig.3.5.- Relevador diferencial de corriente.

Suponiendo que la corriente fluye por el circuito primario a una carga o corto circuito en F_1 , también - que los dos transformadores de corriente tienen la misma relación de transformación, sus corrientes secundarias, circulan como lo muestran las flechas con línea continua en la Fig.3.5 y no hay circulación de corriente por la bobina de funcionamiento C_1 , ya que los circuitos secundarios de los transformadores son ajustados para obtener la misma corriente que las bobinas de retención del relevador diferencial y no hay diferencia de potencial a través de la bobina de funcionamiento.

Ahora si la falla se encuentra entre los dos transformadores de corriente (F_2), en los secundarios de estos se inducirán voltajes de polaridades contrarias, las cuales producirán corrientes secundarias como lo muestran las flechas con línea punteada, por lo cual circulará corriente por la bobina de funcionamiento y el relé opera, enviando la orden para que abran los interruptores (d) aislando el elemento protegido de toda alimentación, evitando así daños mayores.

El relevador diferencial deberá hacer funcionar un relevador auxiliar de reposición manual, que manda abrir los interruptores que pueden en un momento dado seguir alimentando la falla presente en el equipo dañado, esto es, para disminuir la probabilidad de que un interruptor que alimenta al equipo, se cierre en forma inadvertida, sujetando así al equipo a un daño adicional innecesario.

Dos requisitos básicos que deben satisfacer las conexiones del relevador diferencial son: (a) no debe funcionar para carga o falla externa, (b) debe funcionar para fallas internas bastante severas.

III.4.2.6.- Relevadores de frecuencia. Funcionan cuando la frecuencia se aparta del valor de consigna previamente establecido; por lo general, estos relés son del tipo de inducción.

III.4.3.- Clasificación de los relés de protección por las características de tiempo de funcionamiento.

III.4.3.1.- Relevadores de acción instantánea.

III.4.3.2.- Relevadores de acción diferida.

III.4.3.1.- El relevador de acción instantánea

es aquel en que no se han introducido intencionalmente dispositivos de retardo. Por lo tanto, entran en funcionamiento al mismo instante en que la magnitud eléctrica controlada (corriente, tensión, etc.) sobrepasan el valor previamente ajustado. Se les llama también, simplemente, relés instantáneos.

III.4.3.2.- Los relevadores de acción diferida se denominan también relés temporizados. Estos relés tienen un dispositivo de temporización de tal forma, que el relé entra en funcionamiento después de cierto tiempo de haber alcanzado la magnitud eléctrica controlada (corriente, tensión, etc.) su valor de funcionamiento.

A su vez los relés de acción diferida pueden ser:

III.4.3.2.1.- Relés de retardo independiente.

III.4.3.2.2.- Relés de retardo dependiente o de tiempo inverso.

so.

En los relés de retardo independiente, la temporización es siempre la misma, cualquiera que sea el valor de la magnitud eléctrica que provoca el funcionamiento del relé.

Los relevadores de retardo dependiente no tienen una temporización fija, como los anteriores, sino que varían con el valor de la magnitud eléctrica que controla el relé. Casi siempre son de tiempo inverso, es decir, que la

temporización es inversamente proporcional al valor de la -- magnitud controlada.

III.4.4.- Clasificación por la forma de conexión.

Después de haber estado en funcionamiento y -- cuando han cesado las causas de perturbación, los relés de -- protección deben permitir que los elementos protegidos, vuelvan a su funcionamiento normal, lo que se consigue, generalmente, reenganchando el interruptor correspondiente.

Por la forma de conectar nuevamente éste interruptor al circuito, los relevadores pueden ser:

III.4.4.1.- Relevadores de enganche automático.

III.4.4.2.- Relevadores de bloqueo.

III.4.4.1.- En los relevadores de reenganche automático, el circuito protegido por ellos, vuelve automaticamente a las conexiones iniciales de funcionamiento, al cesar la perturbación que provocó la acción del relé, es decir que el relé se rearma por sí solo y queda en condiciones de funcionar nuevamente cuando sea necesario.

III.4.4.2.- En los relevadores de bloqueo, el circuito protegido no vuelve a las condiciones de funcionamiento anteriores a la perturbación, cuando cesa ésta perturación.

Hay que rearmar manualmente el relé disponiendo los contactos para que puedan funcionar de nuevo, pues, de lo contrario, el circuito protegido por el relé quedaría--

permanentemente bloqueado.

III.5.- LOS RELEVADORES SE PUEDEN DIVIDIR EN CUATRO GRUPOS

III.5.1.- De protección.

III.5.2.- Auxiliares.

III.5.3.- Reguladores.

III.5.4.- Verificadores.

III.5.1.- Relevador de protección. La función de éste relevador es la de detectar fallas en líneas y aparatos, o bién, otro tipo de condiciones indeseables e incitar o permitir una apropiada desconexión al dar una adecuada señal de alarma. Estos relevadores se llaman de "alta velocidad" cuando su tiempo de operación no excede de tres ciclos en frecuencia de 60 cps. y de baja velocidad cuando operan en más de tres ciclos.

III.5.2.- Relevador auxiliar. El relevador auxiliar es usado para asistir en el desarrollo de sus funciones a los relés de protección, como respaldo. El uso de relés auxiliares en ayuda de los relés de protección tiene tres características generales:

- a).- Energizan circuitos de control múltiple.
- b).- Proporcionan la capacidad de los contactos para circuitos de control que necesiten corriente de mayor intensidad que las que pueden manejarse con seguridad.
- c).- Proporcionan flexibilidad a los arreglos de los contactos.

De los relés auxiliares los más importantes son:

III.5.2.1.- Relés intermedios.

III.5.2.2.- Relés de señalización.

III.5.2.1.- Relés intermedios. Muchas veces los contactos de los relés de protección son excesivamente débiles para accionar directamente la bobina de disparo del interruptor. En este caso se intercala entre el relé de protección y la bobina de disparo de un relé intermedio, cuyos contactos ya pueden soportar la corriente que ha de soportar la bobina de disparo del interruptor.

III.5.2.2.- Relés de señalización. Estos constan de un circuito magnético el cual al ser excitada su bobina deja libre un disco que cae, haciendo que cierren uno o dos contactos conmutables produciendo, por un lado, la alarma mediante una bocina, y por otro, aviso optico mediante indicadores, o luminosos mediante una lampara de señalización.

III.5.3.- Relevador regulador. Es un relevador cuya función es detectar la variación no deseada de la cantidad medida o variable controlada y restaurar la cantidad dentro de los límites deseados o establecidos con anterioridad.

III.5.4.- Relevador verificador. Es aquel cuya función es verificar las condiciones del sistema con respecto a límites prescritos, indicando operaciones automáticas o permitiéndolas además de abrir un interruptor durante las condiciones de falla.

IV.- PROTECCION DE GENERADORES.

IV.1.- CAUSAS DE LAS DIFERENTES FALLAS Y DISPOSITIVOS DE PROTECCION.

Al mencionar la protección de generadores se supone la consideración de todas las posibles condiciones de funcionamiento anormal, en comparación con la protección de cualquier otro elemento del sistema.

Los dispositivos de protección para generadores tienen por objeto:

- a.- Evitar la aparición de fallas.
- b.- Si, a pesar de toda precaución, se produce una avería, limitar al mínimo las consecuencias de ésta.

Causas que pueden producir averías en los generadores:

- 1.- Sobretensiones.
- 2.- Fenómenos de envejecimiento en los aislamientos.

- 3.- Sobrecargas.

Clasificación de los dispositivos de protección de generadores:

- a.- Dispositivos de protección contra defecto o defectos externos.
- b.- Dispositivos de protección contra defectos internos.

Defectos externos más frecuentes y sus dispositivos de protección:

1.- Sobretensiones de origen atmosférico (pararrayos).

2.- Calentamiento exagerado a causa de una sobrecarga o de un corto circuito exterior (relés térmicos contra sobrecargas y relés temporizados de máxima corriente contra cortos circuitos).

3.- Sobretensiones debidas a las maniobras normales de excitación (relés de máxima tensión).

4.- Carga asimétrica (relés sensibles a la corriente inversa).

5.- Funcionamiento del generador como motor síncrono (relés de retorno de potencia).

Defectos de origen interno y sus dispositivos de protección:

1.- Corto circuito entre fase diferentes (relés diferenciales).

2.- Defectos a tierra en el arrollamiento del rotor (protección especial contra defectos a tierra).

3.- Defectos a tierra en el arrollamiento del estator (protección especial contra defectos a tierra).

4.- Cortos circuitos entre espiras de una misma fase (protección especial).

5.- Desconexión accidental del circuito de excitación (protección especial).

IV.2.- PROTECCION CONTRA SOBRECARGAS Y CORTOS CIRCUITOS EXTERIORES.

Para la protección contra sobrecargas y cortos circuitos exteriores se hace una combinación de relés para ambos casos como son relés térmicos y relés temporizados de máxima corriente.

Una disposición de este arreglo se muestra en la Fig.4.1, la combinación de estos asegura la protección contra sobrecarga, mientras que para un corto circuito los relés térmicos provocan una desconexión instantánea de los contactos.

La disposición con tres relés térmicos asegura una protección tripolar contra sobrecargas y cortos circuitos. Este tipo de protección resulta necesaria para máquinas con el punto neutro puesto a tierra directamente. Así como para los generadores que trabajan sobre transformadores con acoplamiento delta-estrella. En los demás casos basta con una protección bipolar.

IV.3.- PROTECCION CONTRA LAS SOBRETENSIONES DEBIDAS A MANIOBRAS NORMALES DE EXCITACION.

Estas sobretensiones pueden aparecer en caso de embalamiento de la máquina motriz que acciona el generador o como consecuencia a una sobretensión por la pérdida de carga. Para proteger al generador contra este tipo de falla-

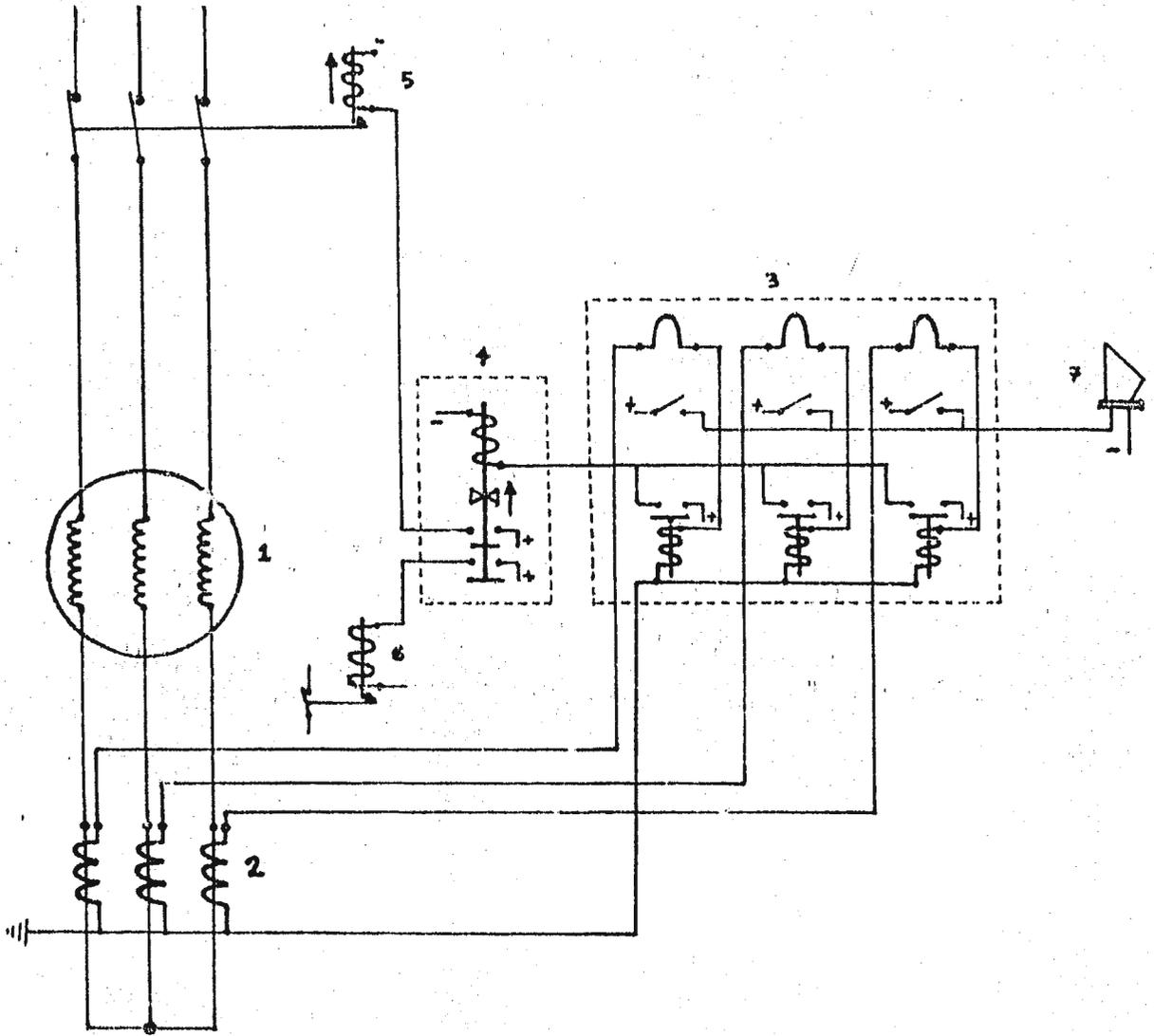


Fig.4.1.- Protección tripolar combinada contra las sobrecargas y los cortos circuitos por medio de tres relés térmicos y de un relé temporizado. 1.- Generador 2.- Transformador de intensidad, 3.- Relés térmicos. 4.- Relé temporizado. 5.- Interruptor del generador. 6.- Interruptor de excitación. 7.- Dispositivo de alarma.

se emplea un relé de máxima tensión.

En la Fig.4.2, se muestra un arreglo haciendo se notar que el relevador estará siempre alimentado de un -- transformador de potencial diferente al utilizado para el re-- gulador automático de tensión. Este relé se hace insensible a la frecuencia por medio de un dispositivo adicional.

La desconexión de este relé es temporizada pa-- ra sobretensiones relativamente débiles pero instantánea pa-- ra sobretensiones peligrosas.

IV.4.- PROTECCION CONTRA LAS CARGAS ASIMETRICAS.

Las corrientes trifásicas desequilibradas del estator originan un calentamiento inadmisibles en el rotor -- del generador lo cual origina un daño serio si se permite -- que el generador funcione bajo estas condiciones.

Para esto el equipo de protección recomendado es el relevador de sobrecorriente de tipo inverso que funcio-- na de la salida de un filtro de corriente de secuencia nega-- tiva que se alimente de los transformadores de corriente del generador, este esquema se muestra en la Fig.4.3, el releva-- dor deberá conectarse para disparar el interruptor principal del generador.

IV.5.- PROTECCION CONTRA EL FUNCIONAMIENTO DEL GENERADOR COMO MOTOR SINCRONO.

La protección contra la motorización benefi-- cia principalmente al primotor o al sistema y no al genera--

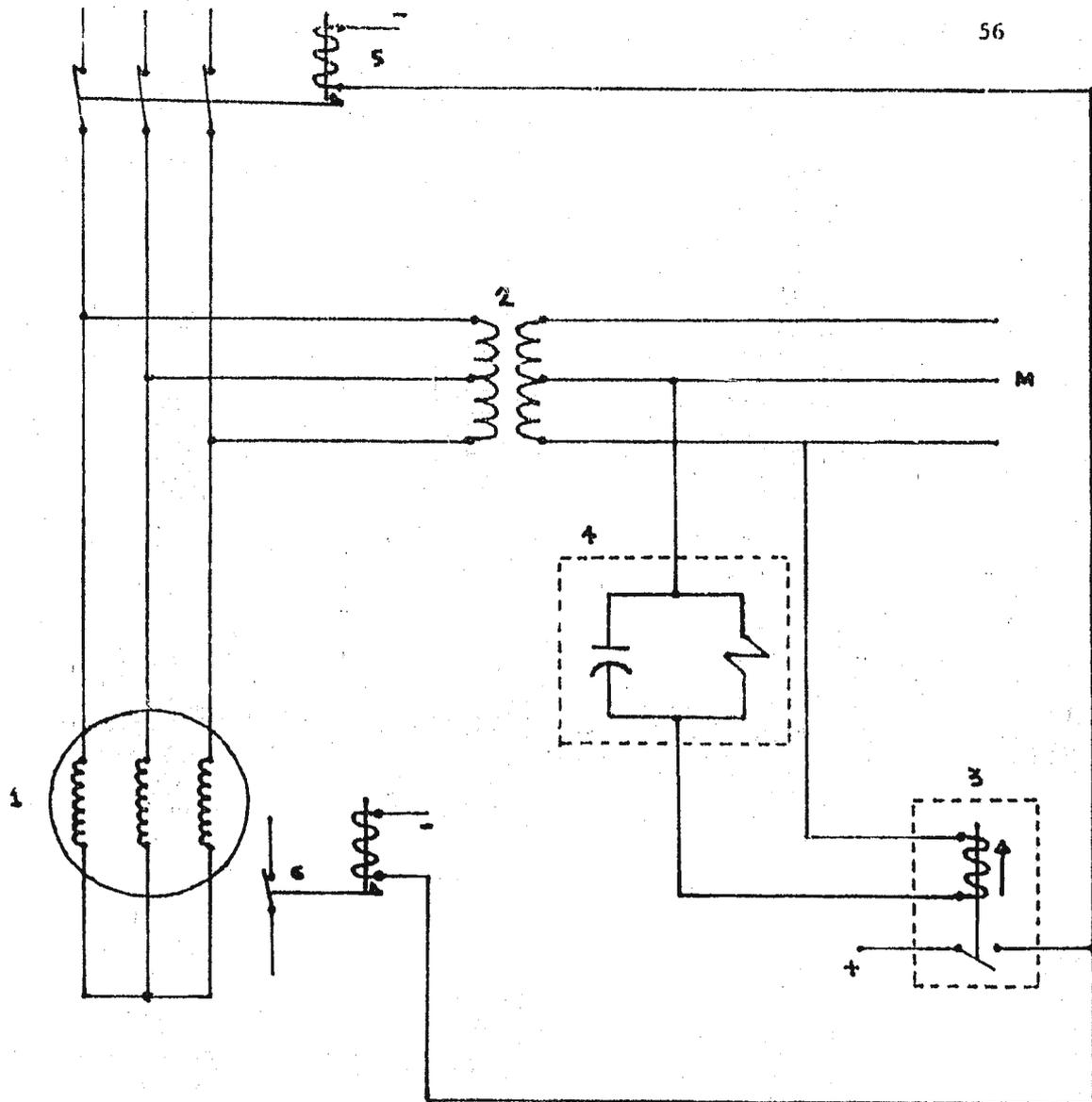


Fig.4.2.- Protección contra sobretensiones por medio de un relé de máxima tensión. 1.- Generador. 2.- transformador de tensión. 3.- Relé de máxima tensión. 4.- Dispositivo adicional. 5.- Interruptor del generador. 6.- Interruptor de excitación. M.- Conexión de los aparatos de medida.

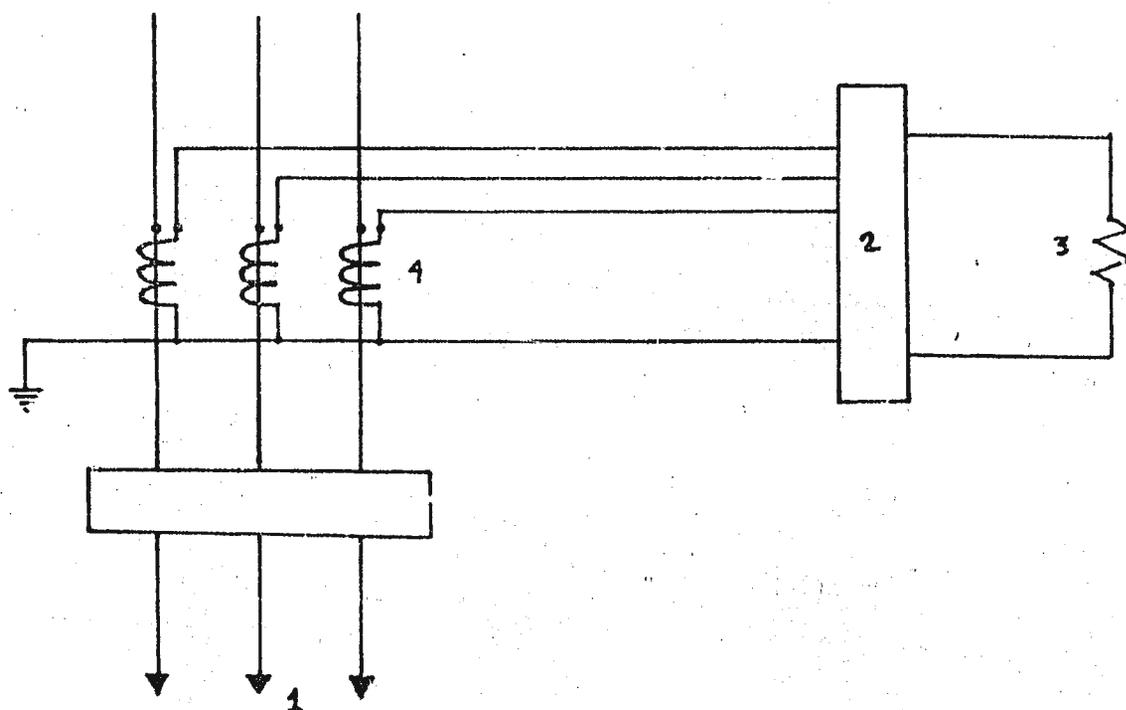


Fig.4.3.- Protección de sobrecorriente de secuencia negativa para corrientes desequilibradas del estator. 1.- Las terminales del generador. 2.- Filtro de corriente de secuencia negativa. 3.- Relevador de sobrecorriente. 4.- Transformadores de corriente.

por mismo, pues como puede verse cuando el agua que acciona una turbina hidraulica es retenida, o cuando por alguna causa, ya sea de una averfa se suprime la entrada de vapor en una turbina de vapor, sin que esté desconectado el interruptor del generador, éste último funciona entonces como motor-síncrono y acciona la máquina motriz (turbina hidraulica o de vapor).

Esta forma de funcionamiento puede producir un calentamiento inadmisibles de la máquina motriz. Para evitar éste tipo de falla se emplean relés direccionales de potencia.

IV.6.- PROTECCION CONTRA CORTOS CIRCUITOS ENTRE FASES.

Para éste tipo de anomalías se utilizan relés diferenciales, ésta protección entra en funcionamiento cuando existen cortos circuitos entre fases diferentes.

La protección diferencial provoca la desconexión del interruptor principal de la máquina y, también del interruptor de excitación; muchas veces, acciona además el dispositivo extintor. La protección diferencial de los generadores puede hacerse en base a las diferentes conexiones -- del mismo.

Las diferentes conexiones las podemos resumir de la siguiente manera:

a.- Protección diferencial de porcentaje para un generador conectado en estrella.

b.- Protección diferencial de porcentaje para un generador conectado en delta.

c.- Protección diferencial de porcentaje para un generador conectado en estrella con sólo cuatro terminales sacadas al exterior.

d.- Protección diferencial de porcentaje para una unidad generador-transformador.

e.- Protección diferencial de generador con una barra colectora de doble interruptor.

Como referencia podemos observar en la Fig. 4.4, las conexiones para el conocido arreglo de la unidad generador-transformador; notese que los TC en el lado neutro pueden utilizarse en común por los equipos de protección diferencial del generador y del motor.

Para lograr mayor sensibilidad de la protección diferencial, la corriente primaria de carga del TC debe ser igual a la corriente nominal del generador a plena carga. Sin embargo, en la práctica, la corriente primaria de carga, del TC es 25 % más elevada como máximo que la plena carga, de tal forma que si los amperímetros se conectan a los TC, sus deflexiones serán menores que la escala completa a la carga nominal.

IV.7.- PROTECCION CONTRA LOS DEFECTOS A TIERRA EN EL ARROLAMIENTO DEL ESTATOR.

Para éste tipo de fallas se muestra un esquema en la Fig. 4.5, en la cual se obtiene la sensibilidad requerida y evita la posibilidad de un funcionamiento indeseado debido a los errores de los TC para grandes corrientes de falla.

En la Fig. 4.5, se muestra un relevador direccional corriente-corriente cuya bobina de funcionamiento está en el neutro del circuito del relevador diferencial y cuya bobina de polarización está alimentada de un TC en el neu

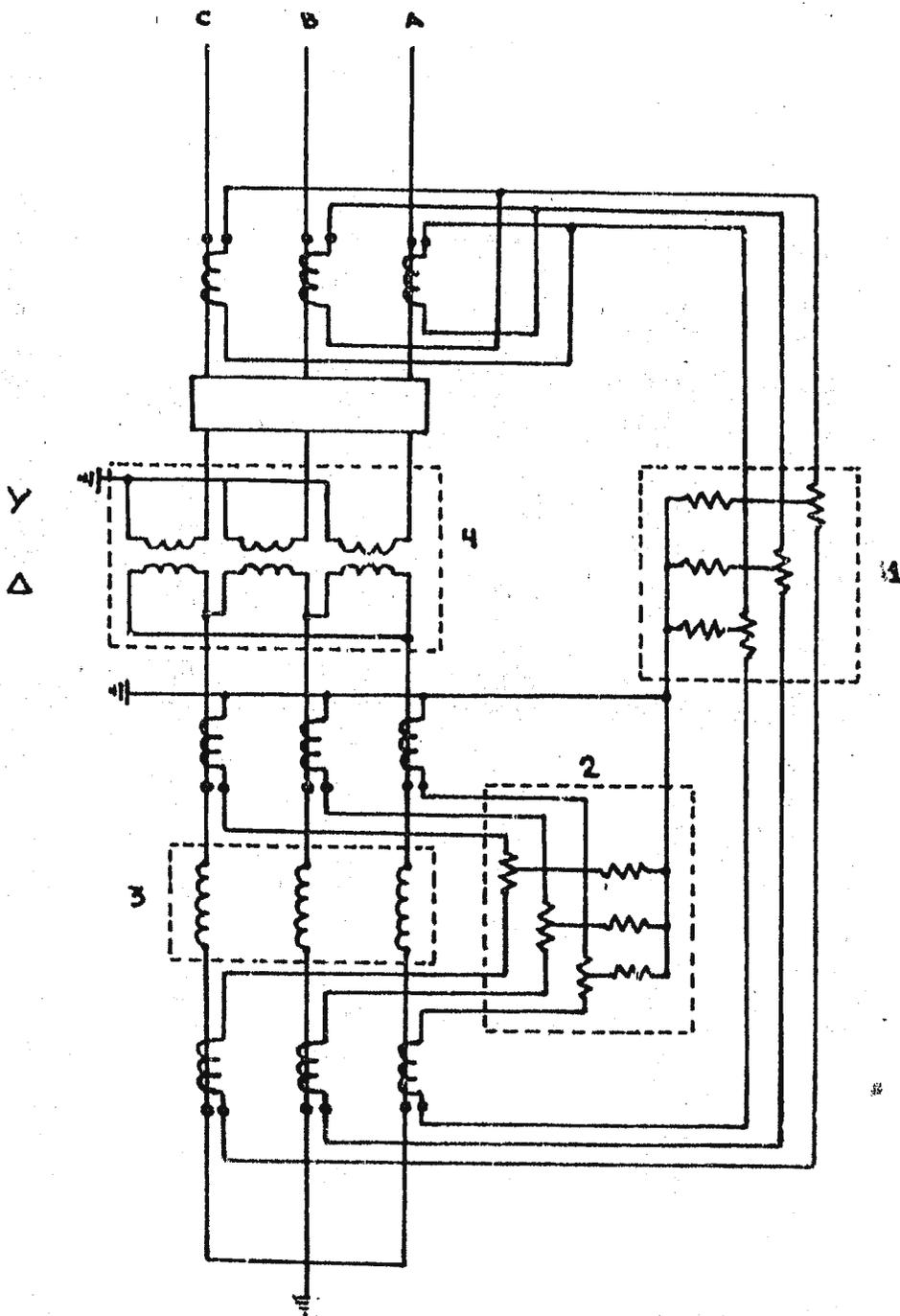


Fig.4.4.- Protección diferencial de porcentaje para una unidad generadora y un transformador. 1.- Relevador del transformador. 2.- Relevador del generador. 3.- Generador. 4.- Transformador.

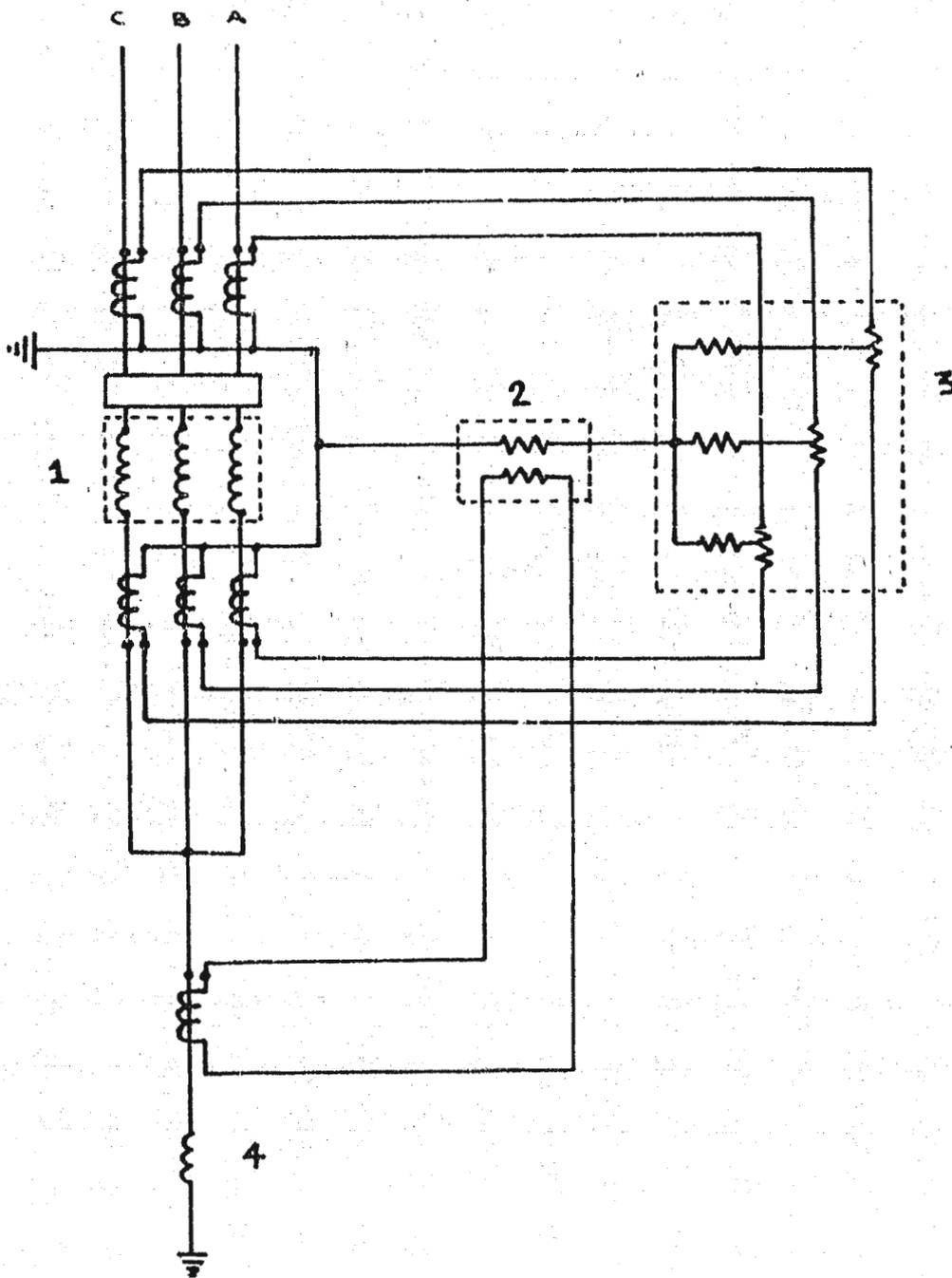


Fig.4.5.- Protección sensible contra fallas a tierra en el estator para generadores. 1.- Generador. 2.- Relé- vador direccional. 3.- Relevadores diferenciales. 4.- Impedancia neutral.

tro del generador.

IV.8.- PROTECCION CONTRA LOS DEFECTOS A TIERRA EN EL ARROLLAMIENTO DEL ROTOR.

Este tipo de falla no resulta peligroso si es una sola falla a tierra sin embargo si aparece una segunda - falla a tierra el esfuerzo unilateral de tracción magnética puede tener graves consecuencias para el generador como lo es combar la flecha del rotor, y hacerla excentrica. Para evitar este tipo de falla normalmente se emplea un relevador de sobretensión y un arreglo del mismo se muestra en la Fig. 4.6, del cual se observa que para una falla en cualquier par

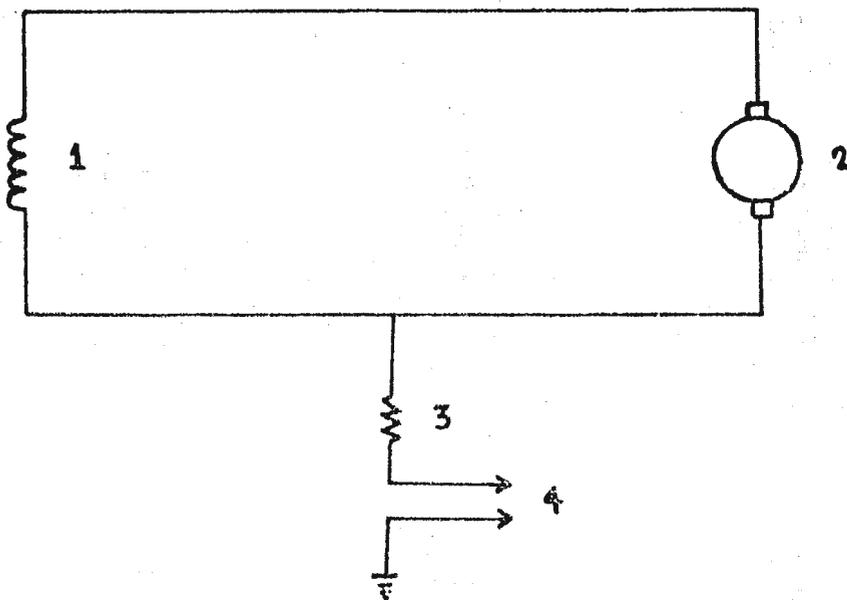


Fig.4.6.- Protección contra fallas a tierra en el campo del generador. 1.- Campo del generador. 2.- Armadura del excitador. 3.- Relevador de sobretensión. 4.- A la fuente de tensión.

IV.9.- PROTECCION CONTRA CORTOS CIRCUITOS ENTRE ESPIRAS
DE UNA MISMA FASE.

La necesidad de una protección contra los cortos circuitos entre espiras de una misma fase es requerida -- principalmente para generadores multicircuitos en la cual la posibilidad de corto circuito entre espiras es muy grande -- por lo cual es necesario ampliar dispositivo de protección. Para lo cual se emplea por lo general relevadores de sobre-- corriente, un arreglo de éste tipo de protección es el mos-- trado en la Fig.4.7, y el cual es conocido como protección -- de fase auxiliar.

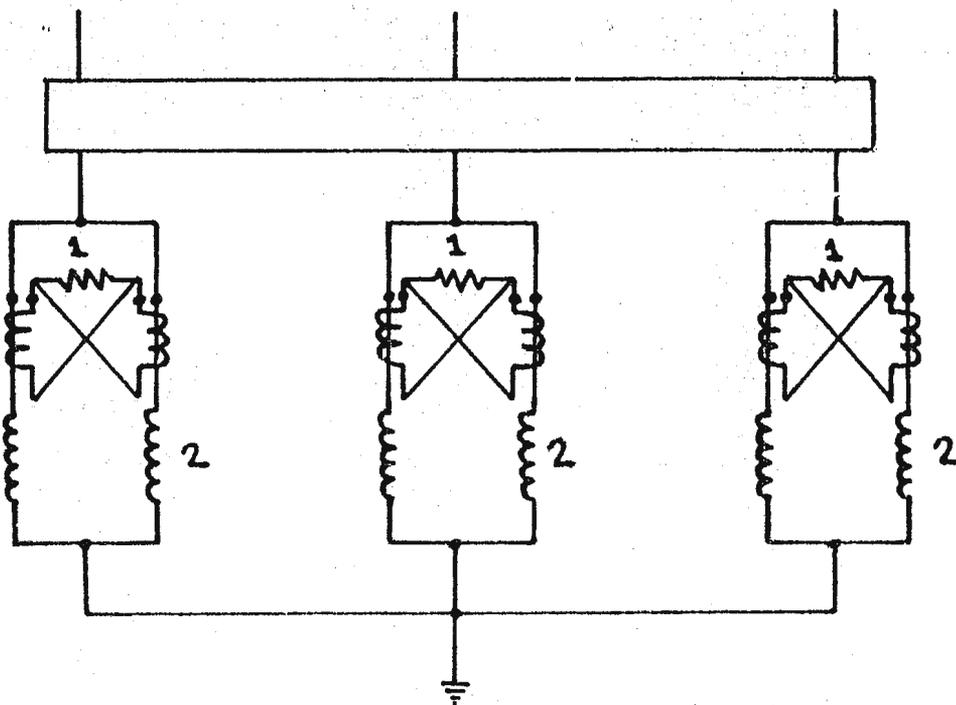


Fig.4.7.- Protección de fase auxiliar para un generador multicircuito. 1.- Relevador de sobrecorriente. 2.- arrollamiento del generador.

IV.10.- PROTECCION CONTRA PERDIDA DE LA EXCITACION.

Para el caso en que un generador sufre una -- desconexión accidental del circuito de excitación, éste tiene de a perder su sincronismo y crea una inestabilidad general en el sistema al cual éste contacto es por lo cual que se debe disponer de protección para evitar la pérdua de la excitación, tales dispositivos son por lo general relevadores dirireccionales que funcionan a partir de la corriente y tensión de c.a. en las terminales del generador.

También como una implementación completa para una buena protección de generadores se debe tener dispositivos de desexcitación rápida, así como también otro tipo de dispositivos auxiliares como son termostátos que controlan la temperatura de los cojinetes, indicadores de circulación de agua de los generadores con refrigeración forzada de los cojinetes por circulación de agua, así como también extintores de incendio. Y otro tipo de protección mecánica la cual no está clasificada como protección por relevadores, como lo es protección del primotor, el empleo y quemado de fusibles de los transformadores de potencial del generador.

V.- PROTECCION DE MOTORES.

V.1.- GENERALIDADES.

Los motores pueden ser dañados o reducida su vida efectiva cuando son sometidos a: sobrecargas sostenidas, cargas repentinas, cortos circuitos, la aceleración o desaceleración demasiado rápidas, las pérdidas de campo, las chispas y arcos en los contactos al desconectar las cargas o interrumpir circuitos excesivamente inductivos, la carencia de una fase en las distribuciones polifasicas, las cuales se pueden considerar como las más importantes por lo cual se requiere de un sistema de protección para cada caso en particular.

Los motores están diseñados para soportar corrientes transitorias de arranque o de rotor bloqueado sin elevación excesiva de temperatura, tomando en cuenta que el tiempo de aceleración no sea demasiado largo, ni el ciclo de trabajo demasiado frecuente.

Toda corriente en exceso de la corriente de plena carga, puede ser clasificada como sobrecorriente sin embargo, en general, debe hacerse una distinción basada en la magnitud de la sobrecorriente y en el equipo que va a protegerse.

Una sobrecorriente no mayor que la corriente de rotor bloqueado, generalmente es el resultado de una sobrecarga mecánica en el motor.

La protección contra este tipo de sobrecorriente

rriente será llamada como protección de sobrecarga.

La sobrecorriente originada por corto circuito a tierra, es mucho más elevada que las corrientes de rotor bloqueado.

En el equipo utilizado para proteger contra cualquier daño debido a este tipo de sobrecorriente, debe protegerse no solo el motor, sino también los conductores -- del circuito y el controlador de motor.

La protección contra este tipo de sobrecorriente la llamaremos protección por sobrecorriente, la cual abarca la protección contra altas sobrecorrientes, tales como las de corto circuito a tierra. Como la protección de sobrecarga difiere de la protección por sobrecorriente en los motores cada una de estas será discutida en forma separada.

V.2.- PROTECCION DE SOBRECORRIENTE.

La función del dispositivo protector de la so brecorriente, es la de sobreproteger a los conductores y cir cuitos derivados del motor, los aparatos de control y al motor mismo, de los cortos circuitos a tierra.

Los dispositivos protectores comunmente usados para censar y librar las sobrecorrientes, son los inte ruptores termomagnéticos, los fusibles, los relevadores de sobrecorriente y los relevadores diferenciales.

Deberá proporcionarse la protección contra una falla en cualquier conductor no puesto a tierra entre el dispositivo de inducción y el motor, que incluye los arrolla mientos del estator.

En donde se utilizan fusibles debe haber un elemento de protección en cada conductor no puesto a tierra. en donde se utilizan relevadores y TC se requiere un TC y un relevador por cada conductor no puesto a tierra.

Los dispositivos mencionados anteriormente se emplean tomando en cuenta la capacidad del motor así como también la importancia del mismo en un sistema para poder justificar su inversión.

V.3.- PROTECCION DE SOBRECARGAS.

Un motor como máquina demanda una corriente cuando está en operación, y que es proporcional a la carga, la cual va desde la corriente sin carga, hasta la corriente a plena carga.

Cuando la carga excede el par normal del motor, éste demanda una corriente más elevada que la corriente a plena carga y ésta condición se considera como sobrecarga. Las sobrecargas pueden ser eléctricas o mecánicas y un ejemplo de sobrecarga eléctrica es cuando un motor polifásico trabaja con una fase o línea con bajo voltaje.

El efecto de una sobrecarga es una elevación de temperatura en el devanado del motor, mientras mayor sea la sobrecarga, más rápidamente se incrementará la temperatura a un punto tal que dañe los aislantes y la lubricación del motor.

Todas las sobrecargas acortan la vida del motor por deterioro en el material aislante; por lo expuesto anteriormente es obvio decir que ésta protección es la más

importante en los motores y que los dispositivos más empleados son: relevadores de sobrecarga térmicos y magnéticos. -- Los relevadores de sobrecarga magnéticos reaccionan únicamente a los excesos de corriente y no son afectados por la temperatura.

Los relevadores de sobrecarga térmicos dependen de la elevación de temperatura causada por la corriente de sobrecarga, los relevadores térmicos de sobrecarga se subdividen en bimetálicos y aleación fusible.

V.3.1.- Relevador térmico de sobrecarga de aleación fusible. En este relevador la corriente del motor pasa por un pequeño devanado calefactor. Bajo condiciones de sobrecarga el calor causa que la soldadura especial se funda permitiendo que una rueda de trinquete gire libremente, abriéndose los contactos. Cuando esto ocurre se dice que el relevador se dispara, para su reposición esta se hace manualmente, para ello se tiene un botón de restablecimiento que se monta en la cubierta de los arrancadores.

V.3.2.- Relevador térmico de sobrecarga bimetálico. Estos relevadores emplean una tira bimetálica en forma de u, asociado con un elemento calefactor. Cuando ocurre una sobrecarga, el calor hace que el elemento bimetálico se desvía y abra un contacto.

V.3.3.- Relevador magnético de sobrecarga. Este tiene un núcleo magnético móvil dentro de una bobina que lleva la corriente del motor. El flujo magnético de la bobina empuja al núcleo hacia arriba abriendo los contactos del-

dispositivos de protección.

Este tipo de relevador se emplea para proteger a los motores que tengan largos periodos de aceleración o ciclos de trabajo no usuales.

Algunas veces es conveniente desconectar de la línea un motor tan pronto como alcance una situación de carga previamente determinada para lo cual suele emplearse un tipo especial de relé de sobrecarga de disparo instantáneo, este dispositivo desconecta la línea de alimentación tan pronto como se agarrotan los mecanismos, se atasca un sistema mecánico accionado por el motor o se aplica de repente carga muy pesada.

V.4.- PROTECCION CONTRA LOS ARCOS.

La apertura de un relé o contactor cuando hay corriente en el circuito va acompañada por lo general, de formación de arcos o chispas en el contacto, al separarse las superficies.

La eliminación de éste se realiza superponiendo un campo magnético sobre el arco, de tal forma que éste último, al actuar como un conductor flexible, estirable y portador de la corriente, se alargue y es obligado a elevarse. Por lo tanto el arco aumenta de longitud en virtud de la acción del campo, ayudando por la tendencia natural de un canal de calor ascendente y se extingue por si mismo cuando la tensión disponible es demasiado baja para la reducida intensidad de corriente en un espacio de amplitud simulada.

Para extinguir estos arcos se emplea una boji

na de extinción que suele conectarse en serie con el circuito en que se forman arcos al separarse las superficies de contacto.

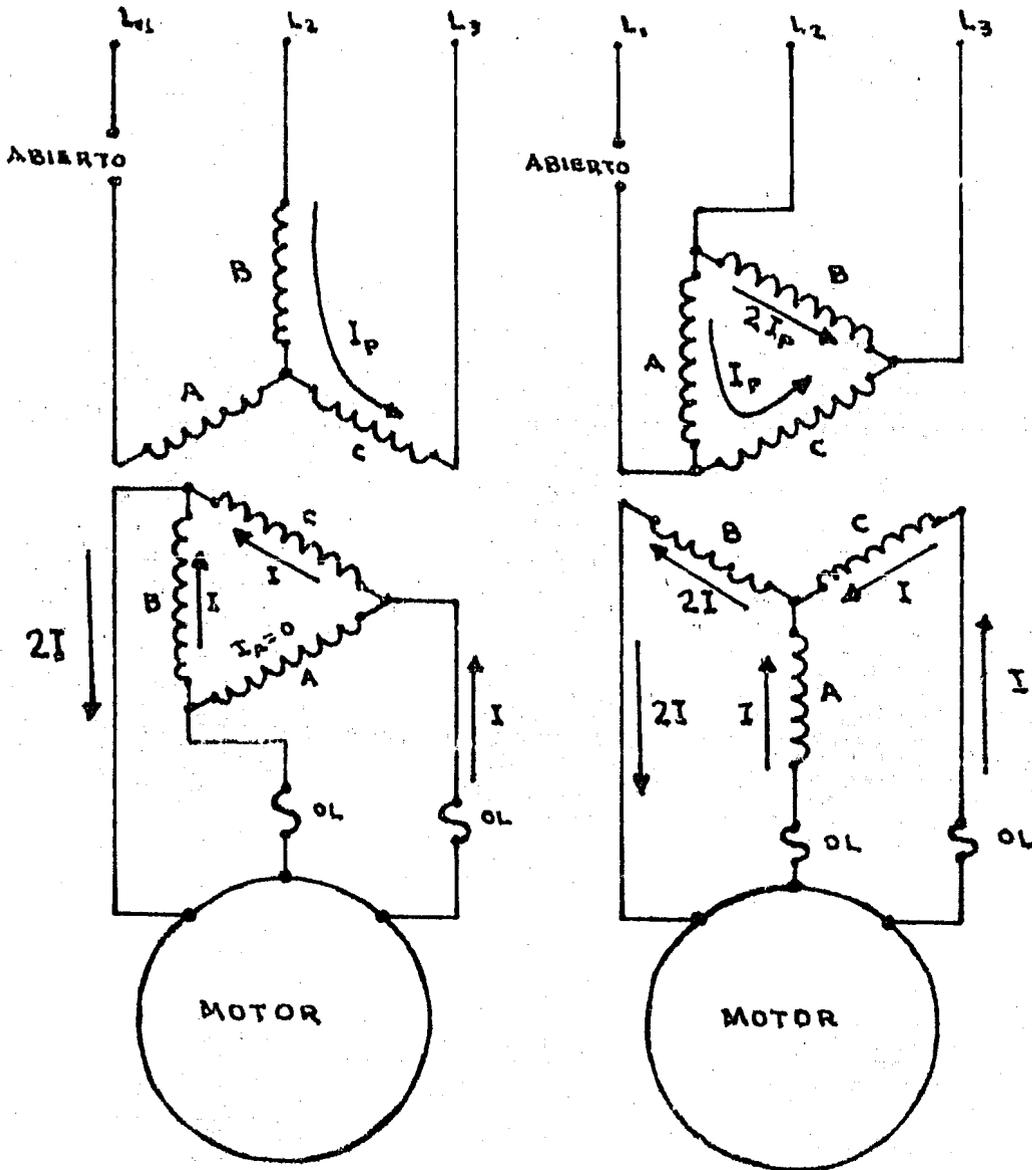
V.5.- PROTECCION DE MOTORES TRIFASICOS AL FALLAR UNA FASE.

Uno de los casos más graves de anormalidad en un circuito es el que puede presentarse cuando un motor trifásico se alimenta a través de su propio grupo, transformador en estrella-delta, y se interrumpe uno de los conductores de la línea de alimentación.

Si ocurre esto con el motor en marcha, la máquina funciona con una fase abierta, y entonces, por cada uno de los hilos intactos de la línea de alimentación, tomá un 73% más de intensidad de la que toma normalmente al funcionar con las tres fases. Además, uno de los tres conductores del motor lleva entonces doble corriente de la que transporta cada uno de los otros dos, por lo cual, si no se ha instalado en ésta línea un relé de sobrecarga, puede quemarse el motor. En la Fig.5.1, se ilustra la falla y consecuencias de los dos tipos de arreglo mencionados; en resumen para tener una eficiente protección se debe proteger las tres fases del motor.

V.6.- PROTECCION CONTRA LA BAJA TENSION.

En las instalaciones en que son frecuentes y breves las interrupciones es muy conveniente contar con circuitos especiales que funcionen de tal manera que el motor quede conectado a la red después de algunos segundos del cor



CONEXIONES Y-Δ
DEL TRANSFORMADOR.

CONEXIONES Δ-Y
DEL TRANSFORMADOR.

Fig.5.1.- Diagrama de las corrientes durante el funcionamiento (monofásico), de un motor trifásico con un conductor de la línea de alimentación interrumpido.

te o descenso de tensión en el suministro de energía de modo que, si esto se restablece, dentro de un tiempo dado, el motor puede seguir funcionando automáticamente sin necesidad de un nuevo arranque.

En la Fig.5.2, se ilustra una disposición con dos relés de acción diferida posterior a la de excitación, - que proporcionará una real protección contra las bajas de -- tensión.

Al oprimir el boton de arranque, el motor recibe energía en cuanto el contacto M se excita a través del contacto TR1-T.O., el cual se cierra instantáneamente. Después si queda interrumpida la corriente o se presentará una caída de tensión, el contacto M se abriría naturalmente, pero seguiría conectado a la red durante varios segundos, es - decir, hasta que el relé TR1 finalizará la temporización y - abrirse el contacto TR 1-T.O. si la corriente se restablece después de abrir TR1- T.O., será necesario un nuevo arranque esta vez a mano; pero si ello ocurre antes de abrir ese contacto, el contacto M se excitará automáticamente y permitirá que el motor siga funcionando después de haber desacelerado ligeramente.

Cuando se oprime el boton de paro para detener el motor, se activa el relé TR2, e instantáneamente se abre su contacto TR2-t.c., para desexcitar el contactor M. -- Sigue luego la inactivación del relé TR1, que está graduado para que se abra su contacto TR1-T.O. antes del cierre del - TR2- T.C.

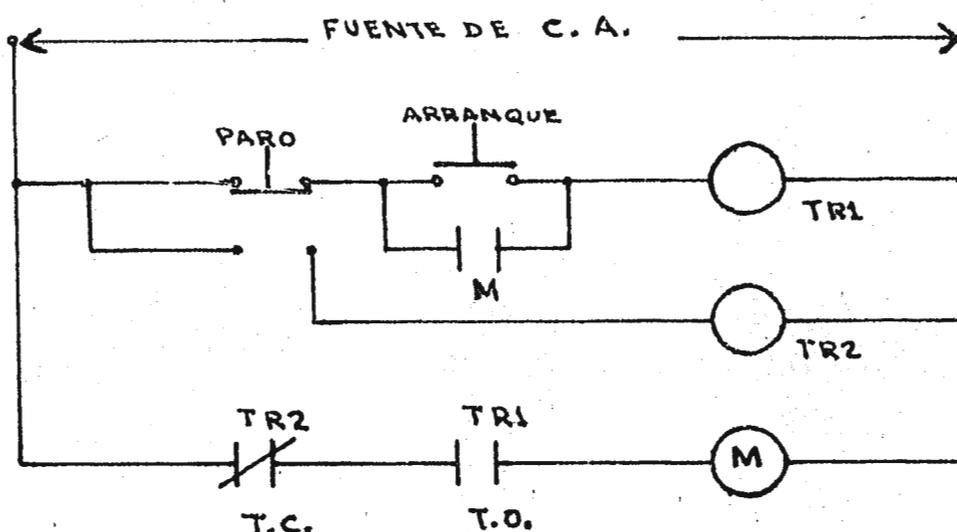


Fig.5.2.- Circuito de protección contra subtensiones, cuyo retardo es proporcionado por relés temporizados

V.7.- PROTECCION CONTRA LA PERDIDA DE SINCRONISMO.

Todos los motores síncronos cargados al arranque deberán tener protección contra la pérdida de sincronismo, dispuesta de tal modo que permita retirar en forma temporal la carga y la excitación para aplicarlas cuando se permita.

El tipo de protección que se proporciona en estos casos es por medio de un relevador de sobrecorriente de tiempo inverso, alimentado por la corriente en la conexión giratoria dispuesto para disparar el interruptor principal.

Cabe hacer mención que esta protección, aunque en forma indirecta, proporciona protección contra la pérdida de la excitación.

Mediante un relevador de baja corriente de re
posición de acción retardada, de ajuste bajo, cuya bobina de
be instalarse en serie con el arrollamiento del campo.

VI.- PROTECCION DE TRANSFORMADORES.

VI.1.- GENERALIDADES.

Los transformadores dentro de un sistema eléctrico juegan un importante papel en la continuidad del servicio es por ello que se debe disponer de una protección adecuada para evitar fallas que dañen al mismo y así evitar interrupciones en dicho sistema.

Para la protección de grandes transformadores se emplean solamente dispositivos selectivos sensibles y de acción rápida.

En cuanto a pequeñas unidades y de transformadores de mediana potencia para alimentación únicamente unilateral bastará con fusibles y con relés temporizados de máxima intensidad.

La protección contra sobrecargas puede realizarse con imagenes térmicas y con relés térmicos. Además resulta muy conveniente la vigilancia de la temperatura del aceite, para lo cual se utilizan termómetros especiales.

La falla o fallas más comunes que pueden sufrir los transformadores son los cortos circuitos, circuitos abiertos y sobrecalentamientos en los arrollamientos del mismo, las fallas contra las cuales se pone mayor cuidado en su protección es contra los defectos internos de aislamiento, los cortos circuitos entre espiras y los cortos circuitos entre fases, para lo cual por regla general se emplean los relés diferenciales de porcentaje y el relé buchhols.

VI.2.- PROTECCION POR MEDIO DEL RELE BUCHHOLS.

La protección buchhols es simple y eficaz, y debe emplearse en todos los transformadores en aceite, equipados con depósito de expansión y cualquiera que sea su potencia.

La acción del relé buchhols está basada en el hecho de que cualquier accidente que provenga a un transformador está precedido de una serie de fenómenos, sin gravedad, a veces imperceptible pero que, a la larga, conducen a la destrucción del transformador. Por lo tanto bastará con detectar los primeros síntomas de la perturbación y avisar el hecho mediante una señal acústica u óptica; no es necesario, en este caso, poner el transformador inmediatamente fuera de servicio, sino tener en cuenta la circunstancia y desacoplar el transformador cuando lo permitan las condiciones de la excitación.

VI.2.1.- Funcionamiento del relé buchhols. El receptáculo a normalmente lleno de aceite, contiene, dos flotadores b_1 y b_2 , móviles al rededor de ejes fijos Fig.6.1. - Si a consecuencia de un defecto poco importante, se producen pequeñas burbujas hacia el depósito conservador de aceite. - Estas burbujas son captadas por el aparato y almacenadas en el receptáculo, donde el nivel del aceite baja progresivamente, a medida que las burbujas llenan el espacio superior del receptáculo. Como consecuencia, el flotador superior b_1 se inclina y, cuando la cantidad de gas es suficiente cierra sus contactos c_1 , que alimentan el circuito de alarma d --- Fig.6.2. Si continúa el desprendimiento de gas, el nivel de-

aceite en el receptáculo baja hasta que los gases puedan alcanzar la tubería que los lleva hasta el depósito conservador.

El flotador inferior b_2 conserva su posición de reposo mientras sea lento el desprendimiento de gases si el defecto se acentúa, el desprendimiento se hace violento y se producen grandes burbujas, de tal forma que a consecuencia del choque el aceite refluye bruscamente a través de la tubería hasta el depósito conservador de aceite.

Este flujo de aceite encuentra el flotador b_2 y lo acciona, lo que provoca el cierre de los contactos c_2 .- Estos accionan, a su vez, el mecanismo de desconexión f de los interruptores de los lados de alta y baja tensión del transformador, poniendo a este fuera de servicio como se muestra en la Fig.6.3.

Una observación de la cantidad y aspecto de los gases desprendidos permite conocer y localizar la naturaleza y la gravedad del defecto. El color de estos gases de buena indicación sobre el lugar donde se ha producido el defecto, por ejemplo:

Gases blancos.- Proceden de la destrucción del papel.

Gases amarillos.- Proceden de la deterioración de piezas de madera.

Gases negros o grises.- Proceden de la descomposición del aceite.

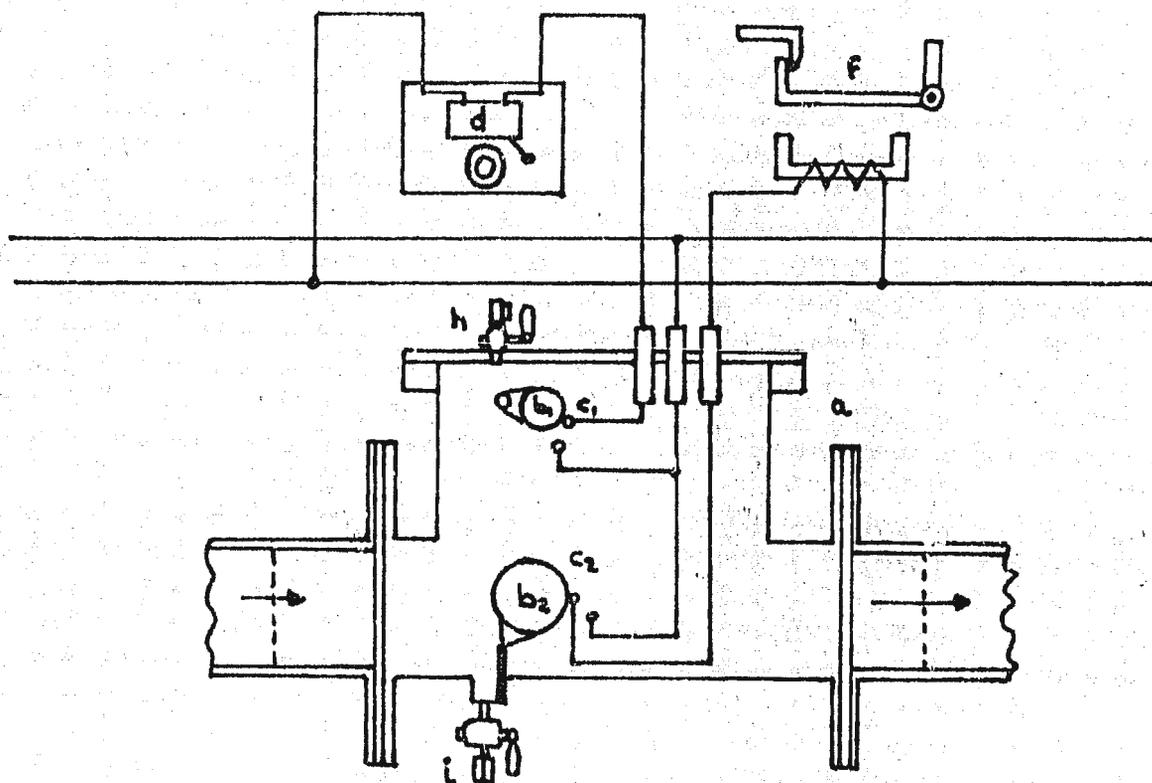


Fig.6.1.- Funcionamiento del relé buchhols en caso de servicio normal del transformador.

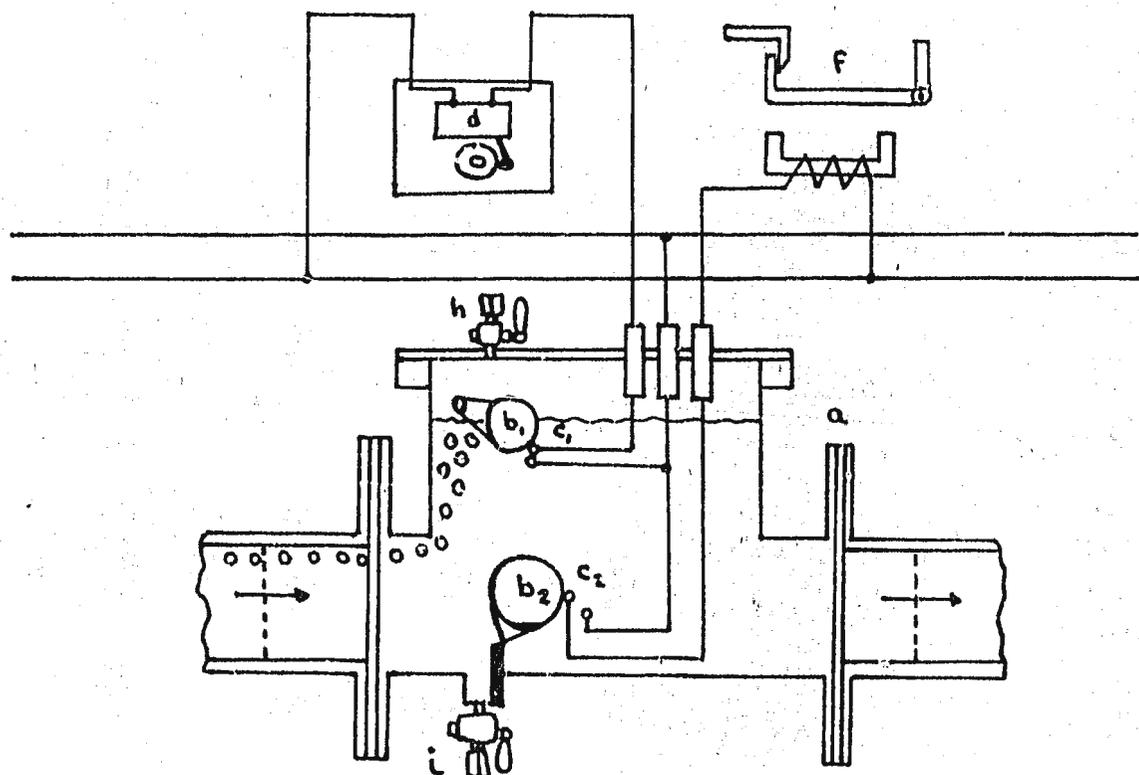


Fig.6.2.- Funcionamiento del relé buchhols en caso de aparición de pequeños defectos en el transformador.

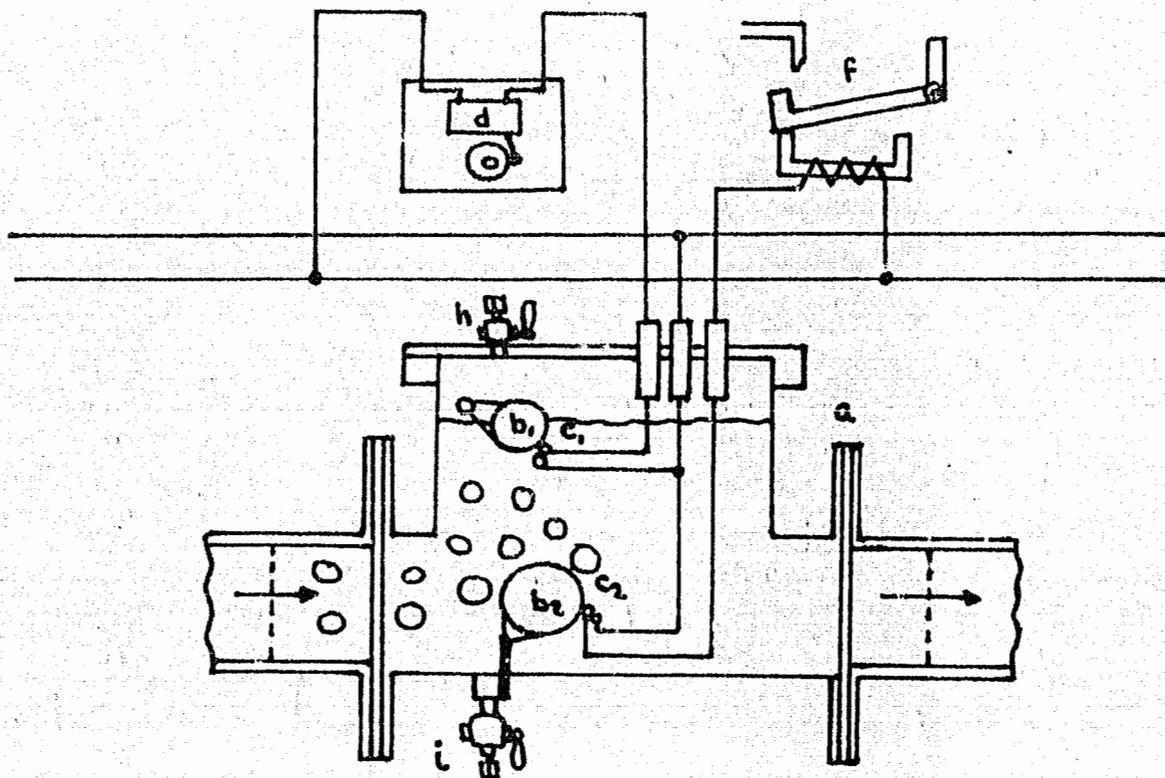


Fig.6.3.- Funcionamiento del relé buchholz en caso de aparición de un grave defecto en el transformador.

VI.2.2.- Defectos más importantes captados -- por el relé buchhols.

1.- En caso de ruptura en una conexión, se -- produce un arco, que se alarga rápidamente por fusión de los conductores y que, cebándose en seguida en otra parte del bobinado puede provocar un corto circuito con todas sus desastrosas consecuencias. Este arco volatiliza el aceite y los efectos de este tipo también quedan señalados por las humaredas de aceite que se escapan por la cuba.

2.- En caso de defectos de aislamiento a tierra, ante todo se produce un arco entre este punto del bobinado y la cuba o cualquier otra parte del cuerpo del transformador. Este arco volatiliza y descompone el aceite, que afluye hacia este sitio del bobinado, rompiendo el arco, lo que provoca serias quemaduras, frecuentemente este defecto a tierra es ocasionado por sobretensiones.

3.- En caso de corto circuito o de sobrecarga brusca se produce, antes que nada, un fuerte aumento de temperatura, principalmente en las capas interiores del bobinado. El aceite contenido en las bobinas queda bruscamente volatilizado y descompuesto. Los gases que resultan son lanzados violentamente al exterior de los arrollamientos como si se tratara de una explosión, bajo la forma de pequeñas burbujas, rechazando una cantidad de aceite correspondiente.

4.- A consecuencia de modificaciones en las propiedades químicas del aceite, que reducen su rigidez electrostática, puede suceder que algunos sitios queden sometidos a sollicitaciones electrostáticas particularmente eleva--

das. Se producen descargas que, al principio, no tienen ninguna importancia pero cuya continuada repetición puede afectar seriamente al transformador. Evidentemente, estas descargas descomponen el aceite y provocan la formación de gases.

5.- Si las juntas entre los núcleos y las culatas están mal realizadas o si el aislamiento de los remaches que aprietan los paquetes de chapas está deteriorado, pueden producirse intensas corrientes de Foucault. Este accidente también provoca un aumento local de la temperatura, vaporizando el aceite y provocando la formación de gases.

De lo descrito anteriormente indica ya la importancia de la protección buchhols si algunas veces este dispositivo es importante para impedir un deterioro del transformador que protege tiene la ventaja de que en todos los casos impide que la avería se haga mayor.

Particularmente el empleo del relé buchhols impedirá las peligrosas explosiones e incendios de aceite que pueden producirse a consecuencia de una avería en el transformador.

VI.3.- PROTECCION DIFERENCIAL DE TRANSFORMADORES.

La protección diferencial detecta los cortos circuitos y las dobles puestas a tierra en las que, por lo menos, una de las puestas a tierra se encuentra en su dominio de protección, también detecta todos los cortos circuitos entre espiras.

En la protección diferencial se comparan las corrientes a la entrada y a la salida del aparato protegido.

El relé diferencial entra en acción cuando es atravesado por una corriente diferencial que sobrepasa un cierto valor.

En el caso de transformadores, la corriente magnetizante provoca en todos los casos, la aparición de una corriente diferencial. Por esta razón, el relé debe regularse para funcionar por encima de una corriente mínima de funcionamiento, valor que es superior a la corriente diferencial correspondiente al valor más elevado que puede tomar la corriente magnetizante; tal corriente puede aparecer, particularmente en caso de un aumento pasajero de la tensión de la red.

Normalmente, la función del relé inicia con una corriente mínima comprendida entre 20 y 45 % de la corriente nominal del transformador.

VI.4.- PROTECCION DIFERENCIAL DE TRANSFORMADORES CON DOS ARROLLAMIENTOS.

Para la protección diferencial hay que situar un transformador de intensidad en cada fase y prever un equipo trifásico de relés.

En el caso de transformadores con acoplamientos estrella-estrella, sin puesta a tierra del punto neutro, los montajes que no llevan más de dos relés o también, un sólo relé, alimentado por la corriente compuesta de dos fases, no funcionan en caso de un doble defecto a tierra en el transformador, así, si éste defecto a tierra se encuentra en la fase sobre la que no se ha montado el transformador de intensidad. Para que por el relé diferencial pase una corriente -

diferencial conveniente, el esquema del circuito secundario debe adaptarse al acoplamiento del transformador protegido.

En principio, los transformadores de intensidad deben conectarse en delta sobre el lado en que el transformador principal esté conectado en estrella, de esta forma, en caso de puesta a tierra del punto neutro o de conexión de una bobina de extinción, el relé no funciona, bajo la acción de la corriente homopolar que circula de un solo lado, si el defecto a tierra se encuentra en el exterior de la zona protegida. Por el contrario, los transformadores de intensidad de un arrollamiento conectado en delta, deben conectarse en estrella.

En la Fig.6.4, se muestra el esquema de conexiones de un relé diferencial, con los transformadores de intensidad conectados como se menciona.

VI.5.- PROTECCION DIFERENCIAL DE TRANSFORMADORES CON TRES ARROLLAMIENTOS.

En principio hay que prever de dos relés diferenciales por fase como se muestra en la Fig.6.5, en el relé TGI, se forma la suma geométrica de las corrientes de las redes I y II, mientras que el relé TGII mide la suma de las corrientes entre la red III y las otras dos.

En caso de un corto circuito, la influencia de las bobinas de retención es algo diferente según el circuito en que se haya producido el defecto y según la importancia relativa de las potencias de los alternadores de cada una de las redes.

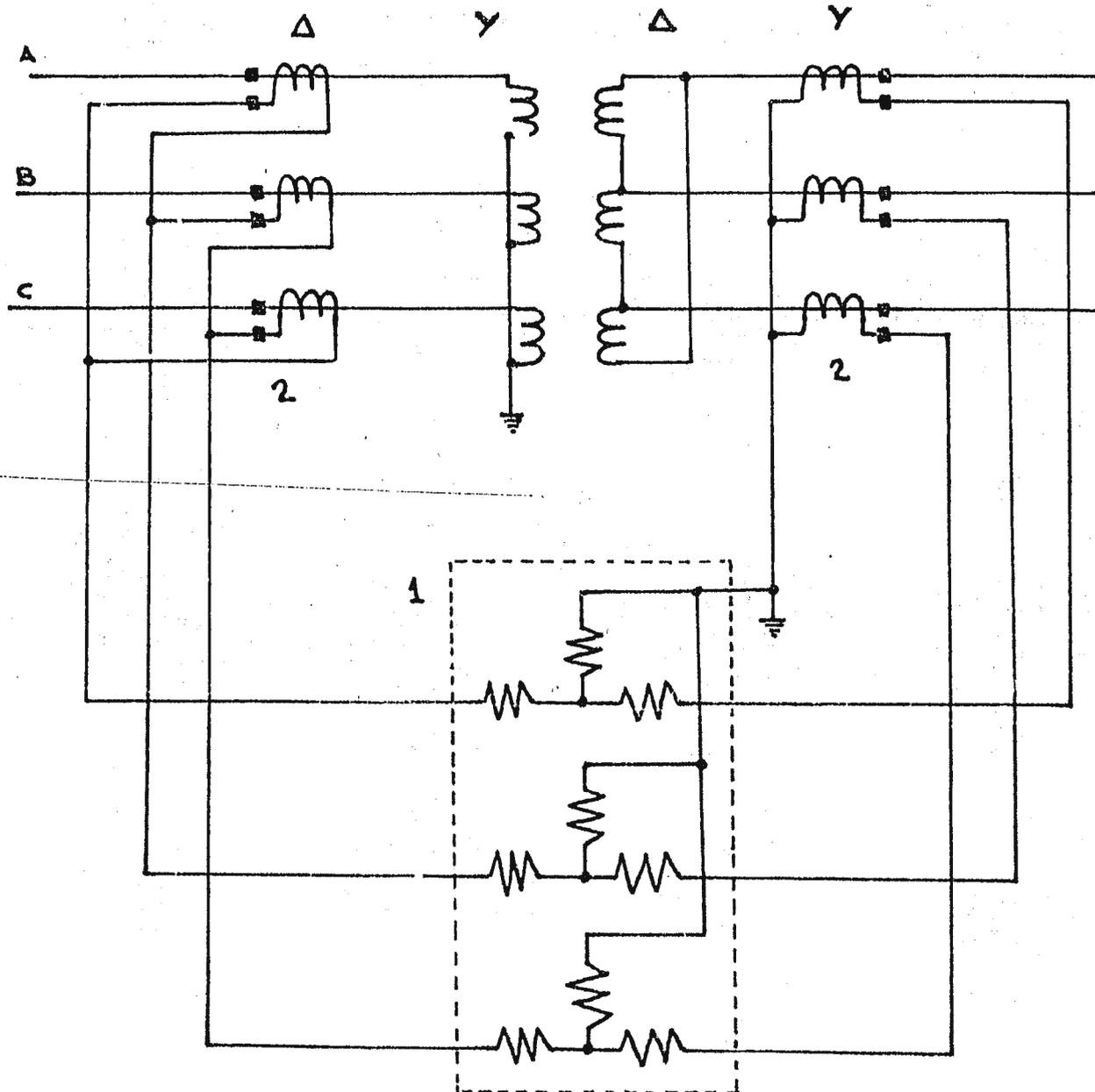


Fig.6.4.- Arreglo de los transformadores de corriente que alimentan los relevadores diferenciales cuando tenemos al -- transformador en delta-estrella. 1.- Relé diferencial. 2.- -- transformador de corriente.

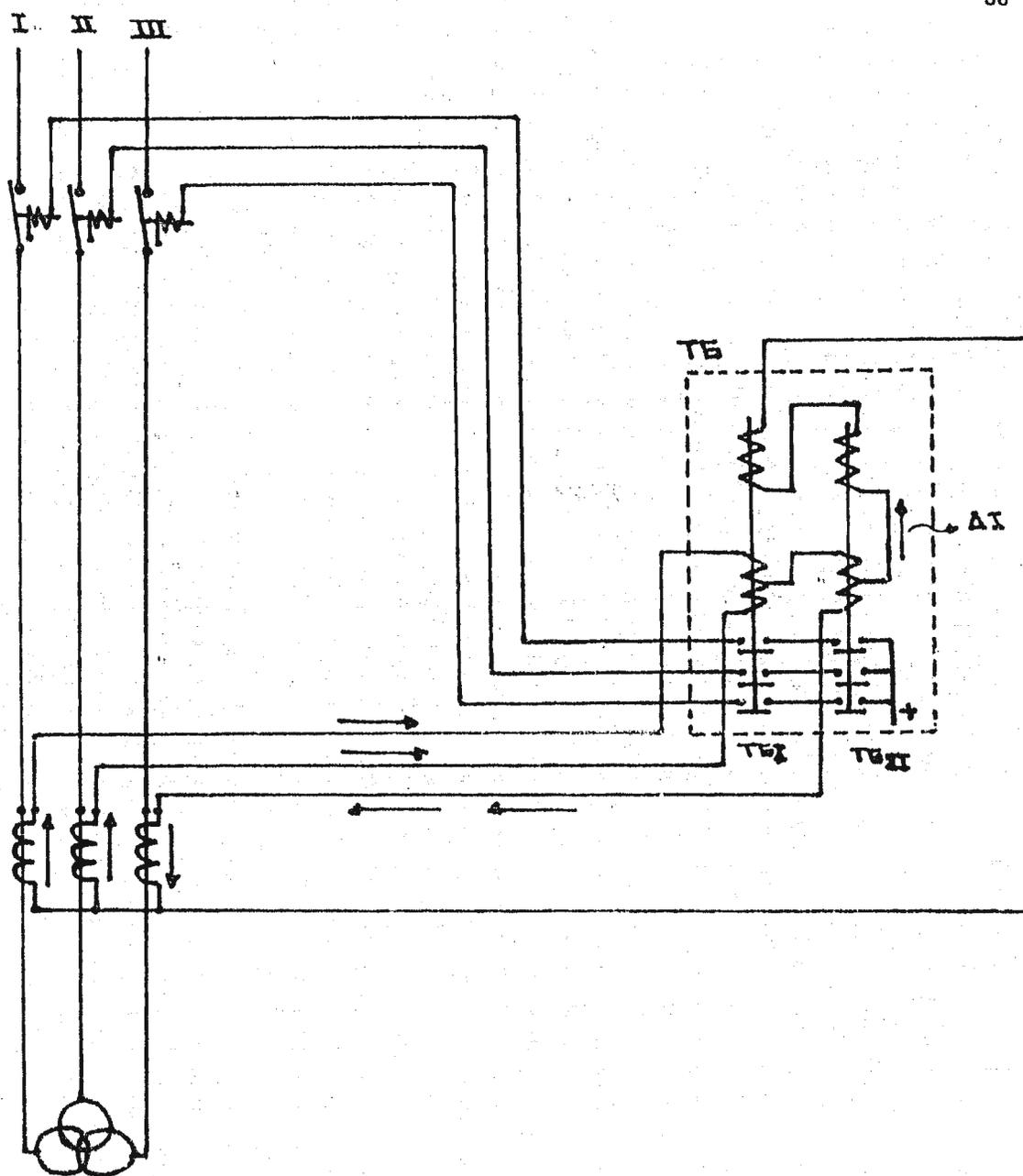


Fig.6.5.- Esquema unifilar de la protección diferencial de un transformador de tres arrollamientos.

TG's - Relés diferenciales. ΔI - Corriente diferencial.

Los relés deben estar conectados a los transformadores de intensidad de los tres arrollamientos de forma que el arrollamiento que tenga la mayor gama de regulación ejerza la acción antagonista más importante.

Los contactos de desconexión de los dos relés diferenciales de cada una de las fases, deben conectarse en serie, porque para determinado tipo de efectos, un relé no ejerce acción antagonista, lo que podría provocar una desconexión intempestiva a consecuencia de la posible existencia de corriente de error ΔI en los transformadores de intensidad.

VI.6.- PROTECCION DIFERENCIAL DE AUTOTRANSFORMADORES.

Esta protección es la misma que para los transformadores con dos arrollamientos y debe emplearse sobre las tres fases, aun en el caso en que el punto neutro no esté puesto a tierra como se indica en la Fig.6.6 para evitar que a causa de defectos exteriores a la zona de protección funcionen intempestivamente los relés, los dos grupos de transformadores de intensidad deben conectarse en delta en el secundario.

Como los autotransformadores están dimensionados para débiles tensiones de corto circuito, en caso de corto circuito pueden ser atravesados por corrientes muy elevadas. Por esta razón, hay que tener en cuenta que los errores de la relación de transformación de los transformadores de intensidad, no pasen de 5 % aun para las corrientes más intensas que puedan aparecer.

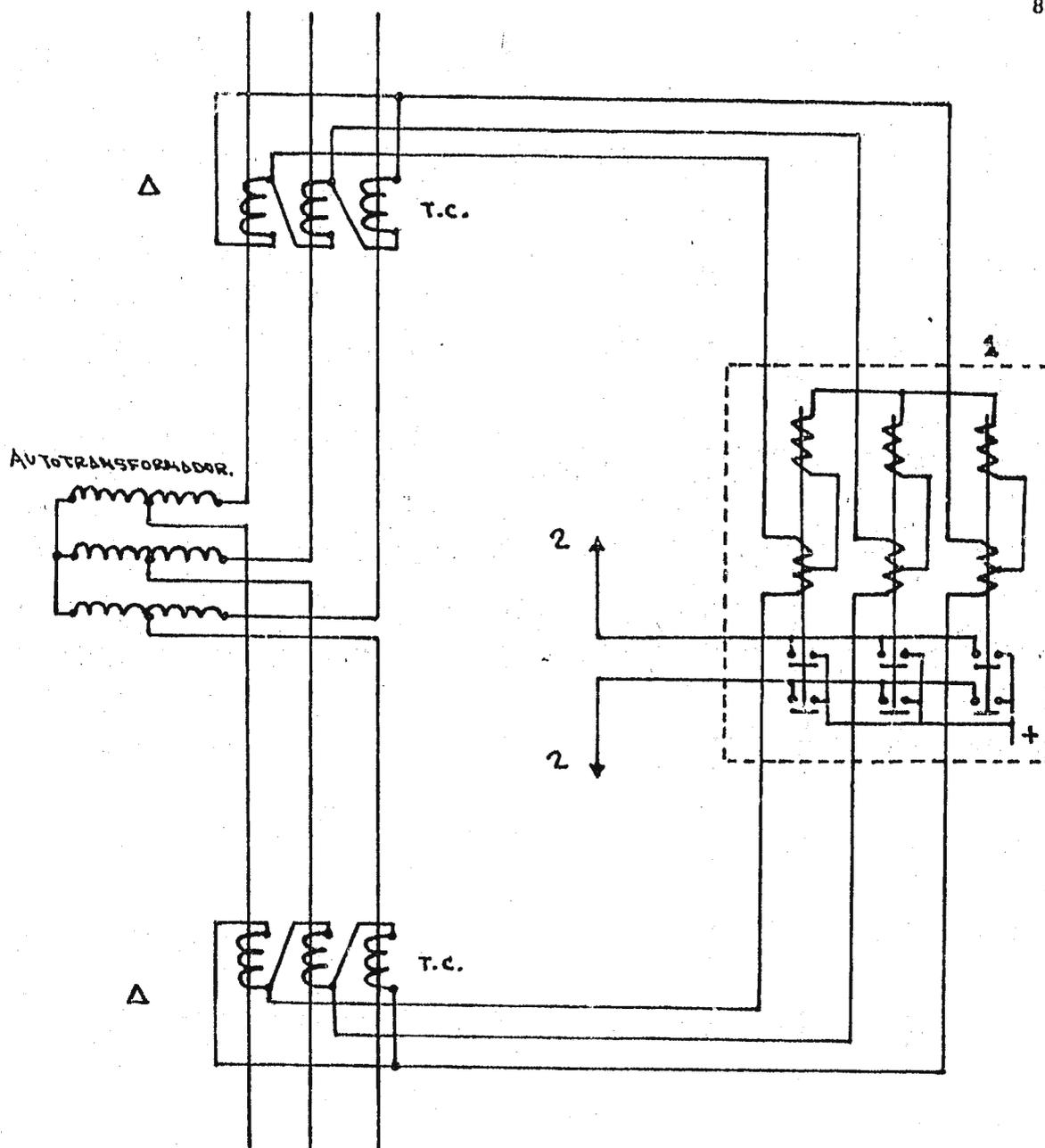


Fig.6.6.- Esquema de la protección diferencial de un auto -- transformador. 1.- Relé diferencial. 2.- Hacia el dispositivo de desconexión.

VI.7.- PROTECCION CONTRA DEFECTOS INTERNOS DE TRANSFORMADORES DE MEDIANA POTENCIA.

Para la protección contra cortos circuitos en el caso de transformadores de mediana y pequeña potencia, pueden utilizarse relés temporizados de máxima intensidad primarios o secundarios.

Los cortos circuitos pueden proceder de la parte situada antes del transformador (lado de la fuente de energía) o de la parte situada después del transformador.

Las corrientes de corto circuito antes del transformador pueden eliminarse sin dificultad y sin ningún retardo, mientras que en caso de corto circuito después del transformador, es indispensable prever un escalonamiento del tiempo de conexión con relación a los dispositivos de protección de la red situados después del transformador.

Para conocer si hay que prever su equipo de protección bipolar o tripolar, hemos de tener en cuenta, antes que nada, la puesta a tierra de los puntos neutros de las redes correspondientes. En caso de puesta a tierra directa y, también en redes de cuatro conductores, hemos de recurrir a un equipo tripolar.

La protección más sencilla para los transformadores utilizados en la alimentación de redes de baja tensión, está constituida por cortacircuitos de gran poder de ruptura, que deben instalarse siempre sobre las tres fases.

Sin embargo, cuando exista un interruptor de potencia sobre el arrollamiento sometido a la tensión superior, deberán utilizarse para la protección contra los cor--

tos circuitos, dos relés directos temporizados de máxima intensidad con retardo independiente de la corriente y para la protección contra sobrecargas, un relé térmico directo, situado en la fase desprovista de los anteriores, o bien, los relés secundarios correspondientes cuando existan transformadores de intensidad.

VI.8.- PROTECCION DE LOS TRANSFORMADORES CONTRA SOBRECARGAS.

La protección de los transformadores contra sobrecargas debe proteger los aislantes de sus arrollamientos contra los desgastes provocados por un calentamiento inadmisibles.

La protección utilizada es por medio de imágenes térmicas y relés térmicos primarios o secundarios.

Protección por medio de imágenes térmicas. Esta es empleada sólo para grandes transformadores para los cuales se considera importante, poder medir o registrar a distancia, la temperatura del arrollamiento, por regla general, se utilizan tres o más imágenes térmicas situadas sobre el arrollamiento del transformador. En la Fig.6.7, se ilustra el funcionamiento de una imagen térmica; se ha supuesto que el recipiente que contiene el termómetro está sumergido en la parte superior del aceite del transformador. Como puede observarse la bobina de calefacción está conectada al secundario de un transformador de intensidad, por medio de un autotransformador; por lo tanto, la temperatura de la bobina de calefacción es proporcional a la corriente que atraviesa el transformador, circunstancia que puede aprovecharse, para

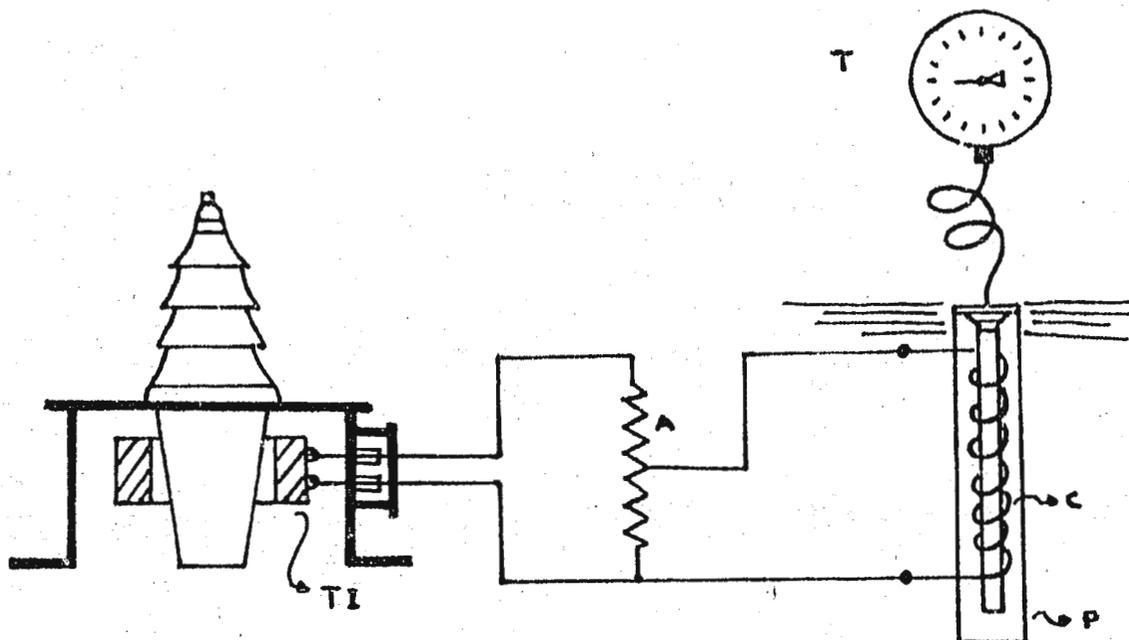


Fig.6.7.- Esquema de montaje de la imagen térmica. TI.- --- transformador de intensidad. A.- Autotransformador C.- Bobina de calefacción. P.- Recipiente del termómetro. T.- termómetro de cuadrante.

caso de corto circuito detrás del transformador por un tiempo de desconexión más elevado, lo que proporciona el margen necesario para la regulación de los relés del transformador.

VII.- PROTECCION DE BUSES.

VII.1.- INTRODUCCION.

La protección diferencial es nuevamente el mé todo más sensible y confiable para la protección de buses. El problema en estas aplicaciones es el gran número de circuitos involucrados y, por lo tanto, los diferentes niveles de energización que se encuentran en los diversos circuitos para fallas externas. Por ejemplo, con una falla externa en uno de los circuitos de un bus de seis circuitos, cinco de los transformadores de corriente pueden suministrar cantidades variables de corrientes de falla pero el sexto circuito debe balancear el total de todos los demás. Así pues, está energizado a un nivel mucho más elevado y cercano al de saturación o frecuentemente con grados variables de saturación que producen corrientes diferenciales elevadas y falsas. Por las mismas razones generales, la saturación de c.d. también es desigual.

La saturación de c.d. es una condición muy se vera más aún que la saturación de c.a. porque una cantidad relativamente pequeña de c.d. de una onda de falla asimétrica satura el núcleo del transformador y reduce apreciablemen te la salida del secundario.

Existen varios métodos para resolver estos -- problemas, de los cuales tres están en uso común, estos tres pueden catalogarse como sigue:

- 1.- Eliminar el problema eliminando el hierro del transformador de corriente.

2.- Usar un relevador diferencial de porcentaje variable multilimitante diseñado especialmente para que sea insensible a la saturación de c.d.

3.- Relevador diferencial operado por voltaje de impedancia elevada con un circuito resonante en serie para limitar la sensibilidad de la componente de c.d.

VII.2.- SISTEMA CONECTOR LINEAL O TRANSFORMADOR DE CORRIENTE NUCLEO DE AIRE.

Este sistema proporciona protección al bus sumamente confiable y de los varios sistemas que existen es el que tiene un tipo de operación mínimo, es el más fácil de aplicar, instalar y mantener, y es muy flexible para conmutación o cambios en el diseño del bus.

Puesto que se elimina el hierro, se requiere de un transformador con núcleo de aire conocido como conector lineal.

Los conectores lineales son reactores mutuos con núcleo de aire devanados en núcleos territoriales no magnéticos, de tal suerte que los circuitos adyacentes no inducirán voltajes indeseables.

Para el conductor dentro del toroide, se inducen 5 volts por 1000 ampers de corriente en el primario, por lo tanto, por diseño, la impedancia mutua M es de 0.005 ohms 60 ciclos.

$$\text{En otras palabras: } E_{\text{sec.}} = I_{\text{prim.}} \cdot M$$

La respuesta transitoria de los conectores es despreciable, de manera que solamente necesitan considerarse las condicio-

nes del estado estable. El método de protección diferencial del conector lineal es un sistema de voltaje diferencial y se emplea un circuito en serie.

Esto se ilustra en la Fig.7.1, para un conector típico de cuatro circuitos.

VII.3.- SISTEMA DIFERENCIAL MULTILIMITANTE.

Estos diseños utilizan transformadores de corriente convencionales que contienen hierro el cual puede saturarse bajo fallas externas severas. Por lo tanto, la salida de corriente en el secundario puede no representar al primario.

Los transformadores y relevadores de corriente en un sistema diferencial forman un equipo. Cuando el desempeño de un miembro del equipo no es adecuado (el transformador de corriente) el otro miembro (el relevador) puede compensar la diferencia entre los límites. Con el fin de lograr esto, se requiere un relevador más complejo que en el sistema anterior en donde el conector lineal siempre tiene un buen desempeño.

También son necesarias reglas de aplicación más elaboradas porque existe un límite de rendimiento en el transformador de corriente, más allá del cual el relevador no puede compensar a los transformadores de corriente.

Un diseño de este tipo utiliza el relevador diferencial de porcentaje variable consistente en tres unidades limitantes o restrictivas del tipo de inducción y una unidad operadora del mismo tipo. Dos de las unidades están

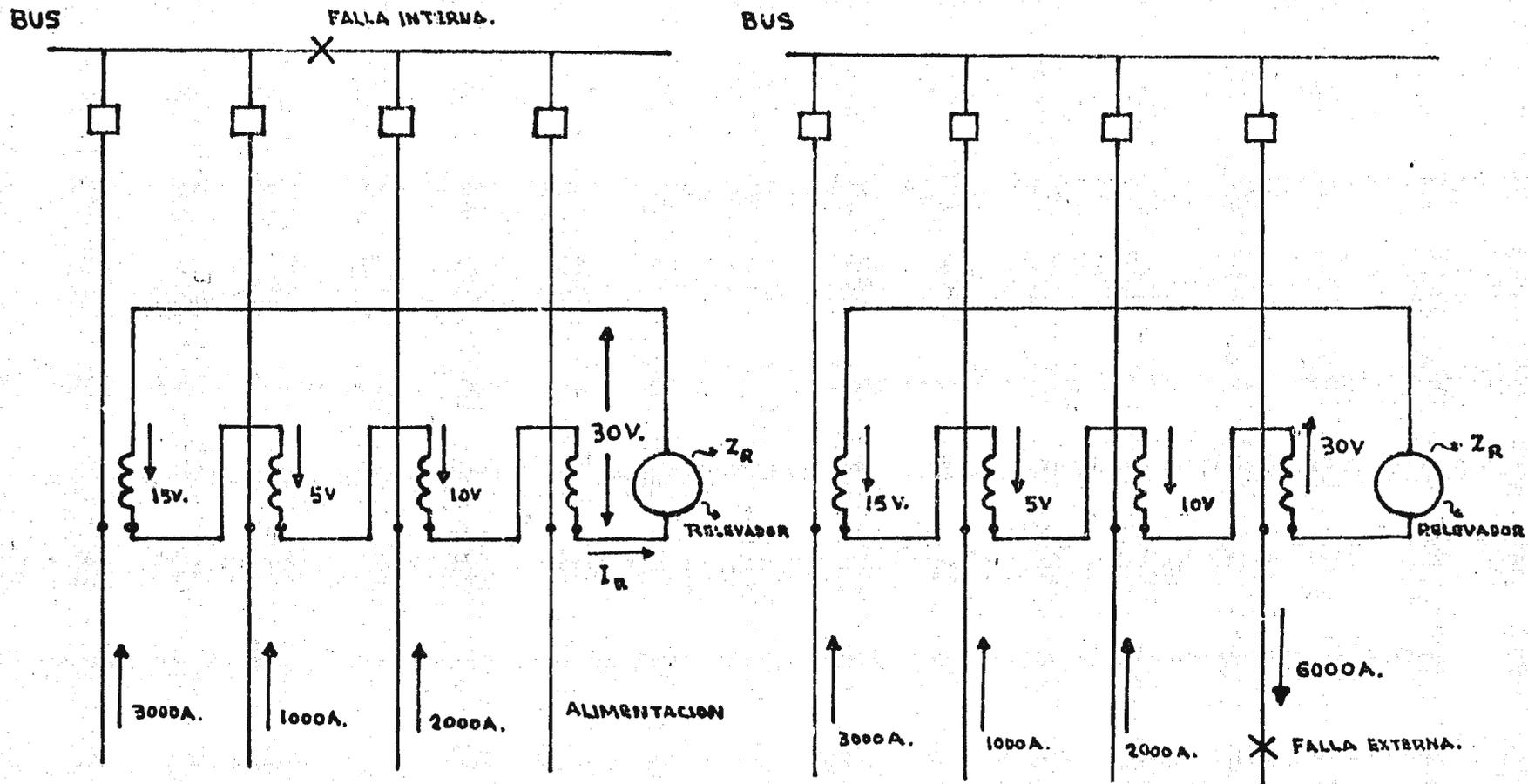


Fig. 7.1.- Sistema conector lineal protector del bus con valores típicos que ilustran su operación bajo fallas externas e internas.

colocadas una opuesta a la otra, operando sobre un disco común. Los dos discos están conectados a un eje común con los contactos móviles.

Todas las cuatro unidades son unidireccionales, esto es, la corriente fluye en una dirección por los devanados cuando el torque de apertura de contacto para la unidad restrictiva o el torque de cierre de contacto para la unidad operadora. Sin embargo, cada unidad limitante tiene -- dos devanados y la dirección relativa de la corriente en los dos es importante. Las corrientes en la misma dirección proporcionan una restricción proporcional a la suma mientras -- que la corriente en dirección opuesta da una restricción proporcional a la diferencia.

Si son iguales y opuestas no hay restricción. Así pues los pares de devanados limitantes tienen una polaridad uno respecto al otro en cada unidad.

Además de la restricción múltiple, la característica de porcentaje variable ayuda a conocer los errores - del TC para corriente de falla ligera, el rendimiento del TC es bueno y el porcentaje es pequeño para máxima sensibilidad.

VII.4.- SISTEMA DIFERENCIAL DE IMPEDANCIA Y VOLTAJE ELEVADOS.

Este diseño también utiliza transformadores - de corriente convencionales, pero nulifica los problemas de rendimiento desigual de los TC cargandolos con una unidad relevadora de alta impedancia.

Esto tiende a forzar las corrientes diferen-- ciales falsas por el TC en lugar de hacerlo por la bobina -

operadora del relevador. Para que esto sea efectivo, la resistencia secundaria de los circuitos secundarios del TC debe mantenerse baja. Es importante mantener a todos los transformadores de corriente con la misma razón, operar los buses a toda su capacidad y tener los diversos transformadores en el patio de interruptores cerca de los TC.

La discriminación entre fallas externas e internas se hace por medio de la magnitud del voltaje del relevador. En fallas internas el voltaje es alto y se aproxima al voltaje de circuito abierto del TC en el devanado secundario. De tal suerte, el TC, y el relevador están sujetos a voltajes del orden de 1000 volts. En fallas externas, el voltaje debe ser bajo y esencialmente será cero a menos que exista una saturación desigual de los TC.

El voltaje máximo ocurre cuando un TC está completamente saturado, sin saturación en los otros y será la caída de resistencia de la corriente teórica a través de las cargas y el devanado secundario del transformador de corriente saturado. El relevador se ajusta calculando el máximo posible de este voltaje y aplicando un factor de seguridad 2/1.

Existen otros sistemas protectores de buses pero su uso es limitado por lo cual no se hace referencia.

VII.5.- PROTECCION DIFERENCIAL DE SOBRECORRIENTE.

El circuito diferencial se obtiene poniendo en paralelo todos los transformadores de corriente con un relevador de sobrecorriente de discos de inducción en sus salidas.

das. Los relevadores deben ajustarse por encima de la corriente diferencial falsa máxima para una falla externa, lo que significa que puede haber una saturación permisible si se va a obtener algún grado de sensibilidad a la falla interna.

Puede tolerarse una cierta cantidad de saturación de c.d. o c.a. porque:

1.- La operación de los relevadores de disco de inducción en la componente de c.d. es menos eficiente.

2.- El tiempo de operación del relevador no es instantáneo con el fin de obtener un cierto grado de velocidad con estos sistemas, la disminución en el tiempo de c.d. debe ser corto, lo que limita grandemente la aplicación a buses de subestaciones lejos de las grandes estaciones generadoras.

El diseño se usa frecuentemente en un sistema diferencial de tierra donde la falla externa crítica es una falla de dos líneas a tierra.

Los componentes de falla de fase pueden causar una saturación desigual de los transformadores de corriente.

En tanto que el costo de los relevadores es bajo, el costo de ingeniería de la aplicación generalmente es alto, ya que puede requerir un estudio considerable para asegurar la operación correcta.

VII.6.- PROTECCION DIFERENCIAL PARCIAL.

Este diseño conecta solamente a los circuitos de suministro en el diferencial, utilizando un relevador de-

sobrecorriente con retraso de tiempo para seleccionar con -- los relevadores que protegen a los alimentadores o circuitos que no están en el diferencial. en consecuencia, este dispositivo da protección al colector y al alimentador.

Cuando algunos o todos los circuitos alimentadores tienen reactores de corriente, se emplea un circuito diferencial parcial con relevadores del tipo distancia (impedancia o reactancia) estos relevadores se instalan dentro, - pero no a traves, de la impedancia del reactor.

Este diseño es rápido y sensible y hace uso - de la impedancia del reactor para seleccionar entre fallas - del colector y fallas externas en los alimentadores.

VII.7.- PROTECCION POR COMPARACION DIRECCIONAL.

Este diseño utiliza relevadores direccionales individuales en todos los relevadores de sobrecorriente y de suministro para todos los alimentadores.

Los relevadores direccionales cierran contactos cuando fluye una potencia de falla en la protección del-bus o colector.

Utilizan contactos inversos en los relevado--res de sobrecorriente de manera que los contactos se abran - cuando la falla sea externa en el alimentador. Todos los -- contactos están conectados en serie, y cuando la falla es - en el bus, el circuito de operación se energiza a traves de-un cronometro.

Un corto retardo de varios ciclos debe usarse para permitir a todos los relevadores decidir correctamente-

la dirección de la falla. El sistema tiene la desventaja de un gran número de contactos y conexiones complejas. Siempre hay la posibilidad de que los elementos no direccionales no operen en una falla trifásica sólida del colector a causa de un voltaje de cero; no obstante, esta falla es muy rara.

VII.8.- METODO DEL BUS DE FALLA.

Este método requiere el aislamiento de tierra de todas las estructuras de soporte del bus y equipo asociado y su interconexión de tal modo que sólo halla una conexión a tierra.

En esta vía a tierra se conecta un relevador de sobrecorriente. Cuando ocurra una falla de tierra a través de las estructuras, la corriente de falla fluye a través del circuito relevador para operar al colector mediante el relevador de operación auxiliar de contacto múltiple.

Un detector de falla energizado por el neutro del transformador o generador conectado a tierra sirve para supervisar la operación y evitar una operación accidental.

Este sistema es caro, pues requiere de medidas de construcción especiales.

VII.9.- PROTECCION DIFERENCIAL DE CORRIENTE CON RELEVADORES DE PORCENTAJE.

Como en la protección diferencial de generadores y transformadores, el principio de la operación diferencial de porcentaje es una gran mejora sobre los relevadores de sobrecorriente en un circuito diferencial de TC.

El problema de proporcionar suficientes circuitos de retención ha sido ampliamente resuelto por los relevadores llamados de retención múltiple. Mediante un agrupamiento adecuado de los circuitos y por la utilización de dos relevadores por fase en donde son necesarios, pueden proporcionarse por lo general, suficientes circuitos de retención.

Una mejora más amplia en selectividad es proporcionada por la característica de porcentaje variable como la descrita en relación con la protección de generadores; -- con esta característica deberá asegurarse que las corrientes de falla interna muy elevadas no originen retención suficiente para impedir el disparo.

Se dispone de este equipo de protección con tiempos de funcionamiento del orden de 3 a 6 ciclos (con base de 60 Hz). No es adecuado en donde se precisa un funcionamiento de alta velocidad.

Como la protección diferencial de corriente con relevadores de sobrecorriente, el problema de calcular los errores del TC es muy difícil. La utilización de las características de porcentaje y de porcentaje variable hacen insensible al relevador a los efectos del error del TC. Sin embargo, se recomienda que cada aplicación se remita al fabricante junto con todos los datos necesarios. La desventaja de este tipo de equipo es que todas las puntas secundarias del TC deben ir al tablero de relevadores.

VII.10.- PROTECCION DIFERENCIAL DE CORRIENTE CON RELEVADORES DE SOBRETENSION.

Un tipo de equipo de protección de alta velocidad que emplea protección diferencial de corriente con relevadores de sobretensión elimina el problema de la saturación del transformador de corriente, pero en una forma diferente a la descrita con el empleo de acopladores lineales.

Con este equipo, se utilizan TC de boquilla convencionales (u otros TC con baja impedancia secundaria), y están conectados en forma diferencial al igual que para la protección diferencial de corriente ya descrita. La única diferencia es que se utiliza la sobretensión en lugar de la sobrecorriente.

En efecto, este equipo aprovecha hasta el máximo el principio ya descrito de adicionar resistencia a la rama diferencial del circuito.

Sin embargo, la impedancia de la bobina de los relevadores de sobretensión está calculada para aparecer como resistencia al circuito en virtud de un rectificador de onda completa, tal como se muestra en la Fig.7.2. Es por esto, que el rendimiento del equipo no disminuye como sería si se utilizase una resistencia en serie.

La capacidad electrostática y la inductancia mostradas en serie con el circuito del rectificador, están en resonancia en serie con la frecuencia fundamental del sistema; el propósito es que el relevador sólo responda a la componente fundamental de la corriente secundaria del TC a fin de mejorar la selectividad del relevador.

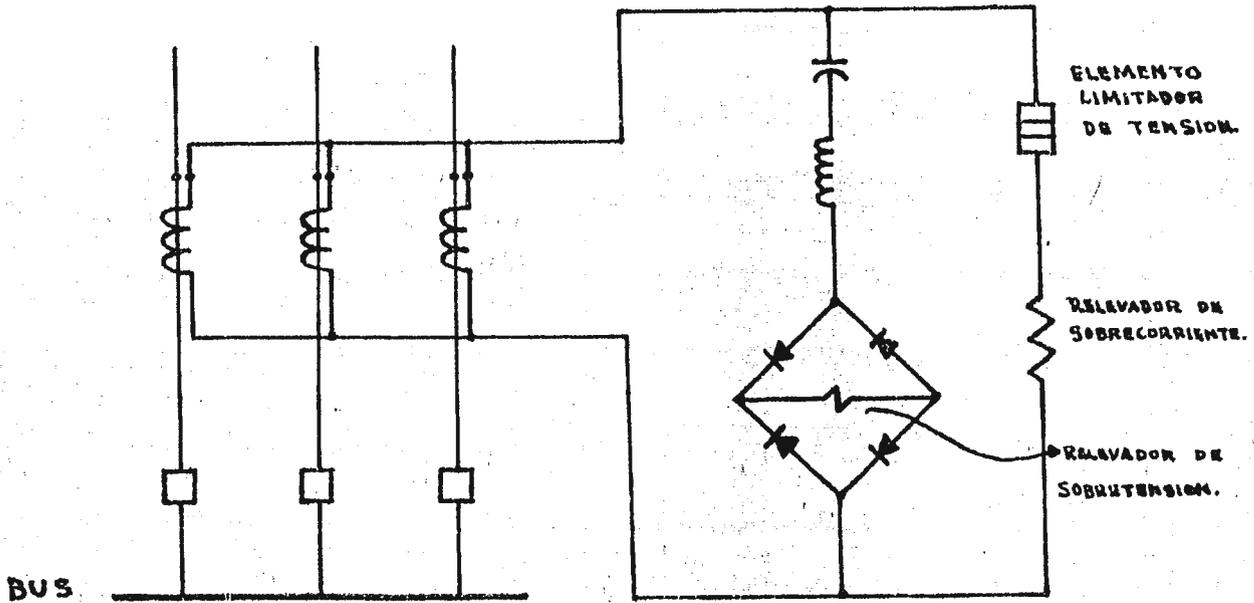


Fig.7.2.- Protección de barra colectora utilizando protección diferencial de corriente con relevadores de sobretensión.

La capacidad electrostática y la inductancia mostradas en serie con el circuito del rectificador, están en resonancia en serie con la frecuencia fundamental del sistema; el propósito es que el relevador sólo responda a la componente fundamental de la corriente secundaria del TC a fin de mejorar la selectividad del relevador.

Tiene la desventaja, sin embargo, de hacer un poco lenta la respuesta del relevador de tensión pero esto no es importante en vista del funcionamiento de alta velocidad de un elemento del relevador de sobrecorriente que ahora va a describirse.

Debido a que la resistencia efectiva del circuito de la bobina del relevador de tensión es tan elevada, - que es de casi 3000 ohms, debe conectarse un elemento limitador de tensión en paralelo con la rama del rectificador, pues de otro modo se producirían otras tensiones secundarias - del TC bastante elevadas cuando ocurrieran fallas en la barra colectora.

Como se muestra en la Fig.7.2, una unidad del relevador de sobrecorriente en serie con limitador de tensión proporciona el funcionamiento de alta velocidad para fallas en la barra colectora que incluyen corrientes de magnitud elevada.

Ya que sólo se confía en la unidad de sobrecorriente para corrientes de magnitud elevada, su puesta en -- trabajo puede hacerse con facilidad suficientemente elevada -- para evitar el funcionamiento en las fallas externas.

El procedimiento para determinar los ajustes -- necesarios y la sensibilidad resultante de las bajas corrientes de falla de barra colectora es sencillo y directo, sólo -- requiere conocimientos de las características de la excitación secundaria y del TC y su impedancia secundaria.

Para obtener los mejores resultados posibles, todos los TC deberán tener el mismo valor nominal y deberán -- de ser de un tipo parecido al de boquilla con un arrollamiento secundario distribuido, que tiene poca o ninguna reactancia secundaria de dispersión.

VII.11.- PROTECCION COMBINADA DE TRANSFORMADORES DE POTENCIA Y BARRA COLECTORA.

La Fig.7.3 muestra una situación que se encuentra con frecuencia, en la que es omitido un interruptor entre el banco de transformadores y una barra colectora de baja tensión.

Si la barra o bus alimenta sólo circuitos de carga sin ninguna realimentación posible de fuente de generación, los TC en todos los circuitos de carga pueden ponerse en paralelo y puede extenderse la zona de protección del relevador diferencial del transformador, para incluir la barra colectora.

En la Fig.7.5, las dos líneas de alta tensión son de estaciones diferentes y pueden constituir una interconexión entre partes de un sistema.

En consecuencia, pueden fluir corrientes de carga mucho más elevadas a través de estos circuitos, que la corriente nominal de carga del transformador de potencia.

La Fig.7.4 muestra dos líneas de alta tensión paralelas que alimentan una barra colectora de un transformador de potencia, sin interruptor entre ésta y aquella.

Como se muestra en la figura, un relevador diferencial de porcentaje del tipo de tres arrollamientos proporcionará buena protección para la barra y el transformador.

Por lo tanto, las relaciones de los TC en los circuitos de alta tensión pueden ser mucho más elevadas de lo conveniente para la protección más sensible del transfor-

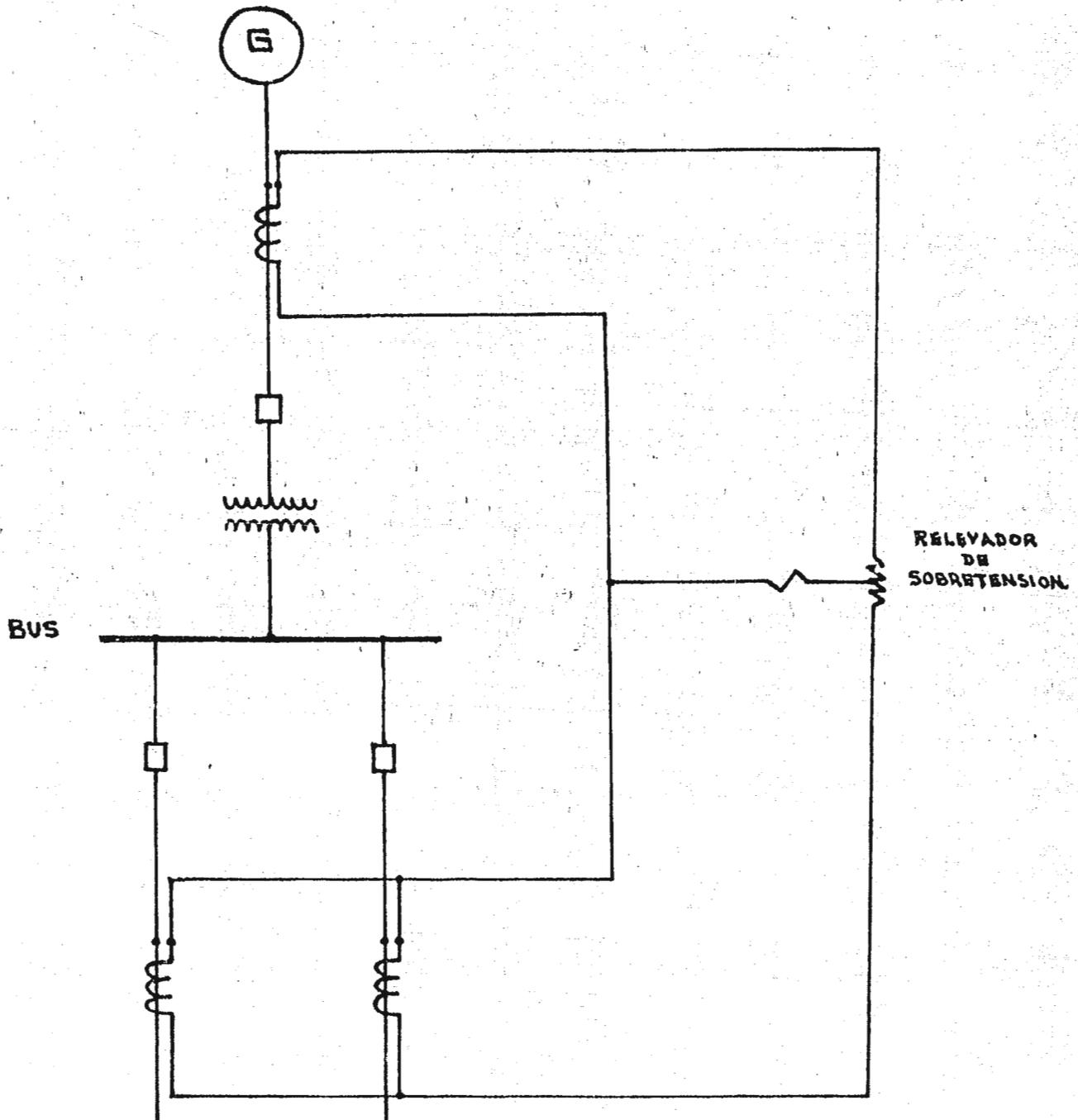


Fig.7.3.- Protección combinada de transformador y barra colectora con un relevador diferencial de porcentaje de dos arrollamientos.

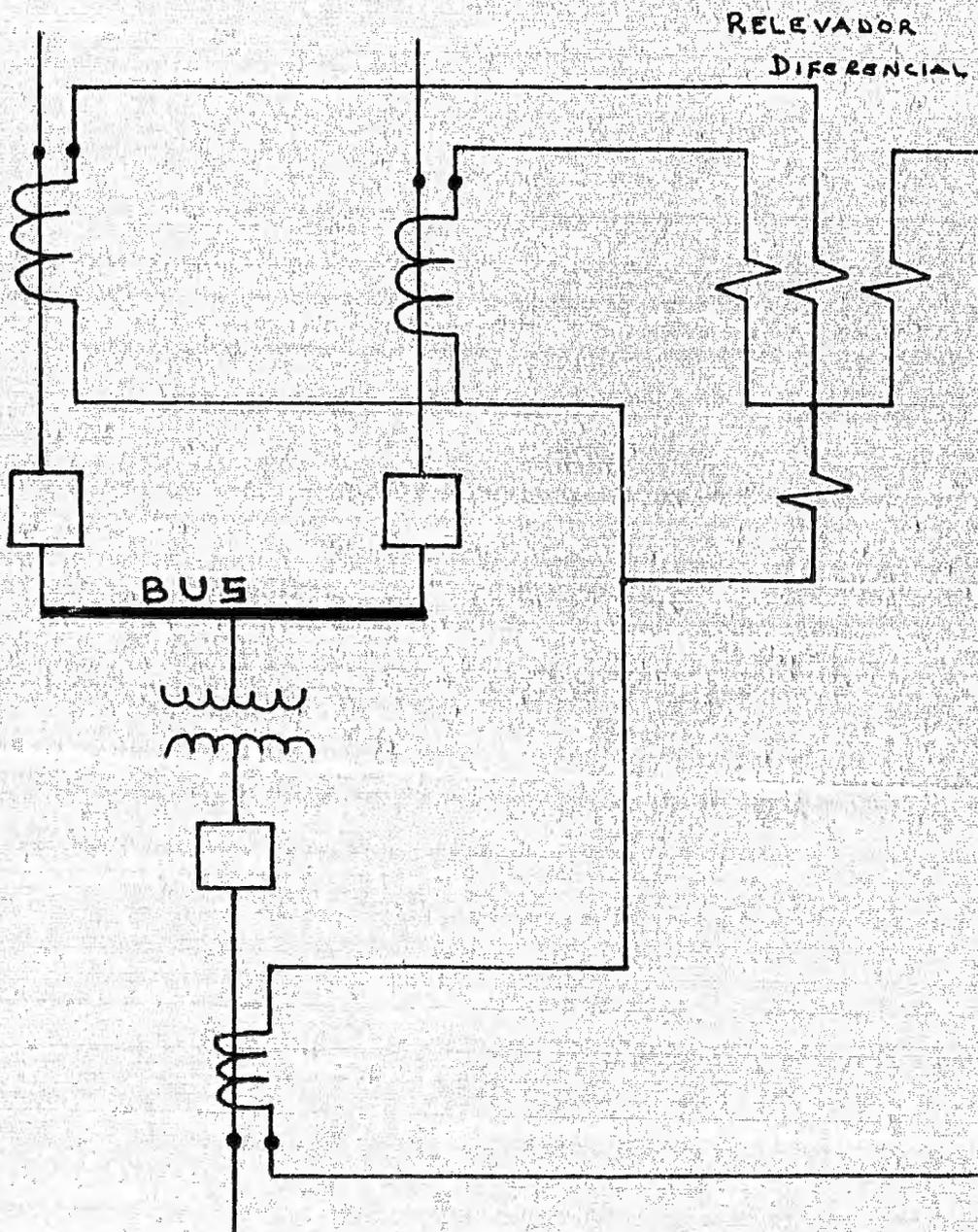


Fig.7.4.- Protección combinada de transformadores y barra colectora con un relevador diferencial de porcentaje de tres arrollamientos.

mador de potencia.

Y por lo tanto, el esquema de protección de la Fig.7.4, aunque es práctico por lo general, no es tan sensible para las fallas del transformador como el siguiente, - esquema de la Fig.7.5.

Los TC de boquilla se adicionan por lo general a la mayoría de los transformadores de potencia pero resulta menos costoso y menos problemático que los transformadores de potencia se compren con dos conjuntos de TC ya instalados.

Es casi axiomático, que siempre que se omitan los interruptores en el lado de alta tensión de los transformadores de potencia, deberán proporcionarse dos conjuntos de TC de boquilla en las boquillas de alta tensión del transformador.

El esquema de la Fig.7.5, puede extenderse para acomodar más transformadores de potencia o más líneas de alta tensión, aunque, no se considera bueno prácticamente omitir interruptores de alta tensión cuando dos o más bancos de transformadores de potencia de 5000 KVA, nominales o mayores se ponen en paralelo.

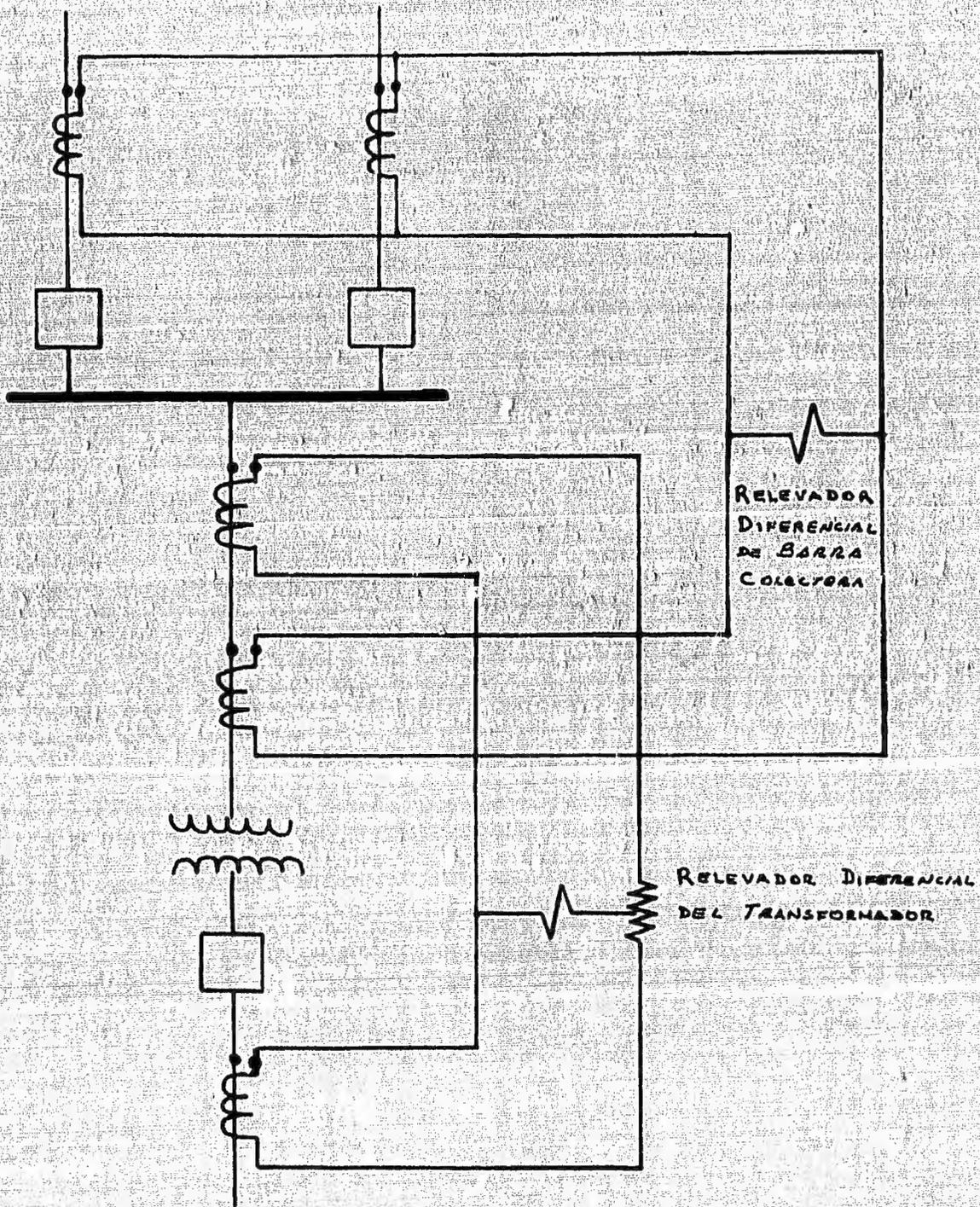


Fig.7.5.- Alternativa de la Fig.7.3 preferida cuando las líneas de alta tensión son de estaciones diferentes.

VIII.- PROTECCION DE LINEAS.

VIII.1.- CLASIFICACION DE LINEAS.

Las líneas de transmisión, son eslabones que conectan a todas las plantas generadoras con los sistemas de distribución, o sea que su función constituye la de llevar corriente eléctrica del generador al lugar de consumo, como se observara, resalta de inmediato la condición de la continuidad de servicio, factor que se logra dando protección a las líneas de transmisión del sistema interconectado.

Las líneas de transmisión se pueden clasificar por los siguientes aspectos:

- 1.- Por su longitud.
- 2.- Por su tensión de transmisión.
- 3.- Por el tipo de corriente.
- 4.- Por el número de fases.
- 5.- Por la frecuencia de trabajo.

1.- Por su longitud pueden ser:

- a.- LINEAS CORTAS. Aquellas en que el efecto de capacitancia es despreciable comparado al efecto inductivo y la resistencia de los conductores, entre estas se encuentran generalmente la mayoría de las líneas de distribución cuya longitud comprende de 20 a 40 Km.
- b.- LINEA MEDIANA. Es aquella en que no puede despreciarse el efecto de capacitancia, pero que permite que -

se desprecie el efecto corona sin tener errores, comprenden entre 40 y 60 Km.

c.- LINEA LARGA. Es aquella en que se considera tanto el efecto de capacitancia como el de inductancia desde el punto de vista riguroso, puesto que el efecto corona es determinante, se consideran arriba de 160 Km.

2.- Por su tensión de transmisión, pueden clasificarse de la manera siguiente:

a.- LINEAS DE DISTRIBUCION. Su voltaje entre fases debe ser 6 y 23 Kv.

b.- LINEAS DE SUBTRANSMISION. Su voltaje entre fases debe ser 23 y 85 Kv.

c.- LINEAS DE TRANSMISION. Su voltaje entre fases debe ser 85 Kv. y mayor.

VIII.2.- FORMAS DE PROTECCION.

Considerando lo anterior, el diseño de la protección de una línea tomará en cuenta los aspectos anteriores, dependiendo de la clasificación e importancia de la línea se podrán usar los siguientes relevadores de protección:

- 1.- Relevadores de sobrecorriente.
- 2.- Relevadores de sobrecorriente direccionales de fase.
- 3.- Relevadores de sobrecorriente direccionales de tierra.
- 4.- Relevadores para protección diferencial de hilo --

piloto.

- 5.- Relevadores de comparación de fases con canal de corriente portadora (CARRIER).
- 6.- Relevadores de distancia.

Las líneas de transmisión forman una parte -- muy importante en el sistema de potencia y utilizan los voltajes más altos posibles en el sistema para obtener la mayor eficiencia en la transmisión de la energía.

Puesto que estas líneas fallan frecuentemente requieren de una protección confiable y adecuada para asegurar un rápido libramiento de la falla, protegiendo de esta manera el sistema y minimizando los daños físicos del circuito fallado.

VIII.3.- TIPOS DE FALLAS.

Para propósito de protección, las fallas en las líneas en sistemas conectados a tierra pueden ser clasificadas de la siguiente manera:

- a).- Fallas trifásicas con y sin conexión a tierra.
- b).- Fallas de fase a fase.
- c).- Fallas de fase a tierra.
- d).- Fallas de doble fase a tierra.

La naturaleza de una falla es simplemente definida como una condición anormal, la cual causa una reducción de la resistencia básica de aislamiento entre conductores de fase, entre conductores de fase y tierra o entre cualquier pantalla aterrizada que rodea los conductores y que re

quiere la operación automática de un interruptor.

VIII.4.- PROTECCION DE LINEAS CON RELEVADORES DE SOBRECORRIENTE.

La protección de sobrecorriente es la más sencilla y la más barata, la más difícil de aplicar y la que más rápido necesita reajuste o reemplazo a medida que cambia el sistema. Se le utiliza por lo general para protección contra la falla de fase o a tierra, en los circuitos de servicio propio de la estación y en los circuitos de distribución de servicio eléctrico y en sistemas industriales, y en algunas líneas de transmisión donde no puede justificarse el costo de la protección de distancia.

Se le utiliza para la protección primaria de falla a tierra en la mayoría de las líneas de transmisión donde se emplean relevadores de distancia para fallas de fase y para la de respaldo de tierra en la mayoría de las líneas que tienen protección por hilo piloto para la protección primaria.

Sin embargo, la protección de distancia primaria y de respaldo contra fallas a tierra en líneas de transmisión está reemplazando lentamente a la de sobrecorriente. Esta última se utiliza también extensamente en localidades de transformadores de potencia para la protección de respaldo contra falla externa.

La práctica es utilizar generalmente un conjunto de dos o tres relevadores de sobrecorriente para la protección contra fallas entre fases y un relevador de sobre

corriente separado para las fallas monofásicas a tierra.

VIII.5.- COMO AJUSTAR LOS RELEVADORES DE SOBRECORRIENTE DE TIEMPO INVERSO PARA LA COORDINACION.

El primer paso es seleccionar la puesta en -- trabajo del relevador de tal manera que éste (1) funcione -- con todos los cortos circuitos en su propia línea, y (2) proporcione protección de respaldo para los cortos circuitos en los elementos del sistema inmediatamente adyacentes, bajo -- ciertas circunstancias.

El segundo paso en el ajuste de los relevadores de sobrecorriente de tiempo inverso es ajustar la acción retardada para obtener selectividad con los relevadores de -- los elementos inmediatamente adyacentes del sistema. Este ajuste deberá hacerse para las condiciones de flujo de máxima corriente en la localidad del relevador; estas condiciones -- existen cuando ocurre un corto circuito más allá del inte--- rruptor en un elemento adyacente del sistema.

Para asegurar la selectividad bajo todas las circunstancias, la puesta en trabajo de un relevador dado deberá ser algo más elevada que la de otros relevadores más -- cercanos a la falla y con los que debe ser selectivo el relevador dado.

El " sobrealcance " de los relevadores de sobrecorriente instantáneos es la tendencia de un relevador a -- ponerse en trabajo en las fallas a mayor distancia de la que se esperaría si desprecia el efecto del descentrado en la onda de corriente de falla.

La protección de sobrecorriente se hace direccional para simplificar el problema de obtener la selectividad cuando puede fluir casi la misma magnitud de la corriente de falla en cualquier dirección en la localidad del relevador. Sería imposible obtener la selectividad en tales circunstancias si los relevadores de sobrecorriente disparásen sus interruptores en cualquier dirección del flujo de la corriente.

Los relevadores de sobrecorriente instantáneos y de tiempo inverso están arreglados de tal manera que, cuando ocurre una falla, el relevador instantáneo funciona para disparar el interruptor antes de que pueda quemarse un fusible de un circuito derivado y se recierra entonces en forma inmediata el interruptor. Sin embargo, después de la primera salida, los relevadores instantáneos salen de servicio en forma automática, de tal manera que si la falla persiste, los relevadores de tiempo inverso tendrían que funcionar para disparar el interruptor.

VIII.6.- PROTECCION DE LINEAS CON RELEVADORES DE DISTANCIA.

La protección de distancia debe considerarse cuando la de sobrecorriente es muy lenta o no selectiva. Los relevadores de distancia se utilizan por lo general para la protección primaria y de respaldo en las fallas de fase en líneas de subtransmisión, y en líneas de transmisión donde no es necesario el recierre automático de alta velocidad, para mantener la estabilidad y donde puede tolerarse la cortaccción retardada para las fallas en el extremo de la zona.

Los relevadores de distancia se prefieren a los de sobrecorriente porque no se ven tan afectados por los cambios en la magnitud de la corriente de corto circuito, como los de sobrecorriente, y de aquí, que se vean mucho menos afectados por los cambios en la capacidad de generación y en la configuración del sistema. Esto se debe a que los relevadores de distancia logran la selectividad con base en la impedancia en lugar de basarse en la corriente.

En la protección de falla de fase, cada uno de los tipos de relevadores de distancia ofrece ciertas ventajas y desventajas. Para secciones de líneas muy cortas se prefiere el tipo de reactancia por la razón de que la mayor parte de la línea puede protegerse a gran velocidad. Por otra parte, en ciertas localidades de un sistema los relevadores de distancia del tipo de reactancia son los más inclinados a funcionar erróneamente en ondas severas de potencia de sincronización a menos que se cuente con el equipo adicional de relevadores para impedir dicho funcionamiento.

El tipo mho es el más adecuado para la protección de falla de fase para líneas largas, y en particular -- allí donde pueden presentarse ondas severas de potencia de sincronización.

El relevador de impedancia es el más adecuado para la protección de falla de fase en las líneas de moderada longitud que en las líneas muy cortas o muy largas.

No hay una línea divisoria definida entre las áreas de aplicación donde uno u otro tipo de relevador de distancia sea el más adecuado.

VIII.7.- AJUSTE DE UN RELEVADOR DE DISTANCIA.

La práctica es ajustar la primera zona de alta velocidad de los relevadores de distancia, para alcanzar el 80% a 90% de la longitud de la línea de dos extremos o bien de 80% a 90% de la distancia a la terminal más cercana de una línea de terminales múltiples.

El propósito principal de la unidad de segunda zona de un relevador de distancia es proporcionar protección para el resto de la línea más allá del alcance de la unidad de primera zona. Esta deberá ajustarse de tal manera que sea capaz de funcionar aún en las fallas de arco en el extremo de la línea. Para hacer esto, la unidad deberá alcanzar hasta más allá del extremo de la línea. Se acostumbra -- conservar el alcance de la unidad de segunda zona a un mínimo de 20% de la sección de línea adyacente, mayor será la desviación permitida en el alcance de la unidad de tercera zona, de la siguiente sección de línea posterior que debe ser selectivo con ésta unidad de segunda zona.

La unidad de tercera zona proporciona protección de respaldo en las fallas en las secciones de líneas adyacentes, su alcance deberá extenderse tan lejos como sea posible, más allá del extremo de la sección de línea adyacente más larga, en las condiciones que originan la cantidad máxima de sobrealcance, es decir, arcos y fuentes de corrientes intermedias. Para alcanzar más allá del extremo de una línea larga adyacente y ser selectiva aún con los relevadores de una línea corta, puede ser necesario obtener ésta selectividad mediante acción retardada adicional.

VIII.8.- PROTECCION DE LINEAS CON RELEVADORES PILOTO.

La protección piloto es la más adecuada en -- protección de líneas. Se le utiliza siempre que se requiere la protección de alta velocidad para todo tipo de corto circuitos y para la localización de cualquier falla. Para las líneas de dos terminales y para las líneas de terminales múltiples, todos los interruptores de éstas se dispararán prácticamente en forma simultánea, permitiendo de este modo el recierre automático de alta velocidad.

La protección piloto se utiliza en algunas líneas terminales múltiples en donde no son esenciales el recierre y el disparo de alta velocidad, pero en las cuales la configuración del circuito hacen posible aún para la protección de distancia, proporcionar la velocidad moderada que puede requerirse.

Las cargas críticas pueden requerir un disparo de alta velocidad más allá de la capacidad de los relevadores de distancia. Por estas razones en la práctica se utiliza la protección piloto para la mayoría de las líneas de transmisión y distribución. Por lo tanto, es necesario seleccionar entre: a) hilo piloto, b) piloto por corriente portadora y c) piloto por onda centimétrica.

VIII.8.1.- La protección por hilo piloto se utiliza en circuitos de baja tensión y en líneas de transmisión de alta tensión, cuando económicamente no se justifica un piloto por corriente portadora. Para la protección de -- ciertos circuitos de cable de potencia puede utilizarse el --

hilo piloto debido a que la atenuación del circuito del cable es muy elevada para la corriente portadora. Para líneas cortas, la protección por hilo piloto de c.a. es la forma más económica de la protección de alta velocidad. Por lo general, se utilizan hilos piloto de 5 a 10 millas, pero hay algunas en servicio cuya longitud es de 27 millas.

En general la protección por hilo piloto no se considera tan segura como la protección por corriente portadora, en gran parte debido a que muchos de los circuitos por hilo piloto que se utilizan no son muy seguros; el circuito piloto ofrece demasiada exposición a la posibilidad de disturbio, por lo que deberá tenerse gran cuidado al optar por él y seleccionar la protección.

La protección por hilo-piloto no proporciona protección de respaldo, para este objeto se utilizan relevadores de sobrecorriente y de distancia separados.

VIII.8.2.- La protección piloto por corriente portadora es la mejor clase de protección y la más comúnmente utilizada en las líneas de alta tensión. Se puede aplicar de algún modo a cualquier línea aérea. Se prefiere la protección piloto por corriente portadora a la de hilo piloto, debido a que es más segura y tiene un campo más amplio de aplicación. Consiste enteramente en un equipo terminal (se encuentra en su totalidad bajo control del usuario, en contraste con el hilo piloto arrendado). Además el piloto por corriente portadora se presta más convenientemente para asociar el uso de otros servicios tales como telefonía de emergencia y disparo remoto.

Los tres tipos de equipo de protección piloto por corriente portadora en uso regular son: de comparación de fase, de comparación direccional y de comparación de fase y direccional combinadas.

VIII.8.3.- Se utiliza un piloto por onda centimétrica sólo cuando el equipo de protección puede compartir el canal con otros servicios, no se justifica económicamente su sólo empleo para la protección pudiéndose emplear la corriente portadora o el hilo piloto.

La onda centimétrica es completamente adecuada aunque no tan segura como la corriente portadora para propósitos de protección por relevadores, esto se debe en parte a los complejos circuitos y al gran número de tubos incluidos y también al gran número de servicios en el mismo canal de onda centimétrica.

La ventaja principal de la onda centimétrica para la protección por relevadores, es que la presencia de una falla en la línea protegida no interfiere con la transmisión de una señal de disparo remoto.

La experiencia ha demostrado que del 70% al 95% de todas las fallas en líneas de transmisión, subtransmisión y distribución de alta tensión no son persistentes si se desconecta del sistema en forma rápida el circuito defectuoso. Esto se debe a que la mayor parte de las fallas de las líneas son originadas por descargas atmosféricas, y si se evita que el arco que sucede en la falla dure mucho tiempo como para dañar en forma perjudicial conductores y aisla-

dores, la línea puede regresar al servicio en forma inmediata. Ahí donde la falla persiste después del primer disparo y cierre, la experiencia ha demostrado que es preferible tratar dos o tres recierres más como máximo antes de sacar de servicio la línea hasta que pueda encontrarse y repararse el disturbio.

VIII.9.- DESCRIPCIÓN DE UN ESQUEMA DE PROTECCIÓN.

En la Fig.8.1 se muestra un esquema de protección de una línea de transmisión el cual consta del siguiente equipo para su funcionamiento:

- 87C- Relevador de comparación de fases con canal de corriente portadora (carrier), para dar protección primaria a la línea.

Esta protección dispara instantáneamente los interruptores de ambos extremos de la línea protegida en caso de una falla en su zona de protección, éste sistema requiere del siguiente equipo adicional:

- 1)- Equipo transmisor.
- 2)- Equipo receptor.
- 3)- Condensador de acoplamiento.
- 4)- Equipo de trampa de onda.

Su funcionamiento se basa en la aplicación de una tensión de polaridad positiva en el equipo transmisor -- que a su vez genera una tensión de salida de alta frecuencia, la cual se aplica entre un conductor de fase de la línea de transmisión y la tierra por medio de un condensador de acoplamiento.

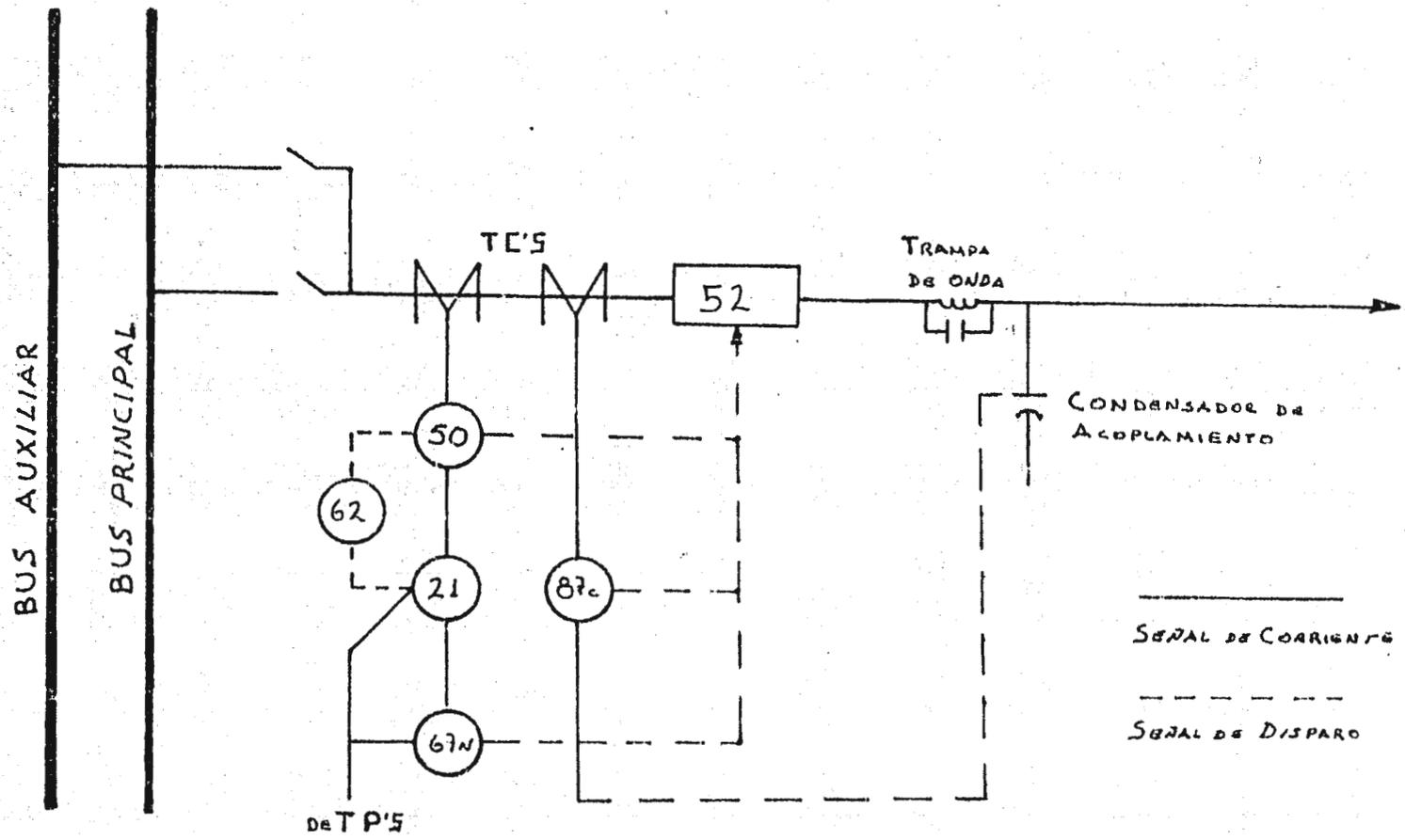


Fig.8.1.- Esquema de protección de una línea de transmisión.

plamiento. Cada receptor de corriente portadora recibe ésta - corriente de un transmisor local, lo mismo que el transmisor del otro extremo de la línea, el receptor convierte la co--- rriente portadora recibida en una señal de tensión de c.d.-- la cual puede utilizarse para un relevador. La tensión es nú la cuando no se recibe dicha corriente.

El equipo de trampa de onda son circuitos resonantes en paralelo que tienen una impedancia despreciable a la frecuencia de las corrientes de potencia, pero tienen - una elevada impedancia con referencia a las corrientes porta doras y su uso es mantener las corrientes portadoras en el - canal deseado, así como para evitar la interferencia de los - otros canales adyacentes de corriente portadora, otro de sus usos es para evitar pérdidas de corriente portadora en los - circuitos de potencia ocasionada por fallas extremas.

- 21- Relevador de distancia. Su función es detectar las fallas entre fases de las líneas en sus respectivas zonas y trabajan a gran velocidad.
- 62- Relevador de tiempo. Su función es dar un retardo - de disparo del relevador de distancia para suministrar la segunda zona de protección, o sea que este relevador es equipo auxiliar al relevador de distancia.
- 50- Relevador de sobrecorriente con unidad instantánea. Equipo auxiliar del relevador de distancia, su función es supervisar el disparo de éste relevador.
- 67N- Relevador de sobrecorriente direccional con unidad-

de tiempo inverso y unidad instantánea con polarización de corriente y potencial, usado para dar protección de respaldo a la línea para fallas a tierra.

VIII.10.- ESQUEMA DE PROTECCION DE HILO PILOTO DE C.A.

En la Fig.8.2 se muestra un esquema de protección de hilo piloto. Esta protección es la que se utiliza comúnmente como protección primaria en las líneas de 231 KV. Observese en la figura que muestra esquemáticamente un equipo del tipo de corriente circulante; hay un relevador trifásico direccional de imán permanente polarizado en c.d. en cada extremo de la línea, el cual consta de un filtro de secuencia de fases, un transformador saturable, una lámpara de neón, una bobina de operación (O) y otra de restricción (R), estas se encuentran alimentadas por rectificadores de onda completa para obtener una alta sensibilidad el relevador.

Las bobinas de operación y de restricción reciben la señal monofásica del filtro de secuencia de fases, esta señal monofásica pasa por los transformadores saturables los cuales limitan la magnitud de la tensión eficaz aplicada a las bobinas de operación y restricción. La lámpara de neón limita la tensión de cresta y los transformadores de aislamiento en los extremos del piloto, aíslan el equipo terminal del circuito piloto.

Al ocurrir una falla interna dentro de la línea protegida el flujo de corriente de un extremo se invertirá 180° por lo tanto contribuirá en una suma de corrientes que pasará por la bobina de operación de ambos extremos del-

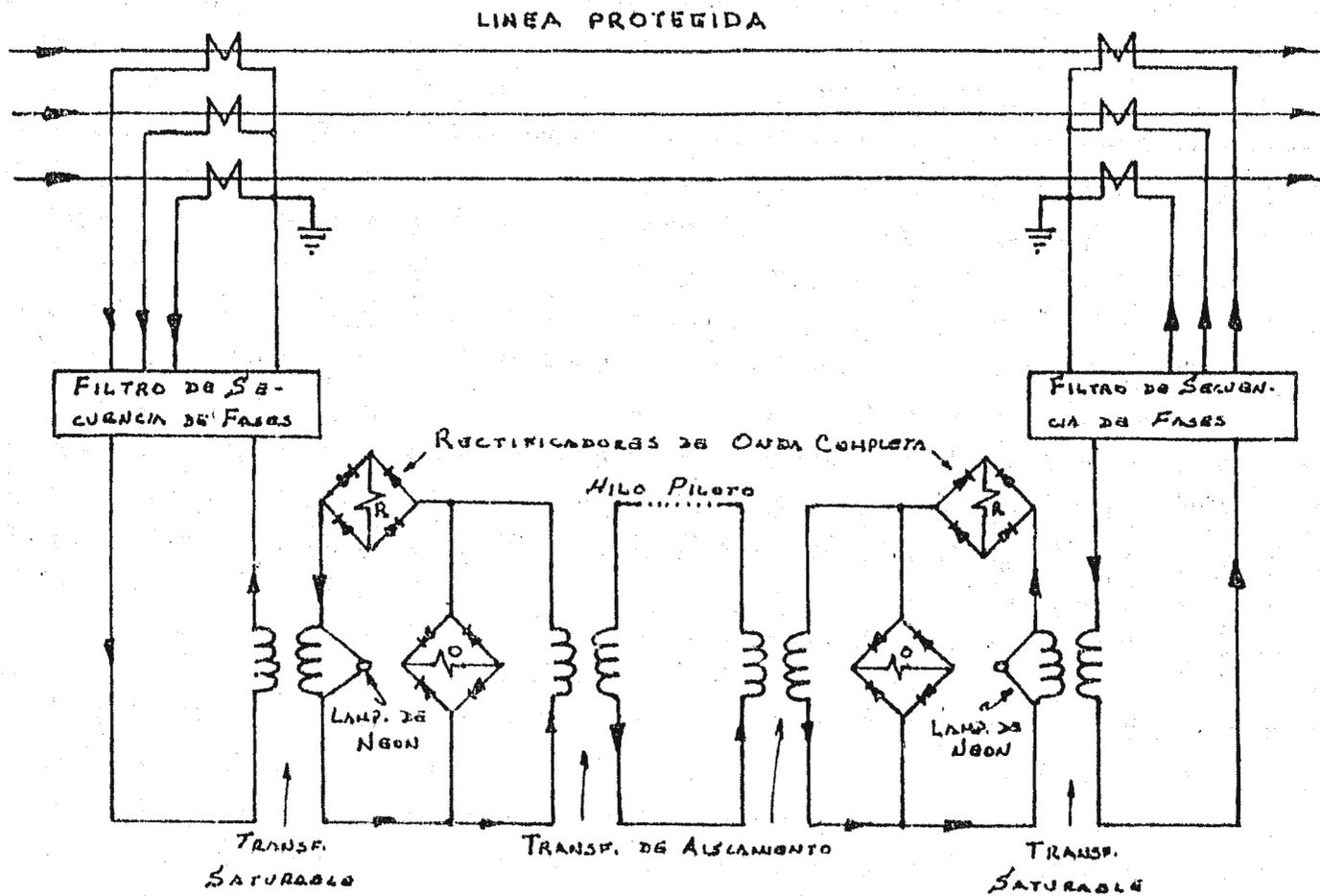


Fig.8.2.- Conexiones esquemáticas de un relevador de hilo piloto.

piloto la cual las hará operar, estas cerrarán sus contactos respectivos y mandarán abrir a los interruptores de ambos ex tremos de la línea.

IX.- ESTABLECIMIENTO DE UN PROGRAMA DE MANTENIMIENTO PREVENTIVO AL SISTEMA DE PROTECCION.

IX.1.- LA IMPORTANCIA DEL MANTENIMIENTO.

En general cualquier empresa (hotel, tienda, escuela, fabrica, o de servicio público) cuenta con un departamento de mantenimiento. El funcionamiento normal del departamento de producción depende esencialmente de los casi despercibidos trabajadores de mantenimiento. La descompostura de un elevador, del sistema de alumbrado o refrigeración, -- del servicio de agua, o de cualquier otra fuente de energía o sistema auxiliar, generalmente ocasiona un paro, o cuando menos graves inconvenientes. Siempre es más efectivo el mantenimiento preventivo que las reparaciones al momento, en otras palabras, la inspección para evitar descomposturas, permite al ingeniero encargado del mantenimiento planear las reparaciones y hacerlas en horas convenientes que no contraven gan al curso de las operaciones.

IX.2.- FILOSOFIA DEL MANTENIMIENTO.

Para una mejor comprensión y estudio de lo -- que implica el mantenimiento se ha hecho una clasificación -- de los diferentes tipos de mantenimiento.

IX.2.1.- Mantenimiento preventivo. Se define como una serie sistemática de operaciones preformadas periódicamente en los equipos e instalaciones con el objeto de -- prevenir la suspensión del servicio o la operación.

La actividad básica es la inspección periódica (diaria) de las máquinas y equipos de la planta o sistema para descubrir condiciones que puedan ocasionar paros imprevistos de producción. Incluye también el trabajo a intervalos definidos cuando el equipo no está funcionando por otras razones.

IX.2.2.- Mantenimiento predictivo. Se refiere a que basado en datos estadísticos y teniendo en cuenta las curvas de tendencia se puede extrapolar y predecir con cierta seguridad el tiempo en que ocurrirá la falla o en que se necesitará reparación o condicionamiento por estar en el límite de acuerdo a las normas preestablecidas.

IX.2.3.- Mantenimiento correctivo. Se refiere a corregir los desperfectos ocasionados por una falla cuyos resultados son graves ya que ocasionan paro total de la planta o suspensión general del servicio.

IX.3.- FUNCIONES DE LA INGENIERIA DEL MANTENIMIENTO.

Durante las operaciones el ingeniero de la planta y el departamento de mantenimiento dirigen las siguientes actividades:

- 1.) Conservar los edificios y pisos en buen estado de limpieza e higiene.
- 2.) Efectuar las reparaciones de emergencia.
- 3.) Efectuar las reparaciones de rutina.
- 4.) Inspeccionar los edificios, instalaciones y máquinas para descubrir instancias de mal uso y localí-

zar las reparaciones que deban hacerse.

- 5.) Planear las reparaciones y renovaciones de manera de aprovechar al máximo la mano de obra disponible y reducir al mínimo las interrupciones del trabajo normal.
- 6.) Llevar historiales de las distintas máquinas e instalaciones, como guía para su uso apropiado, y para la selección del nuevo equipo con miras a algún fin especial.
- 7.) Supervisar el trabajo de construcción cuando éste lo haga un contratista independiente, o bien hacer este trabajo con mano de obra propia.
- 8.) Llevar registro del costo de mantenimiento que sean necesarios al departamento de contabilidad y a la gerencia.

IX.4.- SEGURIDAD DE OPERACION DE LOS RELEVADORES.

Es una característica importante del relevador la seguridad en su operación bajo cualquier circunstancia, puesto que pasan un gran tiempo de su vida sin operar; en ese transcurso los contactos se deterioran de tal forma que, cuando ocurre una falla, no se encuentran en condiciones de funcionamiento. En el caso de que no operen muy frecuentemente, su mantenimiento debe ser frecuente.

IX.5.- MANTENIMIENTO DE LOS RELEVADORES DE PROTECCION.

Debido a la importancia de los relevadores y la consecuencia que originaría la falta de funcionamiento --

de los mismos, es importante someter los relés a un control regular; para esto debe haber un ensayo periódico de estos por medio de aparatos especiales los cuales permiten una simulación de un fallo como si se tratara de una falla real. Este ensayo permite funcionar sistemáticamente todos los relés de la red y verificar el ajuste de estos.

Para este tipo de ensayo es conveniente disponer de aparatos de control y bornes de ensayo o de conmutadores apropiados para una rápida y cómoda verificación de estos; para lo cual existen aparatos de ensayo para relés directos, relés de distancia, relés de tensión, etc., la alimentación de estos aparatos de ensayo se hace con fuentes independientes de la línea o bien tomando la alimentación de la misma.

IX.6.- PRUEBAS A RELEVADORES DE PROTECCION.

Se pueden hacer varias clases de pruebas, cada una con diversos grados de dificultad, es más importante que todas esas pruebas sean apegadas a los objetivos que se han proyectado; la clave es un mínimo de pruebas para una máxima ejecución.

Los objetivos de las pruebas de relevadores de protección indican cuatro clases de pruebas, estas son:

IX.6.1.- PRUEBAS DE ACEPTACION.

- a.) Aplicadas sobre productos nuevos por primera vez.
- b.) Aplicadas sobre cada producto recibido.

IX.6.2.- PRUEBAS DE INSTALACION.

IX.6.3.- PRUEBAS DE MANTENIMIENTO.

IX.6.4.- PRUEBAS DE REPARACION.

IX.6.1.- Las pruebas de aceptación son hechas una vez y generalmente en el laboratorio, estas se dividen en dos tipos que son: (a) sobre nuevos productos que no han sido previamente usados, es una extensa prueba sobre una muestra que se desea probar, adquiriendo experiencia y conocimientos o información técnica adicional. El segundo tipo es (b) prueba sobre cada producto recibido por el fabricante, han de ser coordinadas a un mínimo incluyendo sólo los puntos importantes de la inspección práctica para suponer que el producto está arriba de los estandars del fabricante.

IX.6.2.- Las pruebas de instalación son pruebas de campo para determinar si la instalación funciona correctamente en servicio efectivo, estas no son repetidas sobre alguna instalación dada a menos que haya ocurrido una operación incorrecta, muy frecuentemente son ejecutadas por pruebas simuladas con los circuitos secundarios energizados por una fuente de pruebas portátil; otros métodos incluyen: (a) pruebas simuladas usando una carga de corriente en el primario, (b) pruebas de operación con el primario energizado a voltaje reducido, y (c) pruebas de fallas simuladas.

En las pruebas de fallas simuladas se aplican fallas a un sistema de potencia para la comprobación de la operación de relevadores, usualmente son aplicadas fallas in

ternas y externas. Aunque éste es el mejor método, el costo y los riesgos de potencial son altos por tanto, las pruebas de falla simulada son limitadas a muy importantes y nuevas instalaciones de relevadores.

IX.6.3.- Las pruebas de mantenimiento son hechas generalmente en el campo a intervalos regulares, por lo regular estos intervalos son de una vez al año y son crecientes.

El mantenimiento de relevadores generalmente consiste de:

- a) Inspección y pulimiento de contactos.
- b) Eliminación de materia extraña.
- c) Chequeo de ajustes.
- d) Disparo de interruptores por cierre manual de contactos.
- e) Chequeo de tornillos por impermeabilidad.
- f) Limpieza de tapas.
- g) Tantas pruebas como sean permitidas.

IX.6.4.- Las pruebas de reparación implican recalibración despues de que las reparaciones mayores hayan sido hechas, así estas pruebas son usualmente hechas en el laboratorio. Muchas reparaciones menores frecuentemente son hechas en el campo durante el mantenimiento y no necesitan recalibración completa.

A veces se ha tenido una tendencia general a sobrepuebas de relevadores de protección, esto es justifica

do sobre las bases de su importancia en el sistema de potencia y las serias consecuencias de una mala operación o falla al operar; aunque esta importancia es un hecho, ha sido interesante observar también que los records de ejecución del relevador del sistema de potencia varían muy poco aunque la cantidad de pruebas varíe bastante.

Con los crecientes costos y mano de obra escasa, el área de pruebas, particularmente pruebas de mantenimiento está siendo estudiada para muchas utilidades. Un número de usuarios indica que pruebas menos frecuentes han resultado en una mejoría en el record de operación, las razones son la reducción en errores causados por empleo descuidado que es reducido por mantenimiento menos frecuente. Los estudios que se han hecho muestran que las dos principales causas de problemas son: defectos de equipo y empleo descuidado, son ambos decrecientes y en tal manera ese empleo descuidado es ahora considerado como la causa de mucho mayor porcentaje de problemas. Varias compañías están considerando sus intervalos de mantenimiento de uno y medio a dos años y hay una tendencia para largos intervalos de mantenimiento.

X.- EJEMPLO DE SELECCION.

Se requiere proteger una planta generadora, - un transformador de potencia y una línea de transmisión que alimentan a un banco de transformadores para la distribución de energía eléctrica. El sistema está instalado como se muestra en la Fig.10.1.

Para dar la protección adecuada a este sistema será necesario determinar lo siguiente:

- a).- Las zonas de protección más adecuadas y explicar - que tipo de protección puede usarse en cada zona.
- b).- Dibujar el diagrama trifilar e indicar las conexiones de la protección diferencial del banco. Seleccionar los transformadores de corriente adecuados para su conexión.
- c).- cuando se conecta el banco (conexión delta-estrella aterrizada) en la barra de 85 KV, determinar - que protección deberá agregarse a la misma para -- prever una falla de fase a tierra.

Deberá considerarse, como una restricción, que sólo se cuenta con los TC siguientes:

- 1.- TC de 230 KV, relación 1000/5
- 2.- TC de 230 KV, relación 1400/5
- 3.- TC de 85 KV, relación 1000/5

X.1.- SOLUCION.

a).- Zona de protección primaria que se muestra en la Fig. -
10.2.

Los tipos de protección a usarse son:

I.- La protección para líneas puede ser:

- a) Protección direccional de fases y tierra --
(67), (67N).
- b) Protección de sobrecorriente (50) y (51).
- c) Protección de distancia (21)
- d) Protección de onda portadora (85)
- e) Protección por hilo piloto (85)

II.- La protección para barras tanto en alta como -
en baja tensión es por medio de:

- a) Protección diferencial (87)

III.- La protección para bancos de transformadores:

- a) Protección diferencial (87)
- b) Protección Buchhols (63)
- c) Protección por sobrecorriente (50), (51), (51N).

Nota: Referencias (67), (67N), (50), etc. =

= NORMAS NEMA.

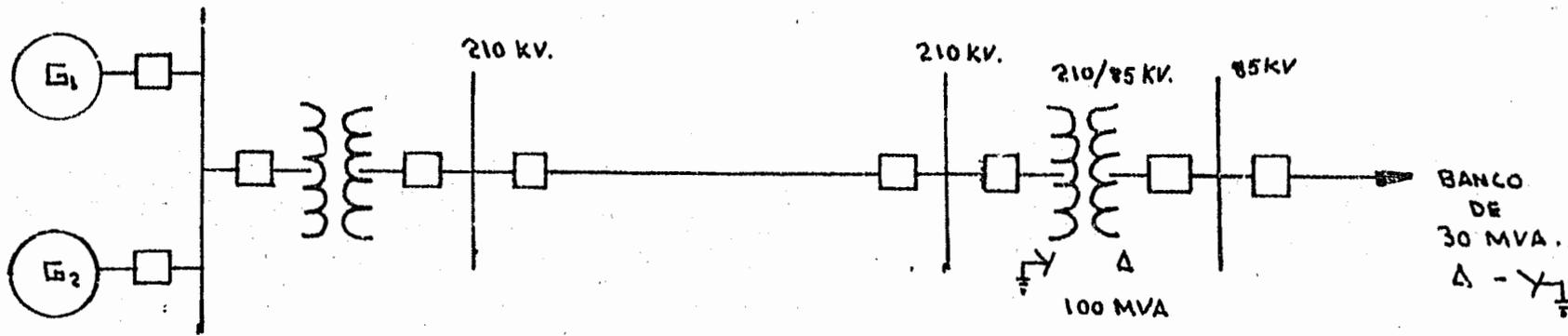


Fig.10.1.- Diagrama unifilar del sistema.

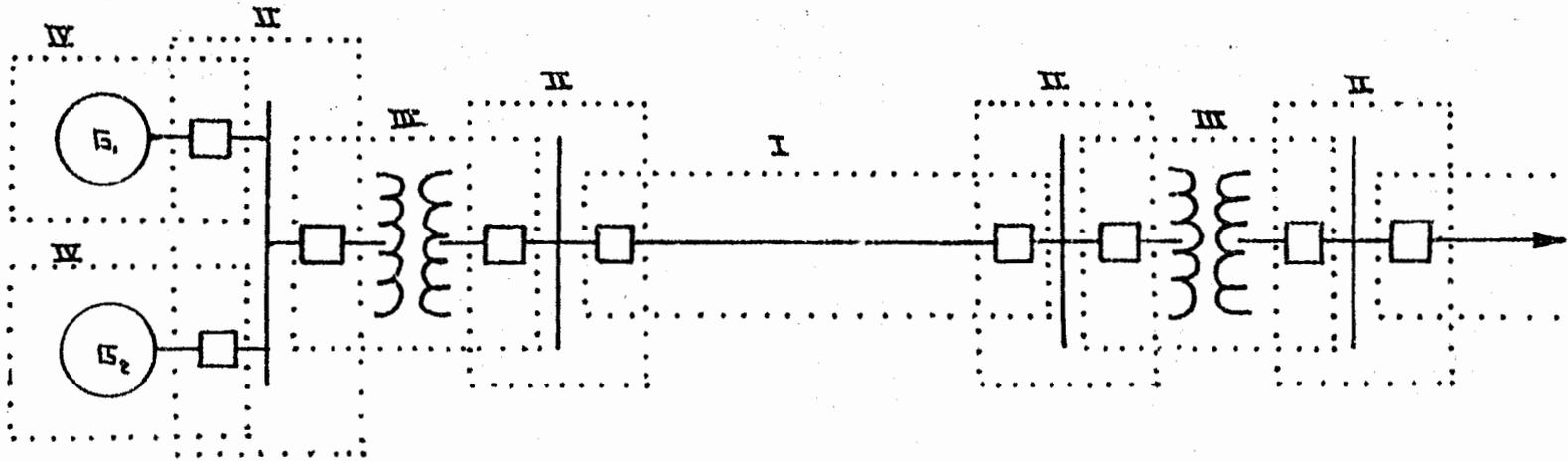


Fig.10.2.- Zonas de protección primaria.

IV.- Protección de generadores:

- a) Protección diferencial (17)
- b) Protección de distancia (21)

b).- En la Fig.10.3 se muestra el diagrama trifilar.

-Cálculo de las corrientes nominales en alta y baja tensión:

$$I_{N.A.T.} = \frac{100 \times 10^6}{\sqrt{3} \cdot 210 \times 10^3} = 274.9 \text{ amp.}$$

$$I_N = \frac{KVA}{\sqrt{3} \cdot KV_{LIN}}$$

$$I_{N.B.T.} = \frac{100 \times 10^6}{\sqrt{3} \cdot 85 \times 10^3} = 679.2 \text{ amp.}$$

-Cálculo de corrientes secundarias de los TC's:
en el lado de alta del transformador de potencia:

$$\text{si usaramos: } R_{TC} = \frac{1000}{5} = 200 \Rightarrow I_{sec. TC} = \frac{274.9}{200} = 1.37 \text{ amp.}$$

$$\text{si usaramos: } R_{TC} = \frac{1400}{5} = 280 \Rightarrow I_{sec. TC} = \frac{274.9}{280} = 0.98 \text{ amp.}$$

en el lado de baja del transformador de potencia:

$$R_{TC} = \frac{1000}{5} = 200 \Rightarrow I_{sec. TC} = \frac{679.2}{200} = 3.396 \text{ amp.}$$

-Corrientes en el relevador diferencial (en bobinas restrictivas):

en el lado de BT los TC's deberán estar conectados en estrella y por lo tanto:

$$I_{relé} = 3.396 \text{ amp.}$$

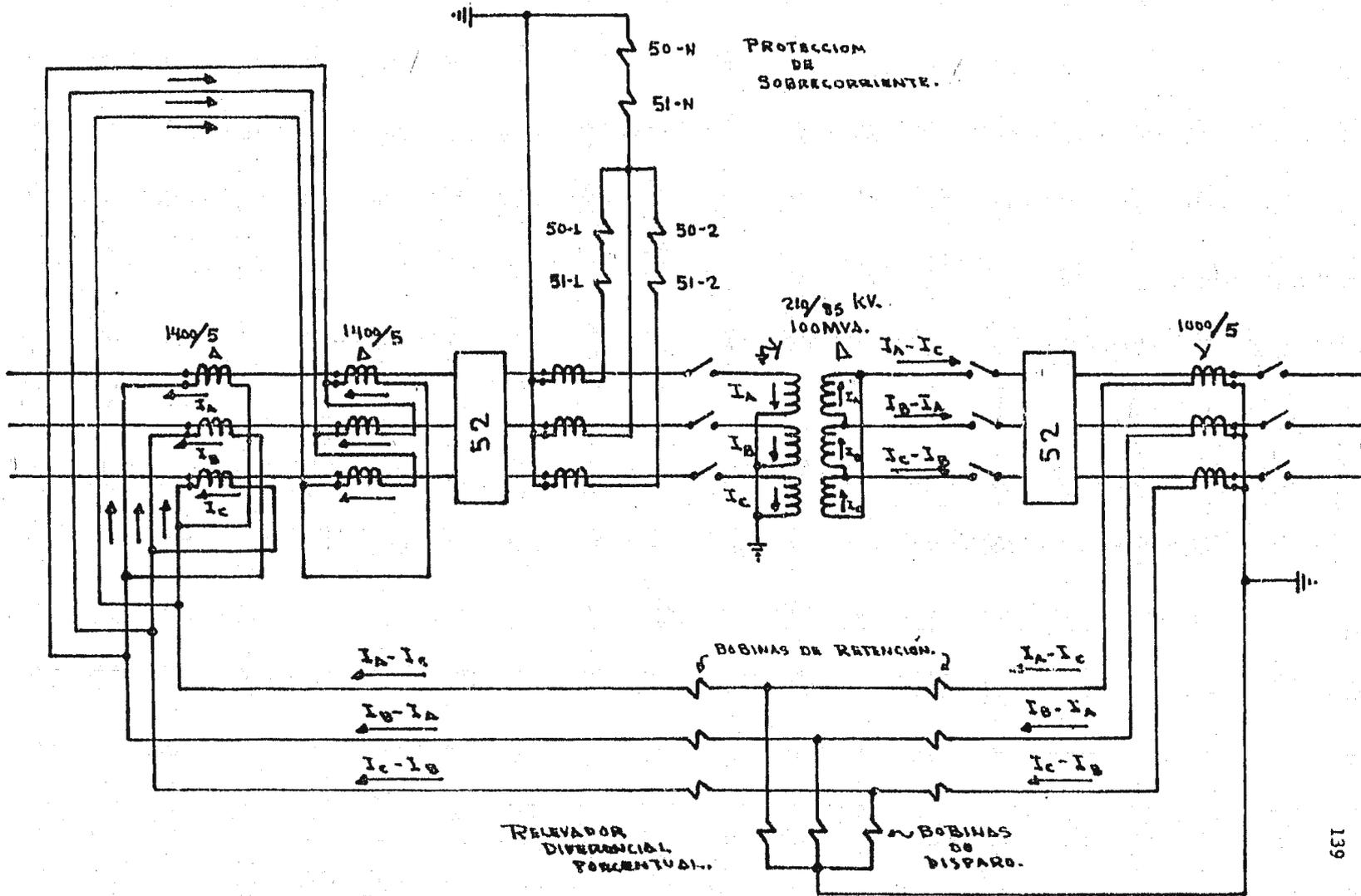


Fig.10.3.- Diagrama trifilar.

en el lado de AT los TC's deberán estar conectados en -
delta y por lo tanto:

$$\text{si usaramos: } R_{TC} = \frac{1000}{5} \Rightarrow I_{relé} = 1.3745(\sqrt{3}) = 2.381 \text{ amp.}$$

$$\text{si usaramos: } R_{TC} = \frac{1400}{5} \Rightarrow I_{relé} = 0.9818(\sqrt{3}) = 1.701 \text{ amp.}$$

Se concluye que la unica forma de que:

$$I_{relé'_{A.T.}} = I_{relé'_{B.T.}}$$

es conectando dos juegos de TC's en paralelo en el lado de -
AT cuya relación es: 1400/5 , o sea:

$$I_{relé'_{AT}} = 1.701 + 1.701 = 3.402 \text{ amp.}$$

(corriente casi igual a la de $I_{relé'_{B.T.}}$)

y por lo tanto: $I_{relé'_{AT}} = I_{relé'_{B.T}}$

c).- De la Fig.10.1 se observa que la conexión resultante en
el lado de 85 KV es la representada en la Fig.10.4.

Como se trata de dos devanados conectados en-
delta, cualquiera de los voltajes en los buses puede adqui-
rir valores anormales que no son detectados por las protec-
ciones indicadas en el inciso a). Por lo tanto es necesario-
conectar un transformador de tierra que nos permita referir-
las tensiones en cualquiera de las tres fases a un punto co-
mún, y además nos proporcione una fuente de secuencia cero -

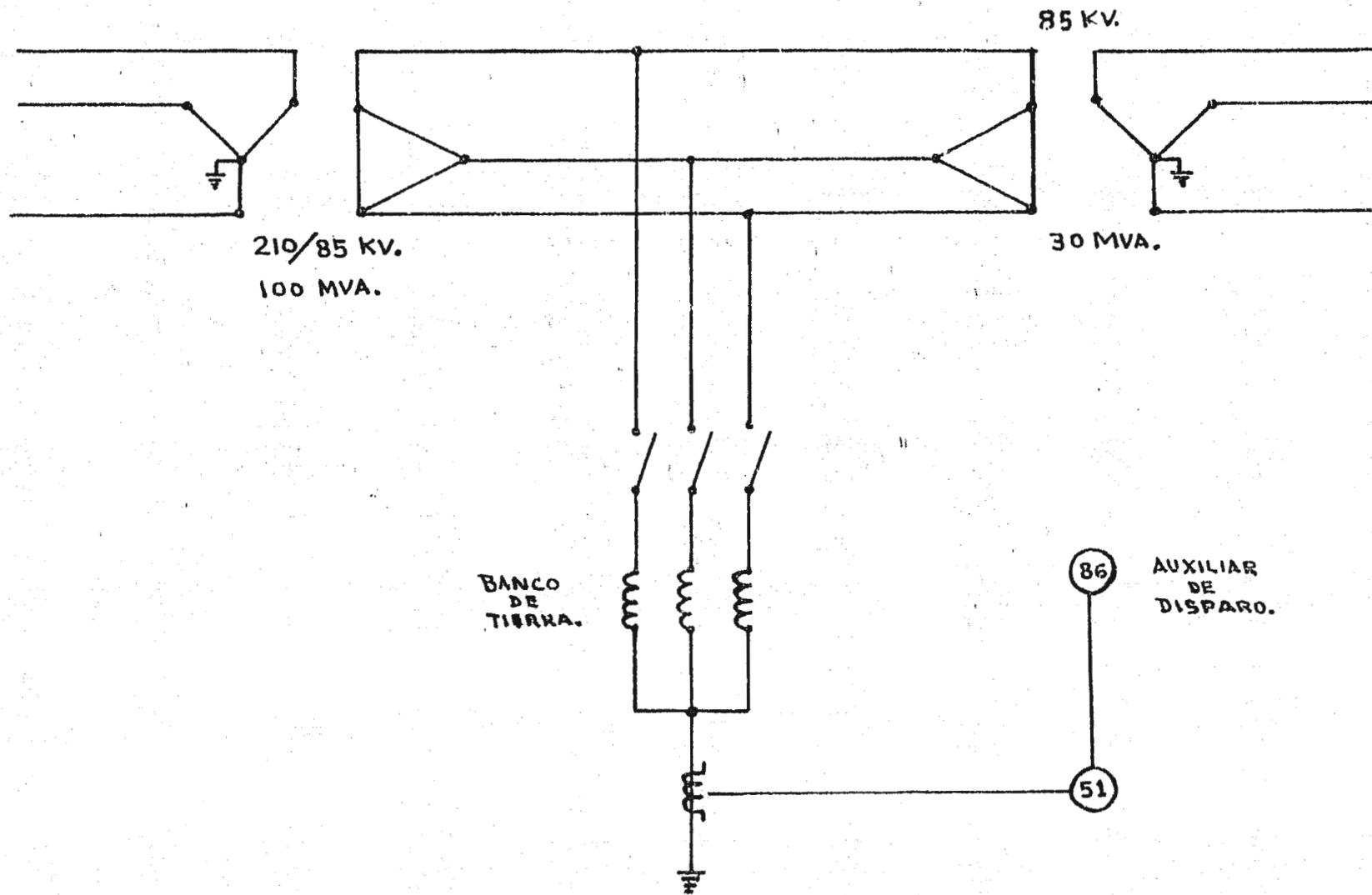


Fig.10.4.- Conexión resultante en el lado de 85 KV.

para fallas de línea a tierra.

X.2.- APLICACION DE LA COMPUTADORA.

En la selección de equipos de protección a utilizarse en los sistemas de potencia se cuenta ya con el uso de la computadora, con el cual se obtiene en un mínimo de tiempo, la caracterización de los instrumentos y equipos necesarios para proteger contra fallas a este sistema.

Los programas de computación pueden resolver problemas que pueden ir, desde el cálculo de corrientes de corto circuito en cualquier punto del sistema, además del tiempo en que se dispare un dispositivo al ocurrir ésta corriente; hasta la selección de alimentadores, relevadores, instrumentos y dispositivos contra sobrecorrientes y cortocircuitos.

De aquí que la tarea de la Ingeniería Eléctrica no termine en éste texto, será necesario la invención de nuevos métodos de cálculo, además del uso de la computadora, para la utilización correcta y eficiente de los dispositivos de protección necesarios en los Sistemas Eléctricos de Potencia.

XI.- CONCLUSIONES.

Después de este estudio se puede sacar en conclusión -- la importancia que tiene un sistema eléctrico de potencia para el desarrollo de la vida moderna, además de las características y requisitos que debe cumplir este sistema para su funcionamiento, para evitar malas operaciones y pérdidas que pueden ser muy costosas.

Dentro de las características que debe tener el sistema eléctrico de potencia, concluimos en que debe tener una calidad de servicio adecuada para que el suministro sea correcto; tener una continuidad en el mismo, regulación de voltaje y una frecuencia determinada.

Se debe contar, para el cumplimiento de lo anterior, -- con un sistema de protección que vigile que el sistema funcione correctamente para evitar fallas y disturbios que lleguen a ocasionar interrupciones del servicio y suministro evitando así daños materiales y en ocasiones humanos.

También todo sistema de protección debe tener ciertas -- características y requisitos para su buen funcionamiento, como son: confiabilidad, selectividad, rapidez, automaticidad y economía. Si no se cumplieran estos requisitos, la protección sería inefectiva y podría ser peligrosa.

También es muy importante contar con un departamento de mantenimiento para tener en buenas condiciones todo el equipo y evitar que puedan fallar en determinado momento de su operación.

En general es conveniente contar con un mantenimiento preventivo, que tener que hacer reparaciones al momento; toda inspección siempre podrá evitar descomposturas y paros durante el curso de operación.

Con un mantenimiento periodico y un sistema de protección adecuados se tendrá un sistema eléctrico de potencia en condiciones normales y se tendrá un alto grado de desarrollo para todas las áreas de producción del país, lo que permitirá el progreso y una vida mejor para el hombre.

BIBLIOGRAFIA

- 1.- Estaciones de Transformación, Distribución y Protección de Sistemas Eléctricos.
José Ramirez Vazquez.
- 2.- Protección de Sistemas de Potencia e Interruptores.
B. Ravindranath y M. Chander.
- 3.- El Arte y la Ciencia de la Protección por Relevadores.
C. Russell Mason.
- 4.- Analisis de Sistemas eléctricos de Potencia.
William D. Stevenson.
- 5.- Redes Eléctricas. Tomos I y II.
Jacinto Viqueira Landa.
- 6.- Applied Protective Relaying.
Westinghouse Electric Corporation.
- 7.- Fundamentos de Instalaciones Eléctricas de Mediana y Alta Tensión.
Gilberto Enriquez Harper.
- 8.- Control de Motores Eléctricos.
Serie Electricidad.
- 9.- Sistemas Industriales de Regulación Eléctrica.
Ch. Siskind.
- 10.- Circuitos Eléctricos.
Joseph A. Edminister.
- 11.- Fundamentos de Control para Motores.
Square D. de México. S.A.
- 12.- Sistemas de Transmisión de Energía Eléctrica.
Robert Eaton.