

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**CONCEPTOS Y FORMAS DE PROTECCIÓN
DE INSTALACIONES INDUSTRIALES
POR MEDIO DE RELEVADORES**

TESIS

Presentada a la Junta Directiva
de la
Facultad de Ingeniería
por

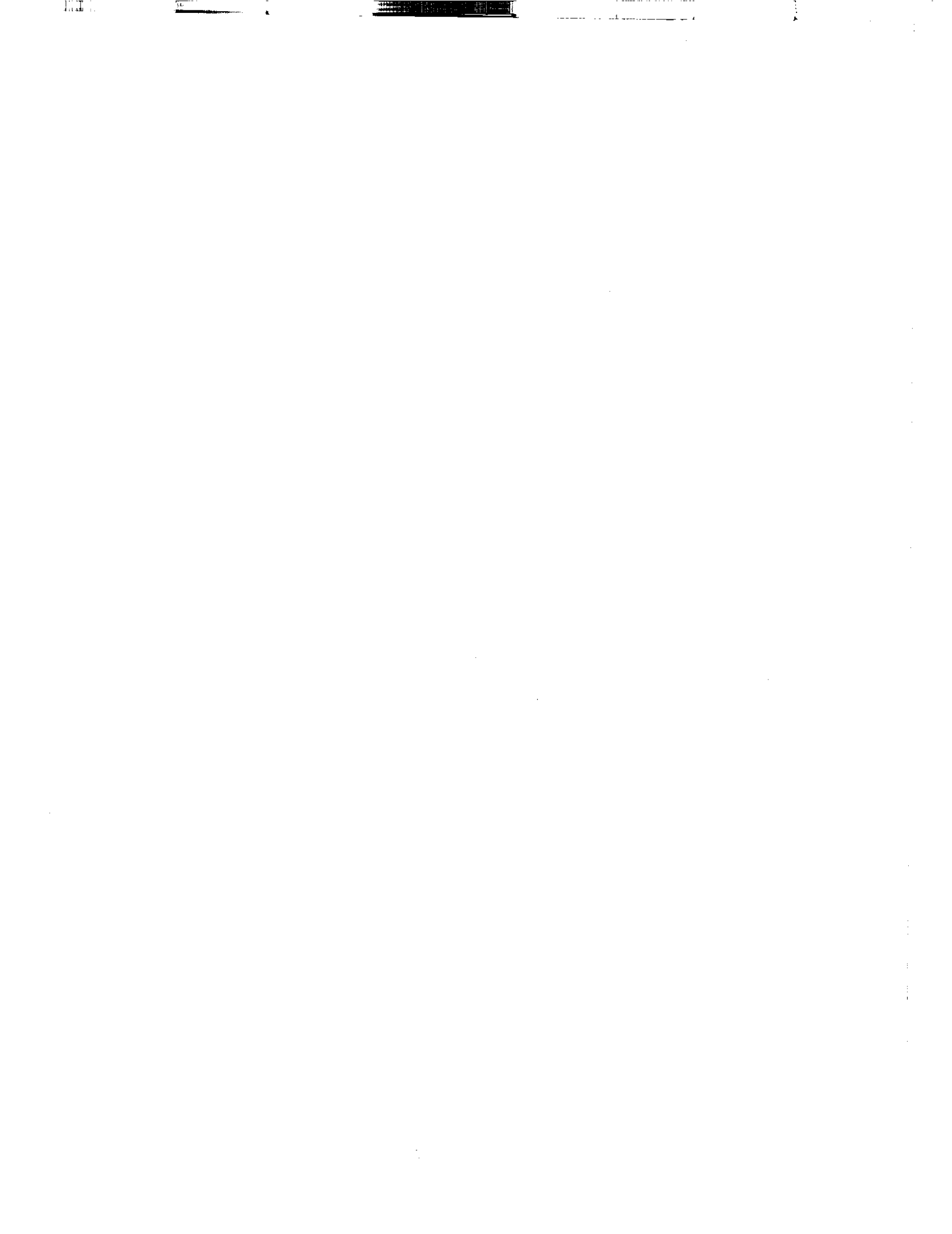
HECTOR BAUDILIO CABALLEROS REVOLORIO

al conferírsele el título de

INGENIERO ELECTRICISTA

Guatemala, octubre de 1976

PROPIEDAD DE LA UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
Biblioteca Central



UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

MIEMBROS DE LA JUNTA DIRECTIVA

DECANO	Ing. Julio Ismael González Podszueck
VOCAL 1o.	Ing. Miguel Angel Sánchez Guerra
VOCAL 2o.	Ing. Jack Douglas Ibarra Solórzano
VOCAL 3o.	Ing. Juan Adolfo Echeverría Méndez
VOCAL 4o.	Br. Fernando Waldemar De León Contreras
VOCAL 5o.	Br. Pedro Ignacio Escalante Pastor.
SECRETARIO	Ing. Francisco Javier González López

TRIBUNAL QUE PRACTICO EL EXAMEN
GENERAL PRIVADO

DECANO	Ing. Julio Ismael González Podszueck
SECRETARIO	Ing. Francisco Javier González López
EXAMINADOR	Ing. Judy Marlene Lone de Hidalgo
EXAMINADOR	Ing. Carlos Fernando Rodas
EXAMINADOR	Ing. Edwin Alberto Solares Martínez



Guatemala, 19 de agosto de 1996

Ingeniero
Luis Herrera Gálvez
Coordinador Area de Electrotecnia
Escuela de Ingeniería Mecánica-Eléctrica
Facultad de Ingeniería,
UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA

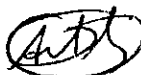
Señor Coordinador:

Atentamente me dirijo a usted, para informarle que he concluido la revisión del trabajo de tesis titulado: **CONCEPTOS Y FORMAS DE PROTECCIÓN DE INSTALACIONES INDUSTRIALES POR MEDIO DE RELEVADORES**", desarrollado por el estudiante HECTOR BAUDILIO CABALLEROS REVOLORIO, previo a optar el título de Ingeniero Electricista.

En mi calidad de asesor de trabajo de tesis, me es grato manifestarle que éste cumple satisfactoriamente con los objetivos planteados, llenando los requisitos reglamentarios estipulados para estos casos.

Sin otro particular, me es grato suscribirme.

Atentamente,



Ing. Luis Arturo González L.
Colegiado No. 3361
ASESOR





FACULTAD DE INGENIERIA

Escuelas de Ingeniería Civil, Ingeniería
Mecánica Industrial, Ingeniería Química,
Ingeniería Mecánica Eléctrica, Técnica
y Regional de Post-grado de Ingeniería
Sanitaria.

Ciudad Universitaria, zona 12
Guatemala, Centroamérica

Guatemala, 5 de septiembre de 1996

Señor Director
Ing. Edgar F. Montúfar Urizar
Escuela Ingeniería Mecánica Eléctrica
Su despacho.


Señor Director:

Me permito sugerir para su aprobación, el trabajo de tesis titulado: **Conceptos y formas de protección de instalaciones industriales por medio de relevadores**, desarrollado por el estudiante **Héctor Baudilio Caballeros Revolorio**, previo a optar al título de Ingeniero Electricista, ya que considero que cumple con los requisitos establecidos para tal fin.

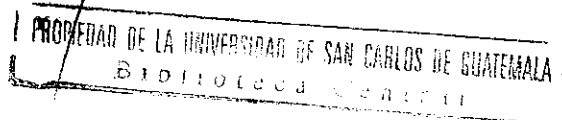
Sin otro particular, aprovecho la oportunidad para saludarlo.

Atentamente,

ID Y ENSEÑAD A TODOS


Ing. Luis Herrera Gálvez
Coordinador Área de Electrotecnia

LHG/sdem







FACULTAD DE INGENIERIA

Escuelas de Ingeniería Civil, Ingeniería
Mecánica Industrial, Ingeniería Química,
Ingeniería Mecánica Eléctrica, Técnica
y Regional de Post-grado de Ingeniería
Sanitaria.

Ciudad Universitaria, zona 12
Guatemala, Centroamérica

El Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica, después de conocer el dictamen del Asesor, con el Visto Bueno del Coordinador de Area, al trabajo de tesis del estudiante Héctor Baudilio Caballeros Revolorio, titulada: **Conceptos y formas de protección de instalaciones industriales por medio de relevadores**, procede a la autorización del mismo.


Ing. Edgar F. Montúfar Urizar
Director



Guatemala, 17 de septiembre de 1,996.





FACULTAD DE INGENIERIA

Escuelas de Ingeniería Civil, Ingeniería
Mecánica Industrial, Ingeniería Química,
Ingeniería Mecánica Eléctrica, Técnica
y Regional de Post-grado de Ingeniería
Sanitaria.

Ciudad Universitaria, zona 12
Guatemala, Centroamérica

El Decano de la Facultad de Ingeniería, luego de conocer la autorización por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica, al trabajo de tesis: **Conceptos y formas de protección de instalaciones industriales por medio de relevadores**, del estudiante **Héctor Baudilio Caballeros Revolorio**, procede a la autorización para la impresión de la misma.

Ing. Julio Ismael González Podszueck

Decano



Guatemala, 23 de septiembre de 1,996.



DEDICATORIA

A DIOS:

Porque de él viene la vida, la sabiduría, el entendimiento y la fortaleza para poder enfrentar los diversos problemas de este duro caminar.

A MIS PADRES:

Baudilio y Telma, por sus grandes sacrificios, incontables esfuerzos, incomparable dedicación. Por su gran ejemplo de trabajo, disciplina y honradez, formadores de mi vida. Que Dios los bendiga y se los multiplique siempre !MIL GRACIAS queridos padres!

A MIS HERMANOS:

Ana María, Nydia y Haroldo, por sus consejos, por su confianza, compañerismo y apoyo que siempre me brindaron.

A MI NOVIA:

Marvely, por su amor, paciencia, comprensión y confianza; compañera en éxitos y fracasos. Hago votos por una larga vida juntos llena de felicidad.



ÍNDICE

GLOSARIO.....	i
INTRODUCCIÓN.....	ii

CAPITULO 1 **CONCEPTOS BÁSICOS DE PROTECCIÓN EN INSTALACIONES ELÉCTRICAS INDUSTRIALES**

1.1 Aspectos que se deben considerar.....	1
1.2 Criterios generales de protección de los sistema eléctricos.....	2
1.3 El equipo básico de protección.....	3
1.3.1 Dispositivos de protección contra sobrecorrientes.....	3
1.3.2 Interruptores para sistemas con voltajes mayores de 600 voltios.....	5
1.3.2.1 Interruptores en aire.....	5
1.3.2.2 Interruptores en vacío.....	7
1.3.2.3 Interruptores en aceite.....	10
1.3.2.4 Interruptores en gas.....	11
1.3.2.5 Fusibles para sistemas arriba de 600 voltios.....	14
1.3.2.5.1 Fusibles de potencia limitadores de corriente.....	14
1.3.2.5.2 Fusibles de potencia no limitadores de corriente.....	14
1.3.2.5.3 Fusibles tipo distribución para uso en cortacircuito.....	15
1.3.3 Dispositivos de protección para instalaciones en baja tensión.....	16
1.3.3.1 Interruptores.....	17
1.3.3.1.1 Interruptores en aire.....	17
1.3.3.1.2 Interruptores en caja moldeada.....	18
1.3.3.2 Fusibles.....	23

CAPITULO II **ESTUDIO DE CORTO CIRCUITOS EN LAS INSTALACIONES INDUSTRIALES**

2.1 Generalidades.....	26
2.2 Conceptos básicos del estudio de corto circuitos.....	26
2.2.1 Fuentes de corto circuito.....	28
2.2.1.1 Generadores.....	28
2.2.1.2 Motores síncronos.....	28

2.2.1.3 Motores de inducción.....	29
2.2.1.4 Alimentación o compañía suministradora.....	30
2.2.2 Las reactancias de las máquinas rotatorias.....	32
2.2.2.1 Reactancia subtransitoria.....	33
2.2.2.2 Reactancia transitoria.....	33
2.2.2.3 Reactancia síncrona.....	33
2.2.3 Corrientes de corto circuito simétricas y asimétricas....	33
2.3 El cálculo de corto circuito.....	36
2.3.1 Tipos de fallas en las instalaciones eléctricas industriales.....	36
2.3.1.1 Falla trifásica sólida.....	37
2.3.1.2 Falla de fase a fase sólida.....	37
2.3.1.3 Falla de línea a tierra sólida.....	37
2.4 Teoría de componentes simétricos.....	38
2.4.1 Los operadores de las componentes simétricas.....	39
2.4.2 Formación de redes de secuencia para los estudios de corto circuitos.....	40
2.4.2.1 La red de secuencia positiva.....	41
2.4.2.2 La red de secuencia negativa.....	41
2.4.2.3 La red de secuencia cero.....	42
2.5 La teoría de las fallas trifásicas y monofásicas.....	43
2.5.1 Falla trifásica.....	43
2.5.2 Falla monofásica (línea a tierra).....	45
2.6 Detalle de los cálculos de corto circuitos.....	47
2.6.1 El procedimiento paso a paso.....	48
2.7 Aplicación del cálculo de corto circuito a instalaciones industriales y comerciales.....	48
2.8 Los cálculos de corto circuito para la protección por relevadores.....	53

CAPITULO III PROTECCIÓN PARA TRANSFORMADORES

3.1 Generalidades.....	55
3.2 Fallas en el equipo auxiliar.....	56
3.2.1 Aceite para el transformador.....	56
3.2.2 Colchón de gas.....	57
3.2.3 Bombas de aceite y ventiladores de aire forzado.....	57

3.2.4 Aislamiento del núcleo y bobina.....	57
3.3 Fallas en la parte interior.....	58
3.4 Sobrecargas y corto circuitos externos.....	59
3.4.1 Relevadores con tipo de armadura atraída.....	59
3.4.2 Relevadores de inducción.....	60
3.5 Protección por relevadores Buchholz.....	61
3.6 Protección de imagen térmica.....	63
3.7 Protección diferencial del los transformadores.....	67
3.7.1 La derivación de la corriente de secuencia cero.....	69
3.8 Funcionamiento de la protección diferencial.....	70
3.9 Protección de transformadores según su capacidad.....	74
3.9.1 Capacidad en KVA.....	75
3.9.2 Localización y función en el sistema.....	76
3.9.3 Tensión de operación.....	76
3.9.4 Conexiones y operaciones de diseño.....	76
3.10 Corrientes magnetizantes de inserción (inrush current)....	78

CAPITULO IV PROTECCIÓN PARA MOTORES Y GENERADORES

4.1 Protección de motores eléctricos.....	81
4.1.1 Riesgos durante la operación de los motores eléctricos...81	
4.1.2 Características de los motores que se deben considerar en la protección	82
4.1.3 Protección general de motores eléctricos.....	84
4.1.3.1 Protección contra falla de fase.....	86
4.1.3.2 Protección de sobrecorriente instantánea de fase.....	87
4.1.3.3 Protección contra sobrecarga.....	88
4.1.3.4 Protección contra sobrecargas (49).....	89
4.1.3.5 Protección de sobrecorriente instantánea.....	89
4.1.3.6 Protección de sobrecorriente con retardo de tiempo.....	89
4.1.3.7 Protección instantánea de falla a tierra.....	90
4.1.3.8 Protección de falla a tierra.....	90
4.1.3.9 Protección de bajo voltaje.....	93
4.2 Protección de generadores eléctricos.....	103
4.2.1 Clasificación de la operación de los generadores.....	104
4.2.1.1 Generador operando en forma aislada.....	104
4.2.1.2 Generadores múltiples operando en forma aislada.....	104

4.2.1.3	Grandes generadores industriales.....	105
4.2.2	Las bases para la protección de los generadores eléctricos.....	105
4.2.3	Esquemas de protección recomendados.....	106
4.2.3.1	Generadores pequeños.....	106
4.2.3.2	Generadores de tamaño mediano.....	107
4.2.3.3	Generadores grandes.....	109

**CAPITULO V COORDINACIÓN DE PROTECCIONES EN INSTALACIONES
INDUSTRIALES**

5.1	Generalidades para la coordinación en mediana y baja tensión.....	111
5.2	Proceso de coordinación de los dispositivos de protección.....	112
5.3	Selectividad entre fusibles conectados en serie.....	118
5.4	Selectividad entre interruptores en serie.....	119
5.5	Selectividad entre un interruptor y un fusible.....	121
5.6	Ajustes de corriente sugeridos para relevadores de sobre- corriente.....	122
5.6.1	Coordinación por ajuste de corriente.....	126
5.6.2	Coordinación por ajuste de tiempo.....	128
5.7	Comparación de los equipos de protección.....	129

CONCLUSIONES.....	133
--------------------------	------------

RECOMENDACIONES.....	135
-----------------------------	------------

BIBLIOGRAFÍA.....	136
--------------------------	------------

GLOSARIO

ARRANCADOR ELÉCTRICO: es un regulador eléctrico, cuya función principal es la de poner en marcha un motor.

BURDEN: es un valor de carga que se conecta a los transformadores de instrumento y está expresado en unidades de potencia.

CAÍDA DE TENSIÓN: es la caída de voltaje que se presenta en tendidos, generalmente de cable, debido a la resistencia eléctrica del mismo.

CIRCUITO DE FUERZA: lo constituyen todos aquellos elementos del circuito eléctrico destinado al manejo de grandes corrientes y voltajes.

CIRCUITO DE CONTROL: lo constituyen todos aquellos elementos del circuito eléctrico destinados al manejo de bajas corrientes y voltajes; su principal objetivo es coordinar y controlar el funcionamiento de los equipos conectados al circuito de fuerza.

CONTACTOR: dispositivo eléctrico que se utiliza principalmente para la conmutación remota.

CORRECCIÓN DEL FACTOR DE POTENCIA: consiste en la instalación de fuentes de potencia reactiva, tales como bancos de capacitores o motores síncronos sobreexcitados, con el objeto de mejorar el factor de potencia.

CORRIENTE DE ARRANQUE: es la corriente consumida por un motor al momento de ser puesto en marcha.

CORRIENTE A ROTOR BLOQUEADO: es la corriente consumida por un motor cuando se frena mecánicamente el rotor del motor, y se alimenta con tensión reducida.

CORRIENTE NOMINAL: es la corriente consumida por un motor al momento en que éste suministra la potencia nominal en su eje.

DISPARO: se le llama al momento en que un dispositivo de protección actúa haciendo operar algún otro tipo de dispositivo.

FACTOR DE POTENCIA: es el coseno del ángulo de fase entre el voltaje y la corriente de un circuito eléctrico.

FACTOR DE SERVICIO: es la razón entre la potencia máxima para la cual fue construido un motor y su valor nominal de placa.

FRECUENCIA NOMINAL: es la frecuencia del voltaje y la corriente de la red, para los cuales ha sido construido una máquina eléctrica.

FUENTE DE ALIMENTACIÓN: se denomina así, el medio al cual se conecta un dispositivo eléctrico, con el fin de obtener la energía que este necesita para su funcionamiento.

FUERZA CENTRÍFUGA: se refiere a la fuerza producida por un cuerpo, el cual gira alrededor de un eje fijo y cuya línea de acción es en forma radial.

MOTORES POLIFÁSICOS: todo aquel motor que se conecta a una red polifásica de suministro eléctrico, y basa su funcionamiento en la teoría de los campos magnéticos rotativos.

MOTORES DE INDUCCIÓN: son aquellos motores cuyo rotor no tiene bobinas, sino barras de cobre en cortocircuito, y se basa en el principio de la inducción magnética por medio de la corriente alterna.

PAR DE ARRANQUE: es la magnitud del torque suministrado por el motor en su eje, en el momento de ser puesto en marcha.

1.3.2.2. INTERRUPTOR EN VACÍO

Los mejores conductores de electricidad son aquellos materiales que ofrecen la mayoría de electrones libres, y por el contrario, los mejores aisladores o dieléctricos ofrecen el mínimo número de electrones libres. Debido a que el vacío constituye una ausencia de cualquier sustancia y por lo tanto, una ausencia de electrones, en teoría, representa el mejor dieléctrico.

Basada en esta teoría, pueden haber grandes ventajas que se pueden aprovechar. Si operan mecánicamente los contactos eléctricos, quedarán dentro de una cámara de vacío.

La mayoría de los fabricantes han sido capaces de construir tales dispositivos para su uso en alta tensión. Dentro de las ventajas que se tienen, se pueden mencionar las siguientes:

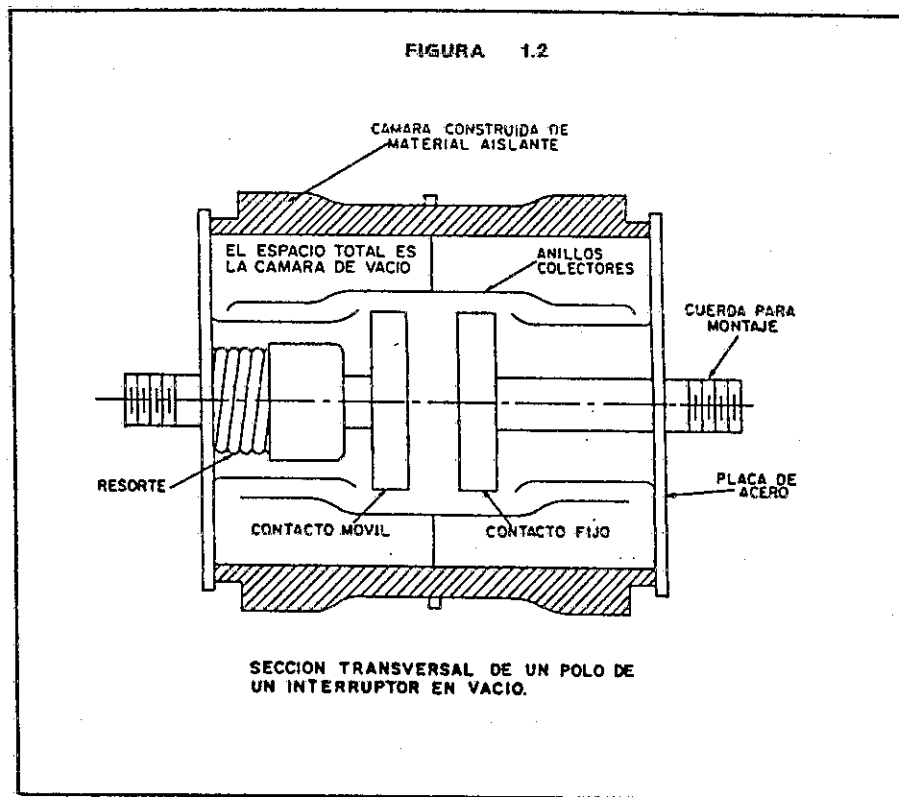
1. Son más rápidos para extinguir el arco eléctrico.
2. Producen menos ruido durante la operación.
3. El tiempo de vida de los contactos es mayor.
4. Se eliminan o se reducen sensiblemente los riesgos de explosiones potenciales por presencia de gases o líquidos

El mantenimiento de estos interruptores es reducido y se pueden usar en casi cualquier lugar, debido a que no son afectados por la temperatura ambiente ni por condiciones atmosféricas. En las figuras siguientes, se muestran las partes principales de un polo de un interruptor en vacío.

COMO SE PODRÁ OBSERVAR EN LA SIGUIENTE FIGURA, EL INTERRUPTOR ES SIMPLE EN CONSTRUCCIÓN, SE TIENEN DOS CONTACTOS TIPO DISCO, MOSTRADOS DENTRO DE UN CILINDRO CONTENEDOR. LA CÁMARA ES EVACUADA PARA PROPORCIONAR EL VACÍO. UN CONTACTO ES FIJO Y EL OTRO ESTA DISEÑADO PARA QUE SE ACERQUE O SE ALEJE DEL FIJO, SEGÚN SE CIERRE O SE ABRA. EL MOVIMIENTO SE CONTROLA POR MEDIO DE UNA BARRA DE ACERO QUE SE ACCIONA DESDE EL EXTERIOR. LA SEPARACIÓN ENTRE CONTACTOS ES DEL ORDEN DE 2.0 centímetros.

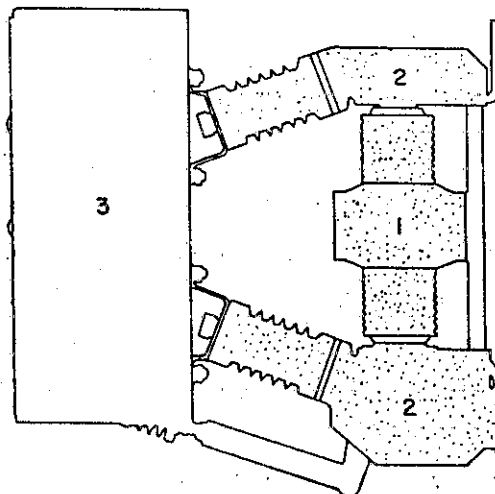
PROPIEDAD DE LA UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
Biblioteca Central

INTERRUPTOR EN vacío



CONSTITUCION DE UN INTERRUPTOR DE VACIO

- 1- INTERRUPTOR DE VACIO
- 2- SOPORTE DEL TANQUE DE VACIO
- 3- ACCIONAMIENTO DE LA BIELA DE MANIOBRA



Existen básicamente dos dispositivos fundamentales que se usan en forma común en las instalaciones industriales, para cumplir con la funciones de protección (para voltajes menores de 600 Voltios); éstos son:

- a) Los interruptores termomagnéticos (flip-ones).
- b) Los fusibles.

1.3.2. INTERRUPTORES PARA SISTEMAS CON VOLTAJES MAYORES DE 600V

Los interruptores para instalaciones con voltajes superiores a los 600 voltios se dividen en cuatro grupos básicos.

1. Interruptores en aire.
2. Interruptores en vacío.
3. Interruptores en aceite.
4. Interruptores en gas.

Todos estos interruptores operan en conjunto con los RELEVADORES de protección para llenar los requisitos para una operación automática.

Por lo general, no se suministran los sensores con los dispositivos de protección, pero deben estar incluidos para iniciar las operaciones de protección.

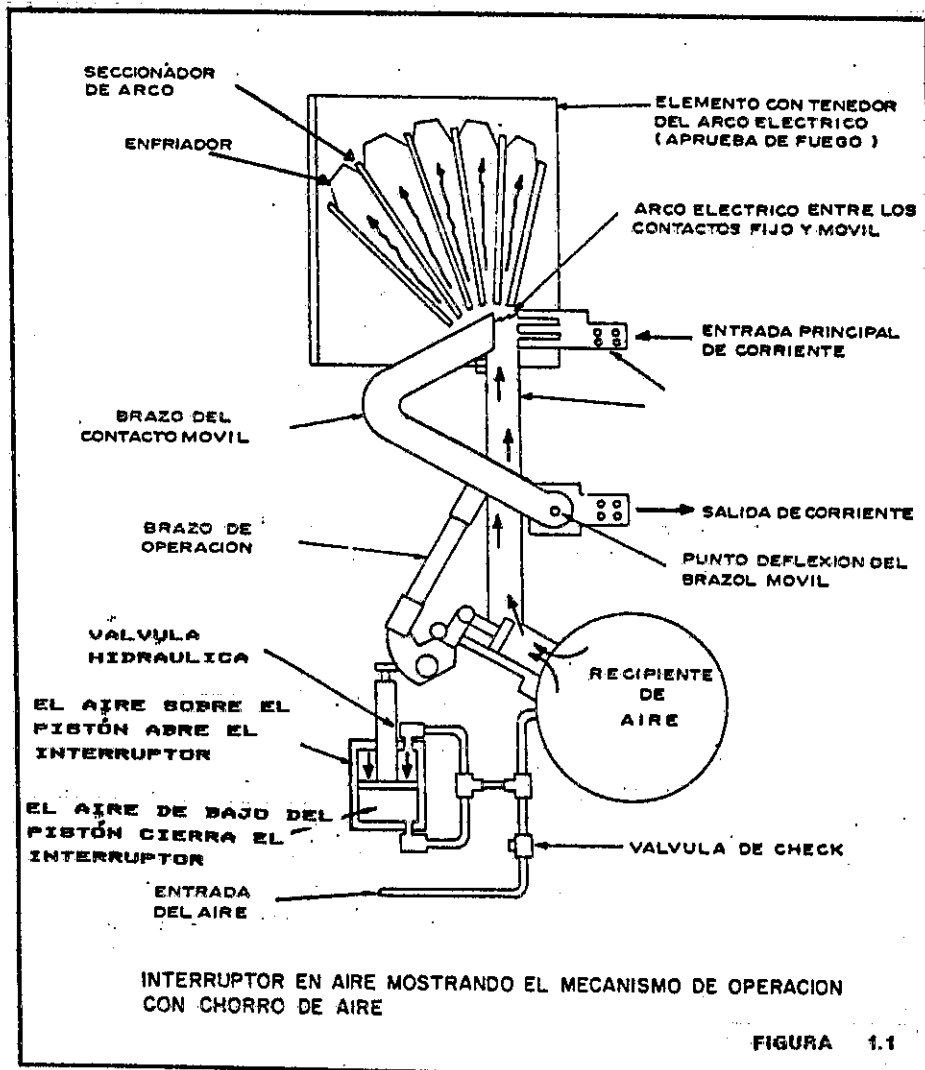
1.3.2.1. INTERRUPTORES EN AIRE

Los interruptores en aire tienden a ser usados en instalaciones en interiores, y como su nombre lo indica, interrumpen sólo con aire entre sus contactos. Este tipo de interruptores se puede usar en instalaciones exteriores, siempre que el mecanismo del interruptor, los controles, etc. se instalen en casetas o instalaciones sencillas a prueba de intemperie. Estos interruptores los fabrican para operar, por lo general, con voltajes en el rango de 2400 a 34500 voltios.

En la siguiente figura, se muestra la sección transversal del mecanismo de un interruptor en aire, y se muestra únicamente un polo del interruptor.

El Aire de una fuente de aire comprimido se usa, ya sea para abrir o para cerrar la navaja de los contactos móviles bajo carga eléctrica; un arco se iniciará entre la navaja móvil y los contactos fijos.

Para prevenir daño por calentamiento, se inyecta un chorro de aire justo en el momento en que el interruptor abre y se extingue el arco producido entre los contactos.



protección, se puede definir como: "LA DETECCIÓN Y PRONTO AISLAMIENTO DE LA PORCIÓN AFECTADA DEL SISTEMA, YA SEA QUE OCURRA UN CORTO CIRCUITO O BIEN OTRA CONDICIÓN ANORMAL QUE PUEDA PRODUCIR DAÑO A LA PARTE AFECTADA O A LA CARGA QUE ALIMENTA".

La coordinación es la selección o ajuste, o ambas cosas, de los dispositivos de protección, para aislar la parte afectada del sistema cuando ocurre alguna anomalía. Este debe ser un aspecto que se debe considerar en cualquier sistema eléctrico bien diseñado.

La protección de los sistemas eléctricos es uno de los aspectos esenciales que deben ser considerados en el diseño y operación de las instalaciones eléctricas industriales.

1.3 EL EQUIPO BÁSICO DE PROTECCIÓN

Para proteger contra fallas, como un corto circuito o una sobrecarga, se requiere de la aplicación de equipo de protección que pueda cumplir con ambas funciones básicas (sensora y actuadora). En ambos casos, el elemento sensor y el dispositivo de interrupción son elementos completamente separados e interconectados sólo por los cables de control.

En otros casos, los sensores y los dispositivos de interrupción se encuentran en un mismo dispositivo.

Un fusible cumple con ambas funciones; es un elemento sensor y de interrupción; se conecta en serie con el circuito y responde a los efectos térmicos producidos por la circulación de corriente a través del mismo.

Los Interruptores son sólo dispositivos de interrupción que se deben usar necesariamente con elementos sensores (relevadores).

1.3.1. DISPOSITIVOS DE PROTECCIÓN CONTRA SOBRECORRIENTES

Los dispositivos, de protección contra sobrecorrientes, son los elementos que han sido contemplados para proteger los sistemas eléctricos de los daños por sobrecarga y corrientes de cortocircuito.

Por esta razón, es obvio que estos dispositivos representan una función extremadamente importante. Una definición de la protección contra sobrecorriente es la siguiente: "La protección contra sobrecorriente para conductores y equipos se proporciona con el propósito de interrumpir el circuito eléctrico, si la corriente alcanza un valor que pudiera causar una temperatura excesiva y peligrosa en el conductor".

De ahí que casi todo circuito eléctrico debe tener protección contra sobrecorriente en alguna forma.

Los dispositivos de protección contra sobrecorriente deben cumplir con los siguientes requerimientos generales:

- a) Ser completamente automáticos.
- b) Transportar la corriente nominal sin interrupción.
- c) Interrumpir inmediatamente las sobrecorrientes.
- d) Ser fácilmente reemplazables.
- e) Ser seguros tanto para condiciones normales como para cuando se presente una sobrecorriente. En otras palabras ser confiables.

Para reunir los requerimientos para la protección contra cortocircuito, deben cumplir totalmente con las siguientes especificaciones básicas:

1. Debe ser capaz de cerrar en forma segura sobre cualquier valor de corriente de carga.
2. Debe ser seguro para interrumpir cualquier corriente que pueda circular dentro del rango de interrupción del dispositivo.
3. Debe interrumpir automáticamente un flujo anormal de corriente dentro de su capacidad interruptiva.

CAPÍTULO I

CONCEPTOS BÁSICOS DE PROTECCIÓN EN INSTALACIONES ELÉCTRICAS INDUSTRIALES

1.1. ASPECTOS QUE SE DEBEN CONSIDERAR

Las instalaciones eléctricas industriales, por su tamaño y complejidad, son prácticamente pequeños sistemas eléctricos de potencia, y el uso de las técnicas de análisis usadas en éstos, pueden ser aplicables también en las instalaciones industriales. Para el análisis de los sistemas eléctricos, se utiliza un conjunto de técnicas que se basan en las leyes fundamentales de la electricidad aplicables a circuitos trifásicos de corriente alterna, principalmente.

Estas técnicas facilitan el cálculo del comportamiento de los sistemas bajo condiciones específicas, para auxiliar en el diseño de nuevos sistemas, para rediseñar los sistemas existentes, o bien, para hacer ajustes y modificaciones a partes de las instalaciones.

Los estudios principales de análisis en instalaciones industriales incluyen:

- a) Estudio y cálculo de corto circuito.
- b) Selección de dispositivos de protección.
- c) Coordinación de dispositivos de protección.
- d) Otros conceptos como arranque de motores, estudios de caída de voltaje y corrección de factores de potencia.

El principal objetivo de este tipo de estudio es proporcionar a los ingenieros y técnicos una fuente de información simple y relativamente económica para instalaciones industriales y

comerciales, de manera que se satisfagan los aspectos de

1. Seguridad y continuidad.
2. Confiabilidad de servicio.
3. Calidad en el suministro de la energía.
4. Diseño de instalaciones fáciles de operar y mantener.
5. Facilidad de ampliación, cuando sea necesario.
6. Costos iniciales y de operación mínimos.

1.2. CRITERIOS GENERALES DE PROTECCIÓN DE LOS SISTEMAS ELÉCTRICOS

Las condiciones de operación anormales más frecuentes, contra las que se deben proteger los sistemas eléctricos, son el *corto circuito* y la *sobre carga*. El corto circuito puede tener su origen en distintas formas, por ejemplo: fallas de aislamiento, fallas mecánicas en el equipo, fallas en el equipo por sobrecargas excesivas y repetitivas, etc. Las sobrecargas se pueden presentar también por causas muy simples, como pueden ser instalaciones inapropiadas, operación incorrecta del equipo, por ejemplo, arranques frecuentes de motores, ventilación deficiente, períodos largos de arranque de motores.

En el diseño, se han desarrollado varias técnicas para minimizar los efectos de las anomalías que ocurren en el mismo, de tal forma que el sistema de protección sea capaz de:

- a) Aislar rápidamente la porción afectada del sistema eléctrico, de tal forma que se minimice el efecto y se mantenga el servicio tan normal como sea posible.
- b) Reducir tanto como sea posible el valor de la corriente de corto circuito para reducir los daños potenciales al equipo o partes de la instalación.
- c) Proveer al sistema eléctrico, siempre que sea posible, de medios de recierre automático, para minimizar la duración de fallas de tipo transitorio.

De acuerdo con lo anterior, la función de un sistema de

INTRODUCCIÓN

Las instalaciones eléctricas industriales son pequeños sistemas eléctricos de potencia, por lo que los análisis y estudios son semejantes, y tienen como diferencia los niveles de potencia, voltaje y corriente.

Los equipos de las instalaciones industriales, por su gran importancia, necesitan de un sistema de protección que garantice su seguridad, continuidad y confiabilidad de servicio, por tal razón, se utilizan sistemas que incluyan sensores y actuadores para poder lograr este objetivo.

Para diseñar un buen sistema de protección, es necesario que las protecciones estén bien dimensionadas tomando en cuenta que las instalaciones deben ser fáciles de operar, mantener y con facilidad de ampliación.

Los interruptores termomagnéticos y fusibles, utilizados comúnmente en las instalaciones industriales, no tienen el mismo grado de seguridad ni la diversidad de aplicaciones que tienen los relevadores. Los relevadores, además de poder actuar por alguna sobrecarga o por un corto circuito, pueden actuar por la ausencia de una fase, por el sobrecalentamiento de una máquina, por alto o bajo voltaje en el sistema, por alta o baja frecuencia, por la inversión de secuencias de fases, por fallas en aislamientos, por cortos circuitos internos, por potencia inversa, etc. Al mismo tiempo, los relevadores nos proporcionan una gran facilidad de ajustes en la coordinación de protecciones, ya sea con otros relevadores o con otros dispositivos de protección con los fusibles e interruptores termomagnéticos.

Para poder implementar sistemas de protección por relevadores, se deben tomar en cuenta varios factores que podrían indicarnos qué tipo de protección es la mejor dentro de los

aspectos técnicos y económicos; si deseamos proteger un transformador, por ejemplo, debemos tomar en cuenta su capacidad, su localización en el sistema, la tensión de operación, su conexión y operación de diseño.

En este trabajo de tesis, se dan a conocer los métodos más utilizados en la protección por relevadores en instalaciones eléctricas industriales, tomando en cuenta los factores antes mencionados para lograr así una eficiente y segura protección, y al mismo tiempo lograr que la protección seleccionada sea la óptima dentro del margen técnico y económico.

PERDIDA DE FASE: se da comúnmente en circuitos trifásicos, cuando una de las fases no es suministrada al motor por alguna falla, y queda éste alimentado únicamente por dos fases.

POTENCIA NOMINAL: es la potencia que un motor puede suministrar en su eje, para la cual fue construido.

PRUEBA DE ROTOR BLOQUEADO: consiste en bloquear o frenar, por algún medio, el rotor de un motor; seguidamente se procede a alimentarlo con una tensión reducida y tomar lecturas de la corriente que circula en el circuito. Esto da una idea del consumo de corriente del motor al momento del arranque.

RAPIDEZ: tiempo en que tarda una protección en operar. En condiciones de falla, mientras menor sea la duración de un disturbio, menor es su efecto, y en consecuencia, el daño de equipo.

SELECTIVIDAD: habilidad de un relevador para reconocer y decidir cuándo debe operar un interruptor y minimizar el efecto de la falla.

SENSIBILIDAD: habilidad de un relevador para detectar y sentir para que una protección opere cuando la corriente de falla es mínima.

TAP: son posiciones sobre una regleta en la parte superior del relevador, donde se puede conectar un pin para la selección de operación.

VELOCIDAD NOMINAL DE UN MOTOR: es la velocidad, para la cual, un motor debe proporcionar en su eje, la potencia nominal.

VELOCIDAD SÍNCRONA: es la velocidad a que gira el campo magnético rotativo inducido en el estator de un motor de corriente alterna.



INTRODUCCIÓN

Las instalaciones eléctricas industriales son pequeños sistemas eléctricos de potencia, por lo que los análisis y estudios son semejantes, y tienen como diferencia los niveles de potencia, voltaje y corriente.

Los equipos de las instalaciones industriales, por su gran importancia, necesitan de un sistema de protección que garantice su seguridad, continuidad y confiabilidad de servicio, por tal razón, se utilizan sistemas que incluyan sensores y actuadores para poder lograr este objetivo.

Para diseñar un buen sistema de protección, es necesario que las protecciones estén bien dimensionadas tomando en cuenta que las instalaciones deben ser fáciles de operar, mantener y con facilidad de ampliación.

Los interruptores termomagnéticos y fusibles, utilizados comúnmente en las instalaciones industriales, no tienen el mismo grado de seguridad ni la diversidad de aplicaciones que tienen los relevadores. Los relevadores, además de poder actuar por alguna sobrecarga o por un corto circuito, pueden actuar por la ausencia de una fase, por el sobrecalentamiento de una máquina, por alto o bajo voltaje en el sistema, por alta o baja frecuencia, por la inversión de secuencias de fases, por fallas en aislamientos, por cortos circuitos internos, por potencia inversa, etc. Al mismo tiempo, los relevadores nos proporcionan una gran facilidad de ajustes en la coordinación de protecciones, ya sea con otros relevadores o con otros dispositivos de protección con los fusibles e interruptores termomagnéticos.

Para poder implementar sistemas de protección por relevadores, se deben tomar en cuenta varios factores que podrían indicarnos qué tipo de protección es la mejor dentro de los

aspectos técnicos y económicos; si deseamos proteger un transformador, por ejemplo, debemos tomar en cuenta su capacidad, su localización en el sistema, la tensión de operación, su conexión y operación de diseño.

En este trabajo de tesis, se dan a conocer los métodos más utilizados en la protección por relevadores en instalaciones eléctricas industriales, tomando en cuenta los factores antes mencionados para lograr así una eficiente y segura protección, y al mismo tiempo lograr que la protección seleccionada sea la óptima dentro del margen técnico y económico.

CAPÍTULO I

CONCEPTOS BÁSICOS DE PROTECCIÓN EN INSTALACIONES ELÉCTRICAS INDUSTRIALES

1.1. ASPECTOS QUE SE DEBEN CONSIDERAR

Las instalaciones eléctricas industriales, por su tamaño y complejidad, son prácticamente pequeños sistemas eléctricos de potencia, y el uso de las técnicas de análisis usadas en éstos, pueden ser aplicables también en las instalaciones industriales. Para el análisis de los sistemas eléctricos, se utiliza un conjunto de técnicas que se basan en las leyes fundamentales de la electricidad aplicables a circuitos trifásicos de corriente alterna, principalmente.

Estas técnicas facilitan el cálculo del comportamiento de los sistemas bajo condiciones específicas, para auxiliar en el diseño de nuevos sistemas, para rediseñar los sistemas existentes, o bien, para hacer ajustes y modificaciones a partes de las instalaciones.

Los estudios principales de análisis en instalaciones industriales incluyen:

- a) Estudio y cálculo de corto circuito.
- b) Selección de dispositivos de protección.
- c) Coordinación de dispositivos de protección.
- d) Otros conceptos como arranque de motores, estudios de caída de voltaje y corrección de factores de potencia.

El principal objetivo de este tipo de estudio es proporcionar a los ingenieros y técnicos una fuente de información simple y relativamente económica para instalaciones industriales y

comerciales, de manera que se satisfagan los aspectos de

1. Seguridad y continuidad.
2. Confiabilidad de servicio.
3. Calidad en el suministro de la energía.
4. Diseño de instalaciones fáciles de operar y mantener.
5. Facilidad de ampliación, cuando sea necesario.
6. Costos iniciales y de operación mínimos.

1.2. CRITERIOS GENERALES DE PROTECCIÓN DE LOS SISTEMAS ELÉCTRICOS

Las condiciones de operación anormales más frecuentes, contra las que se deben proteger los sistemas eléctricos, son el *corto circuito* y la *sobre carga*. El corto circuito puede tener su origen en distintas formas, por ejemplo: fallas de aislamiento, fallas mecánicas en el equipo, fallas en el equipo por sobrecargas excesivas y repetitivas, etc. Las sobrecargas se pueden presentar también por causas muy simples, como pueden ser instalaciones inapropiadas, operación incorrecta del equipo, por ejemplo, arranques frecuentes de motores, ventilación deficiente, períodos largos de arranque de motores.

En el diseño, se han desarrollado varias técnicas para minimizar los efectos de las anomalías que ocurren en el mismo, de tal forma que el sistema de protección sea capaz de:

- a) Aislar rápidamente la porción afectada del sistema eléctrico, de tal forma que se minimice el efecto y se mantenga el servicio tan normal como sea posible.
- b) Reducir tanto como sea posible el valor de la corriente de corto circuito para reducir los daños potenciales al equipo o partes de la instalación.
- c) Proveer al sistema eléctrico, siempre que sea posible, de medios de recierre automático, para minimizar la duración de fallas de tipo transitorio.

De acuerdo con lo anterior, la función de un sistema de

protección, se puede definir como: "LA DETECCIÓN Y PRONTO AISLAMIENTO DE LA PORCIÓN AFECTADA DEL SISTEMA, YA SEA QUE OCURRA UN CORTO CIRCUITO O BIEN OTRA CONDICIÓN ANORMAL QUE PUEDA PRODUCIR DAÑO A LA PARTE AFECTADA O A LA CARGA QUE ALIMENTA".

La coordinación es la selección o ajuste, o ambas cosas, de los dispositivos de protección, para aislar la parte afectada del sistema cuando ocurre alguna anomalía. Este debe ser un aspecto que se debe considerar en cualquier sistema eléctrico bien diseñado.

La protección de los sistemas eléctricos es uno de los aspectos esenciales que deben ser considerados en el diseño y operación de las instalaciones eléctricas industriales.

1.3 EL EQUIPO BÁSICO DE PROTECCIÓN

Para proteger contra fallas, como un corto circuito o una sobrecarga, se requiere de la aplicación de equipo de protección que pueda cumplir con ambas funciones básicas (sensora y actuadora). En ambos casos, el elemento sensor y el dispositivo de interrupción son elementos completamente separados e interconectados sólo por los cables de control.

En otros casos, los sensores y los dispositivos de interrupción se encuentran en un mismo dispositivo.

Un fusible cumple con ambas funciones; es un elemento sensor y de interrupción; se conecta en serie con el circuito y responde a los efectos térmicos producidos por la circulación de corriente a través del mismo.

Los Interruptores son sólo dispositivos de interrupción que se deben usar necesariamente con elementos sensores (relevadores).

1.3.1. DISPOSITIVOS DE PROTECCIÓN CONTRA SOBRECORRIENTES

Los dispositivos, de protección contra sobrecorrientes, son los elementos que han sido contemplados para proteger los sistemas eléctricos de los daños por sobrecarga y corrientes de cortocircuito.

Por esta razón, es obvio que estos dispositivos representan una función extremadamente importante. Una definición de la protección contra sobrecorriente es la siguiente: "La protección contra sobrecorriente para conductores y equipos se proporciona con el propósito de interrumpir el circuito eléctrico, si la corriente alcanza un valor que pudiera causar una temperatura excesiva y peligrosa en el conductor".

De ahí que casi todo circuito eléctrico debe tener protección contra sobrecorriente en alguna forma.

Los dispositivos de protección contra sobrecorriente deben cumplir con los siguientes requerimientos generales:

- a) Ser completamente automáticos.
- b) Transportar la corriente nominal sin interrupción.
- c) Interrumpir inmediatamente las sobrecorrientes.
- d) Ser fácilmente reemplazables.
- e) Ser seguros tanto para condiciones normales como para cuando se presente una sobrecorriente. En otras palabras ser confiables.

Para reunir los requerimientos para la protección contra cortocircuito, deben cumplir totalmente con las siguientes especificaciones básicas:

1. Debe ser capaz de cerrar en forma segura sobre cualquier valor de corriente de carga.
2. Debe ser seguro para interrumpir cualquier corriente que pueda circular dentro del rango de interrupción del dispositivo.
3. Debe interrumpir automáticamente un flujo anormal de corriente dentro de su capacidad interruptiva.

Existen básicamente dos dispositivos fundamentales que se usan en forma común en las instalaciones industriales, para cumplir con la funciones de protección (para voltajes menores de 600 Voltios); éstos son:

- a) Los interruptores termomagnéticos (flip-ones).
- b) Los fusibles.

1.3.2. INTERRUPTORES PARA SISTEMAS CON VOLTAJES MAYORES DE 600V

Los interruptores para instalaciones con voltajes superiores a los 600 voltios se dividen en cuatro grupos básicos.

1. Interruptores en aire.
2. Interruptores en vacío.
3. Interruptores en aceite.
4. Interruptores en gas.

Todos estos interruptores operan en conjunto con los RELEVADORES de protección para llenar los requisitos para una operación automática.

Por lo general, no se suministran los sensores con los dispositivos de protección, pero deben estar incluidos para iniciar las operaciones de protección.

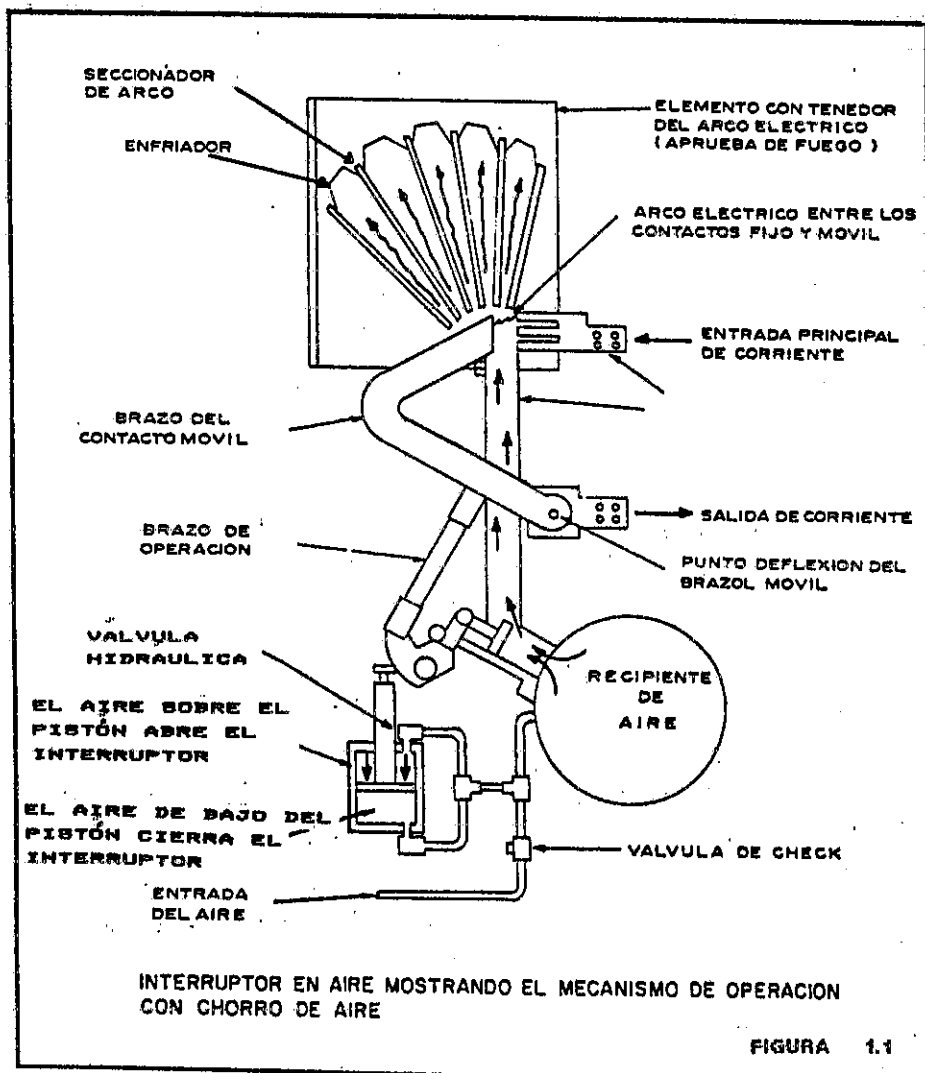
1.3.2.1. INTERRUPTORES EN AIRE

Los interruptores en aire tienden a ser usados en instalaciones en interiores, y como su nombre lo indica, interrumpen sólo con aire entre sus contactos. Este tipo de interruptores se puede usar en instalaciones exteriores, siempre que el mecanismo del interruptor, los controles, etc. se instalen en casetas o instalaciones sencillas a prueba de intemperie. Estos interruptores los fabrican para operar, por lo general, con voltajes en el rango de 2400 a 34500 voltios.

En la siguiente figura, se muestra la sección transversal del mecanismo de un interruptor en aire, y se muestra únicamente un polo del interruptor.

El Aire de una fuente de aire comprimido se usa, ya sea para abrir o para cerrar la navaja de los contactos móviles bajo carga eléctrica; un arco se iniciará entre la navaja móvil y los contactos fijos.

Para prevenir daño por calentamiento, se inyecta un chorro de aire justo en el momento en que el interruptor abre y se extingue el arco producido entre los contactos.



1.3.2.2. INTERRUPTOR EN VACÍO

Los mejores conductores de electricidad son aquellos materiales que ofrecen la mayoría de electrones libres, y por el contrario, los mejores aisladores o dieléctricos ofrecen el mínimo número de electrones libres. Debido a que el vacío constituye una ausencia de cualquier substancia y por lo tanto, una ausencia de electrones, en teoría, representa el mejor dieléctrico.

Basada en esta teoría, pueden haber grandes ventajas que se pueden aprovechar. Si operan mecánicamente los contactos eléctricos, quedarán dentro de una cámara de vacío.

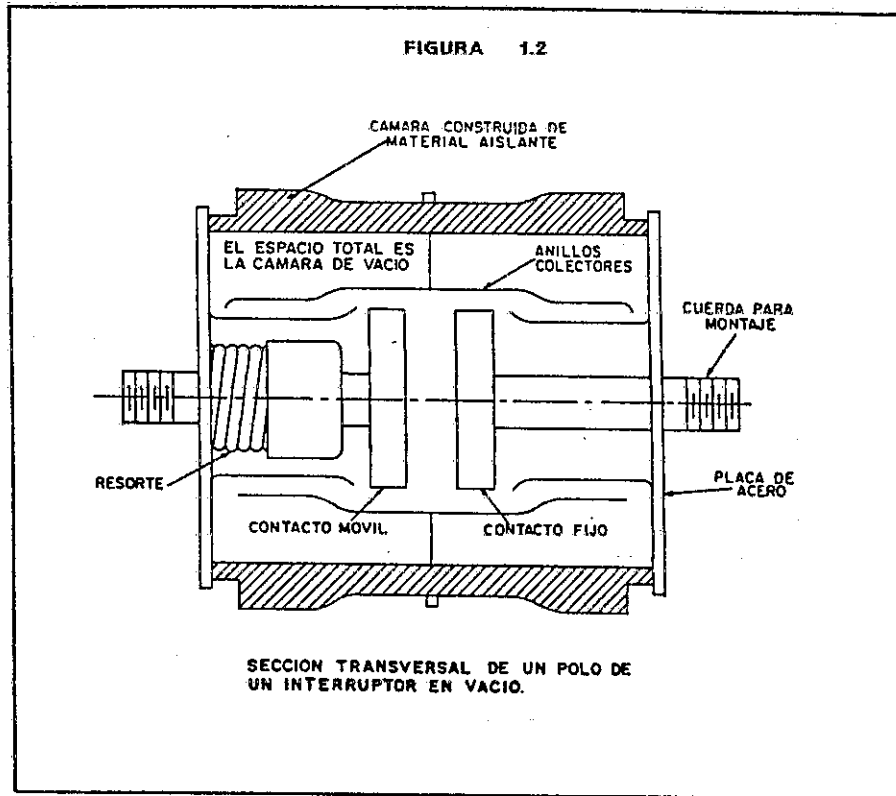
La mayoría de los fabricantes han sido capaces de construir tales dispositivos para su uso en alta tensión. Dentro de las ventajas que se tienen, se pueden mencionar las siguientes:

1. Son más rápidos para extinguir el arco eléctrico.
2. Producen menos ruido durante la operación.
3. El tiempo de vida de los contactos es mayor.
4. Se eliminan o se reducen sensiblemente los riesgos de explosiones potenciales por presencia de gases o líquidos

El mantenimiento de estos interruptores es reducido y se pueden usar en casi cualquier lugar, debido a que no son afectados por la temperatura ambiente ni por condiciones atmosféricas. En las figuras siguientes, se muestran las partes principales de un polo de un interruptor en vacío.

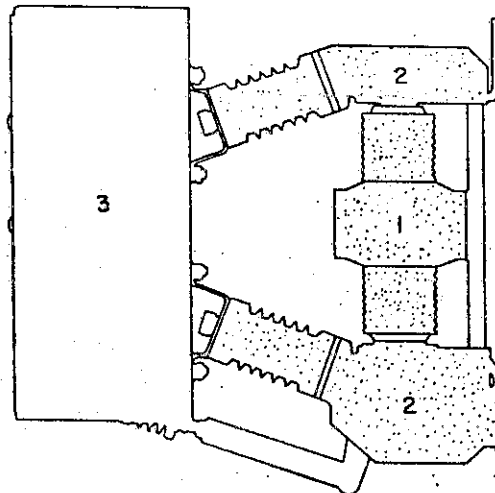
COMO SE PODRÁ OBSERVAR EN LA SIGUIENTE FIGURA, EL INTERRUPTOR ES SIMPLE EN CONSTRUCCIÓN, SE TIENEN DOS CONTACTOS TIPO DISCO, MOSTRADOS DENTRO DE UN CILINDRO CONTENEDOR. LA CÁMARA ES EVACUADA PARA PROPORCIONAR EL VACÍO. UN CONTACTO ES FIJO Y EL OTRO ESTA DISEÑADO PARA QUE SE ACERQUE O SE ALEJE DEL FIJO, SEGÚN SE CIERRE O SE ABRA. EL MOVIMIENTO SE CONTROLA POR MEDIO DE UNA BARRA DE ACERO QUE SE ACCIONA DESDE EL EXTERIOR. LA SEPARACIÓN ENTRE CONTACTOS ES DEL ORDEN DE 2.0 centímetros.

INTERRUPTOR EN vacío



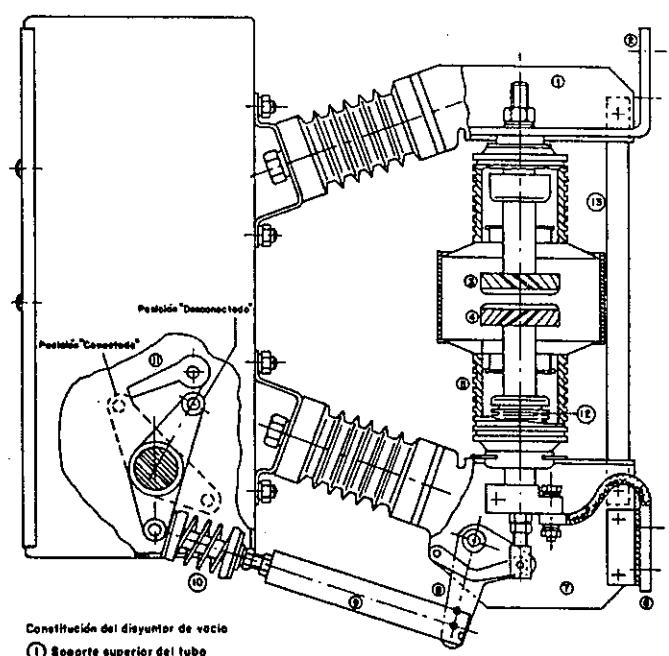
CONSTITUCION DE UN INTERRUPTOR DE VACIO

- 1- INTERRUPTOR DE VACIO
- 2- SOPORTE DEL TANQUE DE VACIO
- 3- ACCIONAMIENTO DE LA BIELLA DE MANIOBRA



INTERRUPTOR EN VACÍO

FIGURA 1.3
CORTE DE UN INTERRUPTOR EN VACÍO



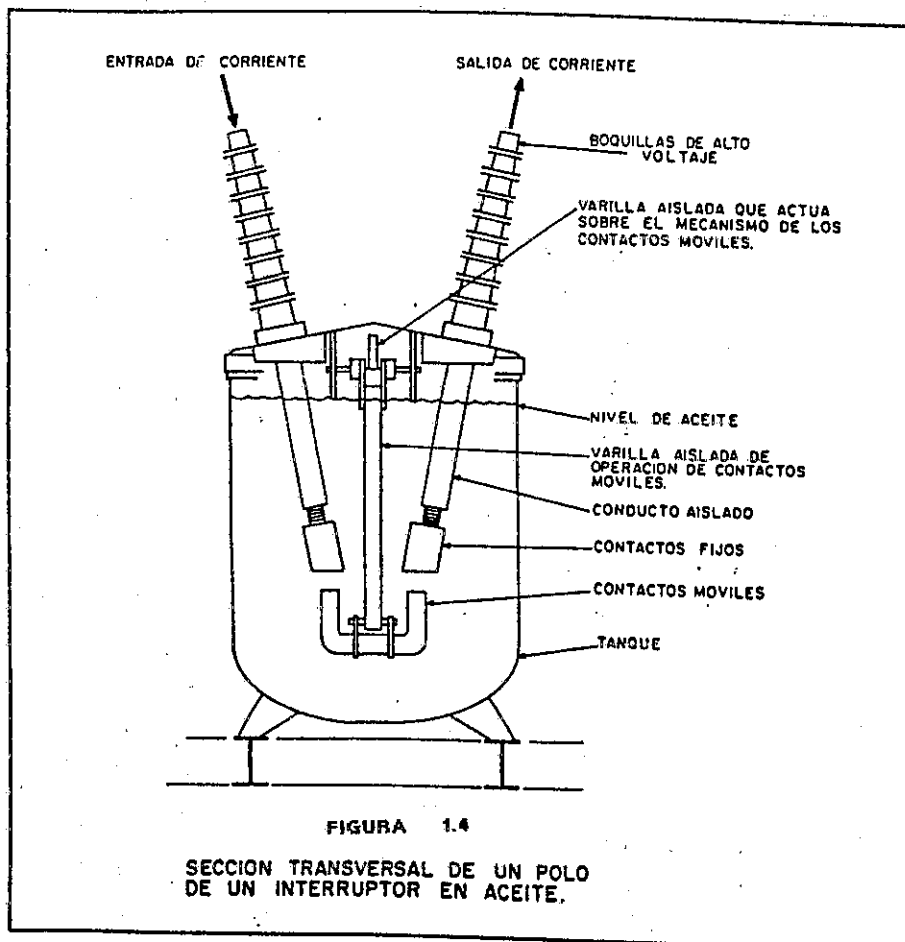
- Constitución del disyuntor de vacío
- ① Soporte superior del tubo
 - ② Plano superior de conexión
 - ③ Contacto fijo
 - ④ Contacto móvil
 - ⑤ Carcasa
 - ⑥ Plano inferior de conexión
 - ⑦ Soporte inferior de conexión
 - ⑧ Palanca angular
 - ⑨ Sello aislante de maniobra
 - ⑩ Muelle de presión de presión de contacto
 - ⑪ Gatillo de disparo
 - ⑫ Fuelle metálico
 - ⑬ Tirante

1.3.2.3 INTERRUPTORES EN ACEITE

Este tipo de interruptores fueron los de uso más extensivo en sistemas que operan a más de 13.8Kv., y se usan más en instalaciones tipo exterior, aun cuando también se puede usar en interiores. Este tipo de interruptores es básicamente un recipiente que contiene aceite, dentro del cual se instalan los contactos y el mecanismo de operación, de tal forma que el arco eléctrico que se forma se extingue por medio del aceite. Existen diferentes diseños desarrollados por los fabricantes para minimizar los efectos del arco eléctrico.

Estos interruptores se aplican por lo general dentro del rango de tensión de 2.4kv a 400kv. Para voltajes de 69Kv, los tres polos del interruptor se encuentran normalmente dentro del mismo tanque; en tensiones mayores se usa un tanque separado por cada polo.

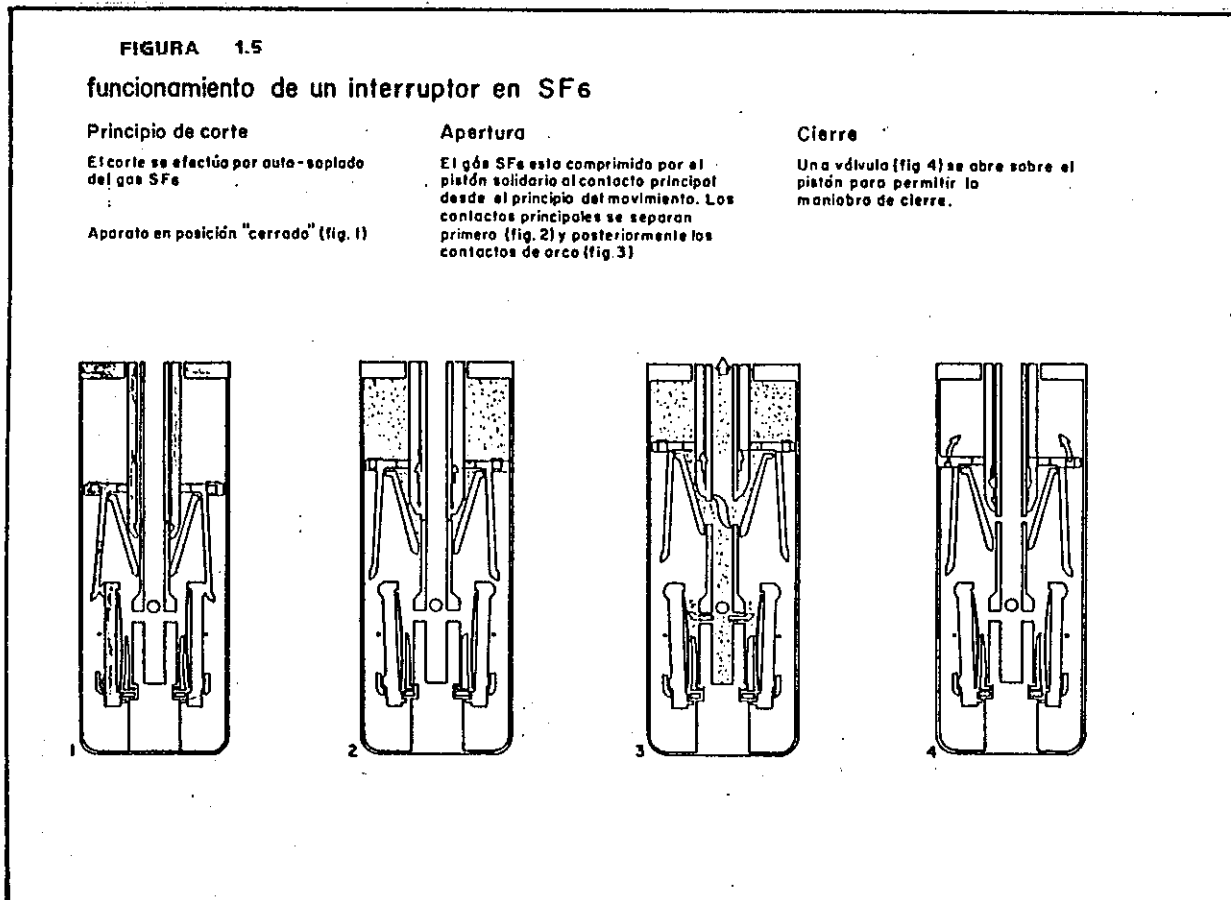
EN LA SIGUIENTE FIGURA, SE MUESTRAN EN UNA FORMA SIMPLIFICADA LOS PRINCIPALES ELEMENTOS QUE CONSTITUYEN ESTE TIPO DE INTERRUPTORES, EN DONDE SE PUEDE TENER VARIANTES EN LA FORMA DE LOS CONTACTOS MÓVILES, Y DEPENDEN DEL FABRICANTE.



1.3.2.4 INTERRUPTORES EN GAS

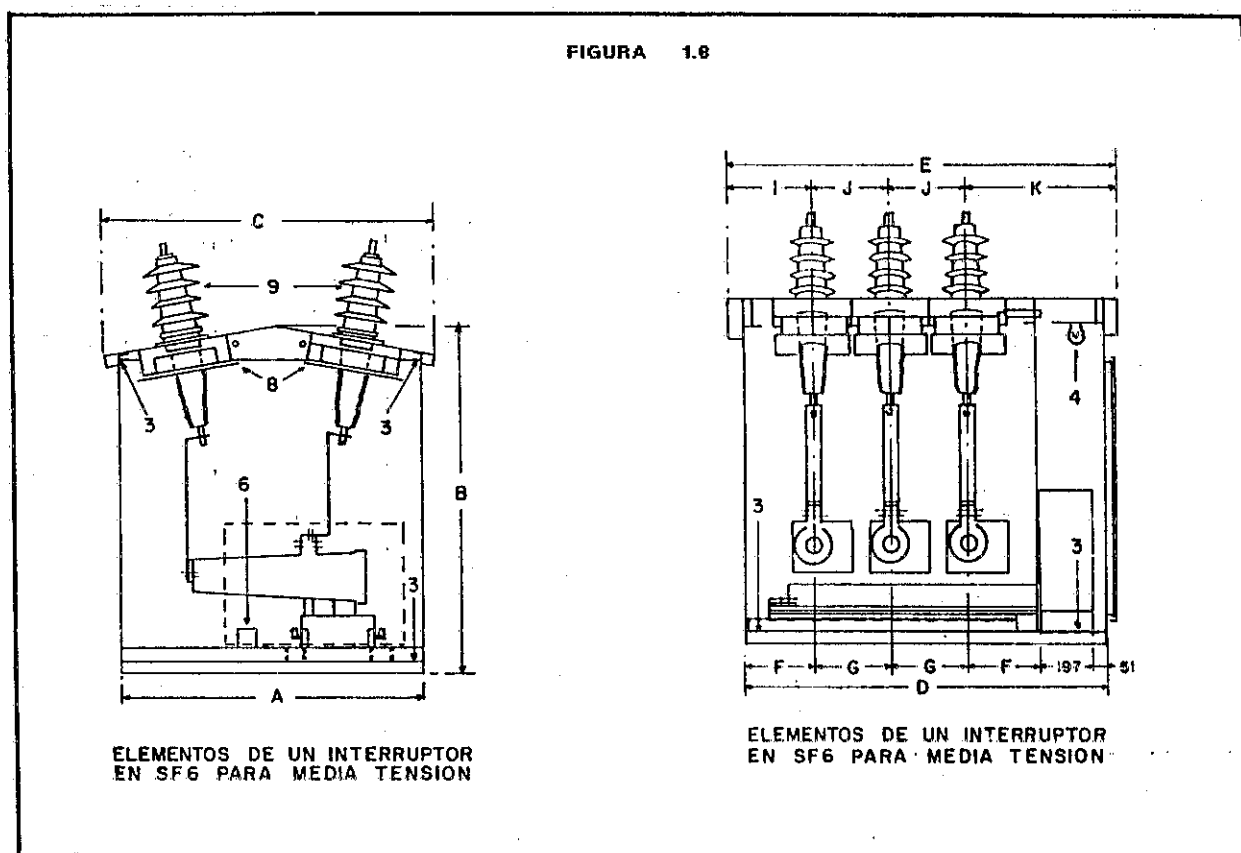
Los interruptores en gas (por lo general SF_6) se usan normalmente en alta tensión y extra alta tensión (hasta 765Kv.). Usan un gas inerte en el módulo de interrupción, los cuales representan las cámaras llenas de gas en donde tiene lugar la separación o el cierre de los contactos. Por cada polo, puede haber dos o tres módulos o secciones, que dependen del nivel de tensión. Estos módulos están conectados en serie.

Estos interruptores de gas son utilizados principalmente en las instalaciones de los sistemas eléctricos de potencia.



INTERRUPTOR EN SF₆

FIGURA 1.6



1.3.2.5. FUSIBLES PARA SISTEMAS ARRIBA DE 600V

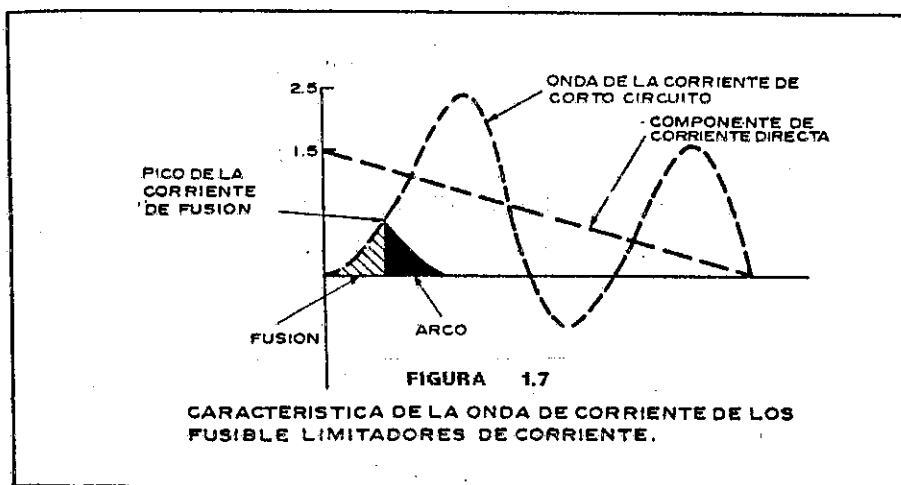
Existen muchos tipos de fusibles disponibles para circuitos con tensiones de 2200v o mayores. Estos se dividen principalmente en las siguientes categorías:

1. Fusibles de potencia limitadores de corriente.
2. Fusibles de potencia no limitadores de corriente.
3. Fusible tipo distribución para uso en corta circuitos.

1.3.2.5.1 FUSIBLES DE POTENCIA LIMITADORES DE CORRIENTE

Este tipo de fusibles está diseñado para fundirse antes de que la corriente de cortocircuito tenga tiempo de alcanzar su valor pico, por lo tanto, limitan la corriente a niveles seguros para el equipo y dispositivos que se van a proteger. usan una laminilla de plata que se conecta entre ambos extremos del fusible en el interior de un tubo aislante y rígido. La laminilla de plata es capaz de conducir la corriente de carga en forma normal, debido a que el calor que se produce es rápidamente absorbido, sin embargo, las corrientes anormales la funden instantáneamente.

En la siguiente figura, se muestra el comportamiento de los fusibles limitadores de corriente.



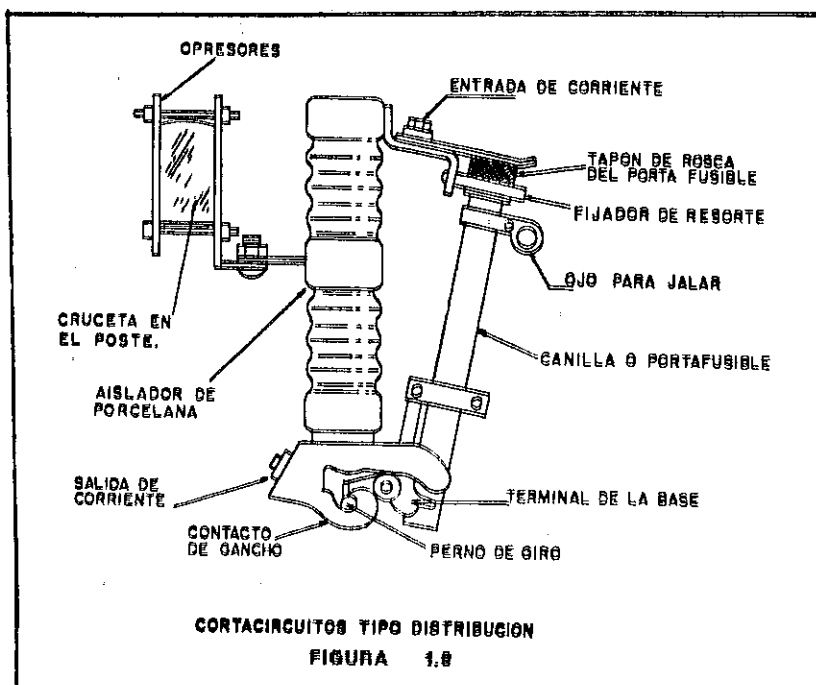
1.3.2.5.2. FUSIBLES DE POTENCIA NO LIMITADORES DE CORRIENTE

Los fusibles de potencia, no limitadores de corriente, son similares a los tipo cartucho, comúnmente usados en forma extensiva en los sistemas de 600 voltios o en menores; básicamente están contruidos de un tubo aislante con extremos atornillables y un eslabón fusible conectado entre los dos contactos en los extremos del tubo para formar la trayectoria o paso de corriente. Otros tienen el tubo relleno de ácido bórico, ya que los fabricantes han desarrollado varios tipos para diferentes voltajes, condiciones atmosféricas, etc. Algunos están hechos del tipo expulsión, lo que significa que expulsan gases calientes cuando operan. Estos fusibles, debido al riesgo de los gases calientes, no se usan en interiores.

1.3.2.5.3. FUSIBLES TIPO DISTRIBUCIÓN PARA USO EN CORTA CIRCUITO

Los fusibles tipo distribución para uso en corta circuito en redes de distribución aéreas se usan principalmente en las compañías eléctricas que distribuyen energía: Empresa Eléctrica de Guatemala, EEGSA y el Instituto Nacional de Electrificación, INDE. Su uso en instalaciones industriales está limitado, ya que son mas utilizados en instalaciones tipo exterior.

ESTOS FUSIBLES PARA CORTA CIRCUITOS ESTÁN HECHOS DE DISTINTAS MANERAS. LA MAYORÍA EMPLEA UN AISLADOR DE PORCELANA QUE SOPORTA AL CARTUCHO QUE CONTIENE AL ELEMENTO FUSIBLE.



1.3.3. DISPOSITIVOS DE PROTECCIÓN PARA INSTALACIONES EN BAJA TENSIÓN

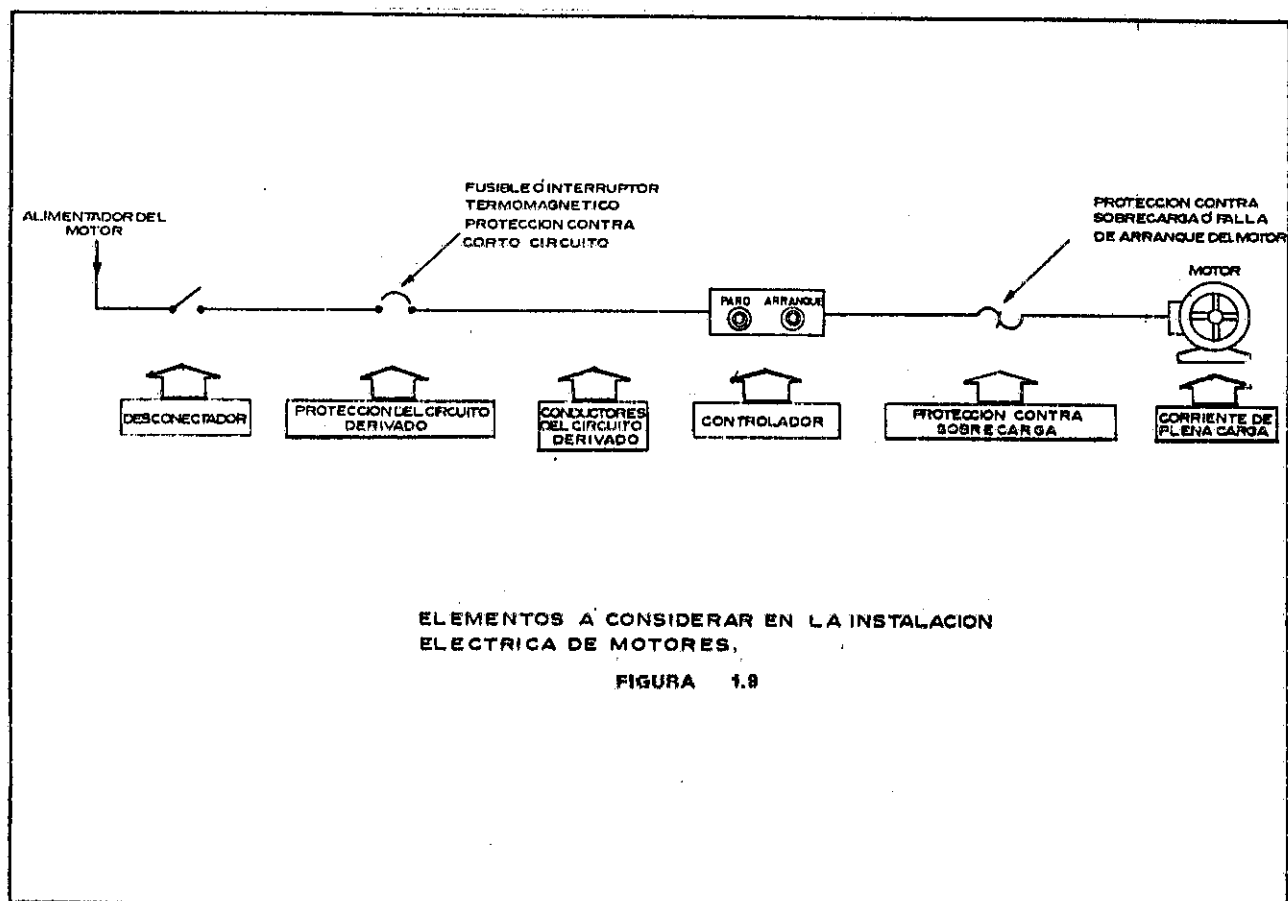
Para las instalaciones en baja tensión, hay básicamente tres dispositivos principales y tradicionales de protección contra corto circuito.

1. Interruptores termomagnéticos (flipo-nes)
2. Fusibles.
3. Combinación de interruptores y fusibles.

Los interruptores termomagnéticos al mismo tiempo se pueden dividir en dos grupos básicos.

- a. Interruptor en aire.
- b. Interruptor en caja moldeada.

La aplicación de estos dispositivos de protección en baja tensión, está orientada principalmente hacia los motores eléctricos, en donde no sólo se trata de la protección de los motores, sino también de los conductores, ya sea del alimentador principal o de los circuitos derivados. En la gráfica siguiente, se muestran los elementos que se deben considerar en la instalación eléctrica de motores.



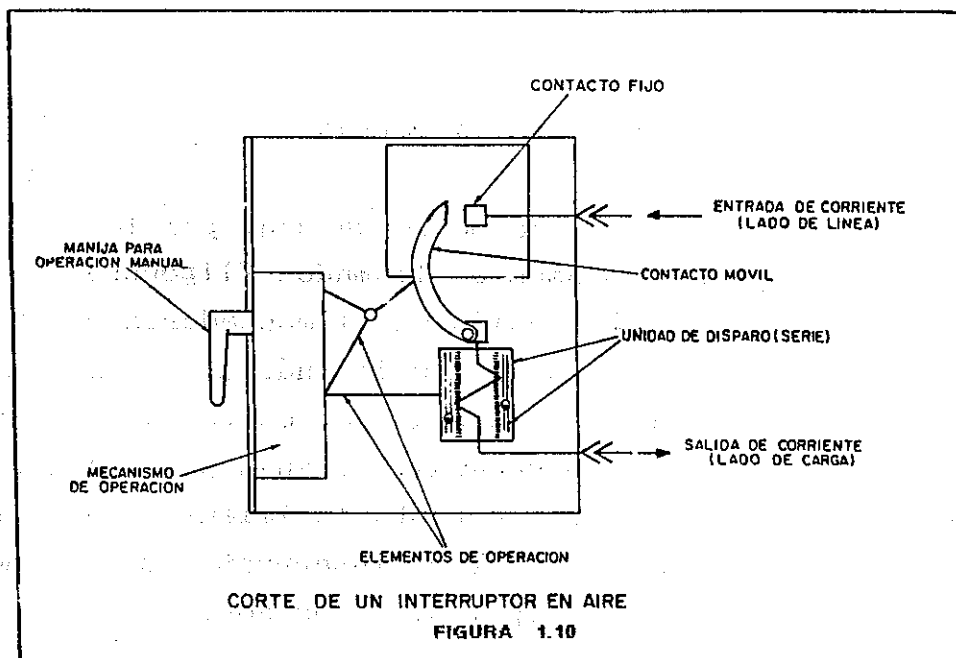
1.3.3.1 INTERRUPTORES en el caso de interruptores de corriente (3) en el caso de interruptores de corriente (3) en el caso de interruptores de corriente (3)

1.3.3.1.1 INTERRUPTORES DE AIRE en el caso de interruptores de corriente (3) en el caso de interruptores de corriente (3) en el caso de interruptores de corriente (3)

Los interruptores en aire se usan generalmente como protección de los alimentadores principales. Estos interruptores generalmente consisten de un mecanismo de operación, contactos, interruptores o extintores de arco y un dispositivo de disparo que se conecta en serie con el conductor del lado de la carga; estos interruptores se caracterizan por su construcción compacta y se encuentran disponibles para valores de corriente de carga elevados y distintas capacidades interruptivas.

Al elemento de disparo conectado en serie, se le conoce comúnmente como **ELEMENTO TÉRMICO** y se puede adquirir con distintas características: retraso de larga duración y retraso de corta duración, así como disparo instantáneo. En la figura siguiente, se muestra un diagrama esquemático de este tipo de interruptor.

En la figura siguiente, se muestra un diagrama esquemático de este tipo de interruptor.



El mecanismo de operación de estos interruptores puede tomar distintas formas: si el interruptor sólo se opera manualmente, entonces la manija se usa para abrir o cerrar el contacto del interruptor; esto se acompaña, por lo general, con un dispositivo a base de resorte, de manera que la acción de cierre y apertura sea rápida. Si el interruptor es operado electricamente, el mecanismo puede consistir de una bobina magnética con un eje o elemento actuador, de manera que el conjunto se mueva jalando hacia el centro de la bobina, para que cuando la bobina esté energizada, el émbolo hale hacia el centro de la bobina, y cierre la bobina y el interruptor. A este dispositivo se le conoce como **SOLENOIDE OPERADOR**.

Otros mecanismos de operación utilizan el principio de "ALMACENAMIENTO DE ENERGÍA" mediante el cual un motor eléctrico actúa sobre un resorte durante los ciclos de cierre y disparo. La energía es almacenada con en el resorte y posteriormente liberada, ya sea para cerrar o disparar el interruptor.

El dispositivo de sobrecorriente, en serie, dispara el interruptor por medio de una acción mecánica directa que responde a la fuerza magnética creada por la corriente en el circuito. Casi todos estos dispositivos son ajustables sobre una escala que indica la corriente en la bobina.

1.3.3.1.2. INTERRUPTORES EN CAJA MOLDEADA

Los interruptores en caja moldeada son, por lo general, del tipo **TERMO-MAGNETICOS** (comúnmente llamados flipones), y se usan frecuentemente para la protección de alimentadores secundarios y circuitos derivados. Como su nombre lo indica, el mecanismo del interruptor se encuentra encerrado o contenido en una caja moldeada y aislada; por lo general, tienen una alta capacidad interruptiva con elementos de restablecimiento para permitir operaciones repetitivas. Estos interruptores tienen tres componentes funcionales principales. Estos son:

- 1) Elementos de disparo.
- 2) El mecanismo de operación.

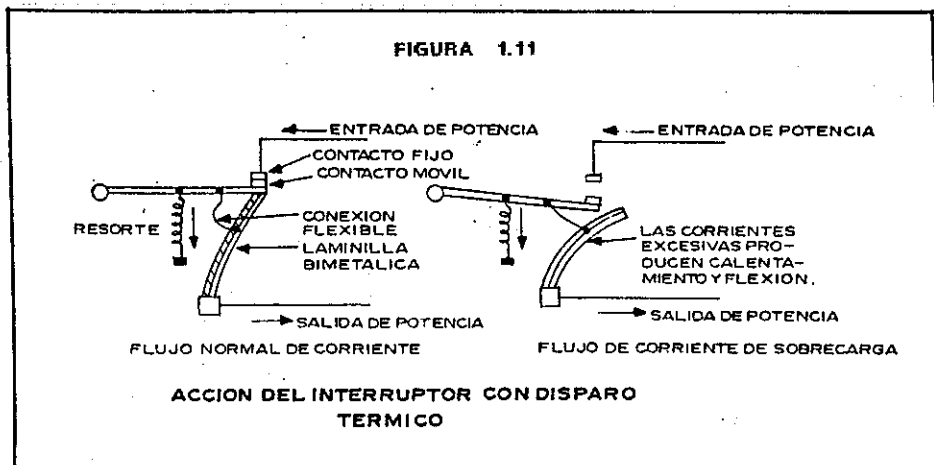
3) Los extinguidores de arco

Los ajustes de disparo se hacen, por lo general, en fábricas y por lo tanto; no se pueden cambiar después de ser instalados, aun cuando algunos interruptores son ajustables y pueden ser modificados después de que sean instalados. Los elementos de disparo varían en sus características, pero su función es accionar para disparar el mecanismo de operación, en el caso de una sobrecarga prolongada, o un corto circuito. Estos interruptores se pueden construir en la modalidad de multipolos, de manera que la acción de disparo sobre un polo se ejercerá sobre los otros.

ACCIÓN DE DISPARO TÉRMICO

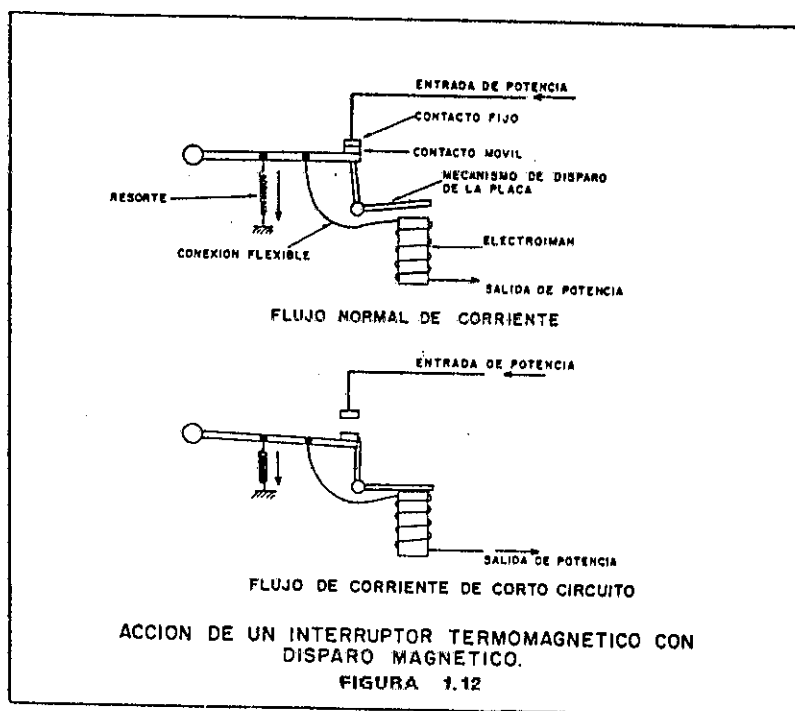
Se logra a través del uso de una cinta o laminilla bimetálica que se calienta por la acción de la circulación de la corriente. La laminilla está hecha de dos metales diferentes, unidos entre sí. La longitud de esta cinta se incrementa con una elevación en la temperatura, causada por el exceso de corriente. Debido a que los dos metales que forman la unión, son de distinto material, no incrementan su longitud igual. La laminilla se doblará hasta que produce la operación de mecanismo para abrir los contactos del interruptor. Debido a que el elemento bimetálico responde al calor emitido por el flujo de corriente, permite un cierto retardo de tiempo, antes de que se produzca el disparo, o bien tienda a responder a sobrecargas ligeras.

EN LA SIGUIENTE FIGURA, SE MUESTRA EL PRINCIPIO DE OPERACIÓN DE ESTE INTERRUPTOR.



ACCIÓN DE DISPARO MAGNETICO

Se logra a través del uso de un electroimán, conectado en serie, con la corriente de carga. Esto proporciona una acción de disparo instantánea, cuando la corriente alcanza un valor predeterminado. En la figura siguiente, se muestra el principio de operación de este tipo de interruptor. Obsérvese que el flujo de corriente pasa a través de la bobina del imán, de manera que la capacidad de corriente del interruptor, está determinada por el número de espiras y el calibre del alambre de la bobina.

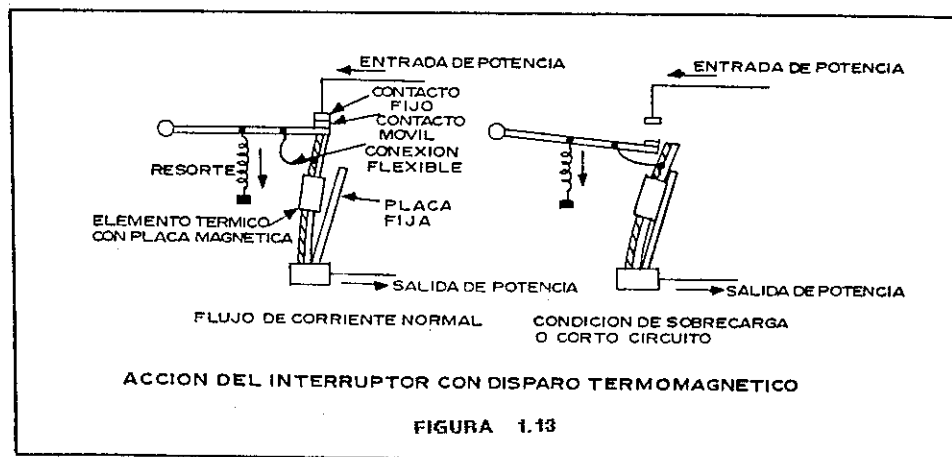


ACCIÓN DE DISPARO TERMOMAGNETICO

Esta es de propósito general y se logra por medio de dispositivos que se encuentran disponibles en la mayoría de las aplicaciones de los interruptores y, por lo tanto, forman una parte estándar de los interruptores. La combinación de los elementos de disparo térmico y magnético proporciona una protección muy precisa contra sobrecarga y corto circuito, para conductores y aparatos.

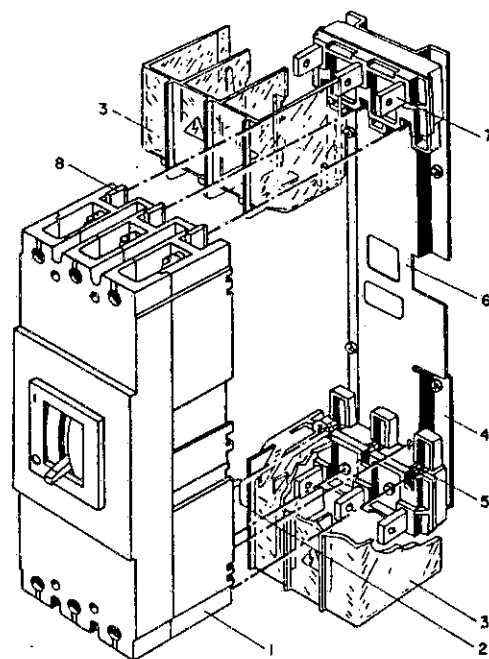
Un interruptor termomagnético (flip-on) reacciona a las sobrecargas en forma muy similar a la de un interruptor térmico, por medio de la acción de una laminilla bimetálica.

Con sobrecargas severas o en especial con corto circuito, la acción magnética es más rápida que la acción térmica y dispara instantáneamente al interruptor. El principio de operación elemental se muestra en la siguiente ilustración.



Con corrientes de corto circuito severas, el elemento de la placa magnética produce tanta fuerza, que el retorno opera rápidamente. Por lo general, su capacidad continua se encuentra entre 15 y 2500 amperios y hasta 65000 amperios, que es el valor eficaz de capacidad de corto circuito.

Estos flipones se encuentran en el mercado en diferentes marcas para uno, dos o tres polos, tanto para interiores como para exteriores.



1. Interruptor de potencia enchufable
2. Espiga para disparar el interruptor
3. Coberteras (protecciones de barras contra contactos accidentales, se colocan cuando se saca el interruptor)
4. Zócalo
5. Contactos receptores para las barras de enchufe
6. Sitio para colocar hasta tres candados
7. Barras de conexión

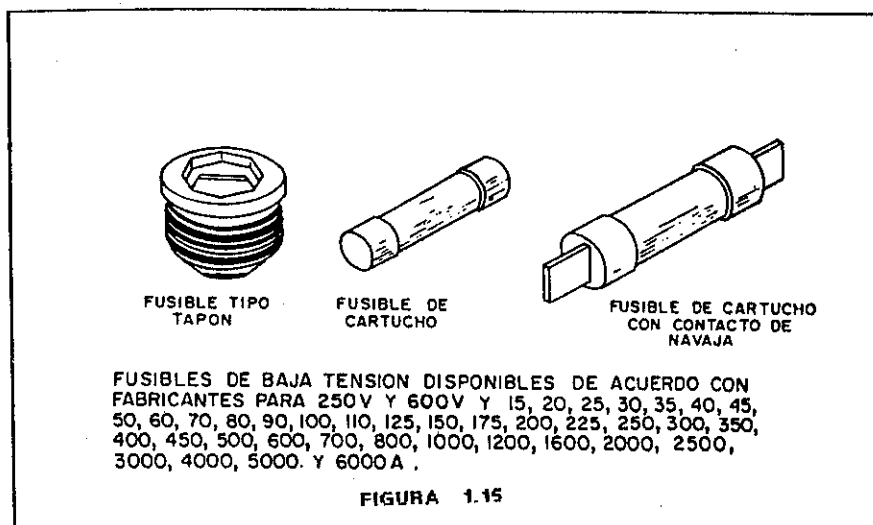
FIGURA 1.14

1.3.3.2. FUSIBLES

Un fusible es un dispositivo de protección contra sobrecorriente, con un miembro que se funde y abre un circuito, que es directamente calentado por el paso de una sobrecorriente a través del mismo.

Los fusibles son simples en construcción, compactos y relativamente baratos. Todos los fusibles modernos están hechos de tal forma, que el elemento fusible se encuentra completamente encerrado. Los elementos que los contienen tienen diferentes formas, y dependen del tamaño y de la capacidad del fusible.

En la siguiente figura, se muestran algunos de estos tipos.



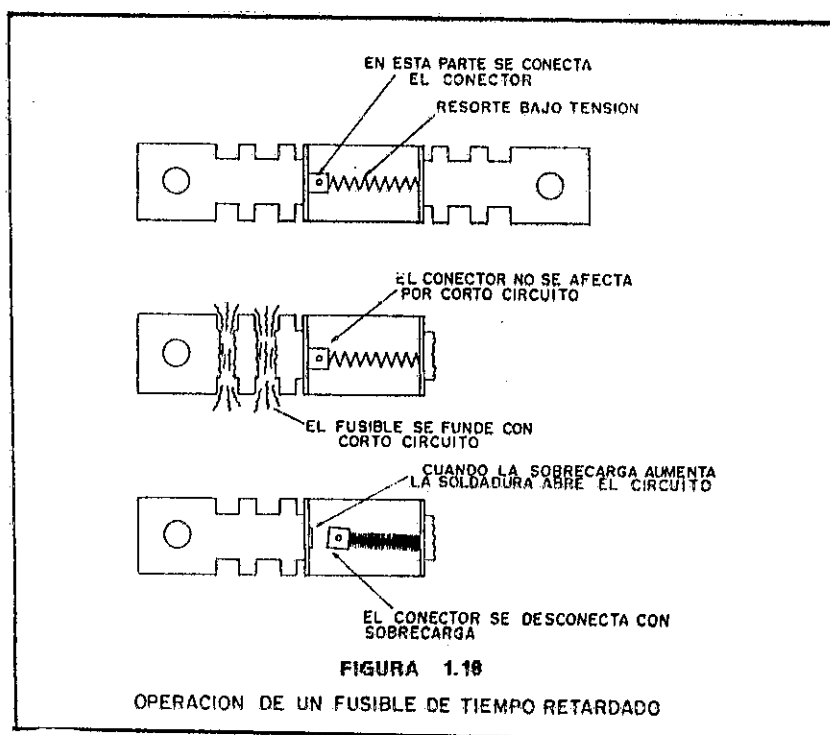
Los fusibles tipo **TAPÓN** se fabrican en tamaños hasta de 30 amperios, y se usan en circuitos que no excedan de 127V. El elemento de conexión se fabrica para corriente nominal de 35 a 60 amperios. El diámetro y longitud del contenedor del elemento fusible varía con la clase de voltaje.

En los fusibles tipo **CARTUCHO**, el contacto puede ser de navajas o cilíndrico y se fabrican para capacidades de 70 a 6000 amperios. Estos también varían en sus dimensiones físicas, según su tensión nominal.

Normalmente las capacidades de corriente de los fusibles están normalizadas y son publicadas por los distintos fabricantes en sus catálogos; los fusibles tipo cartucho se pueden fabricar en el tipo desechable, o bien, el tipo renovable.

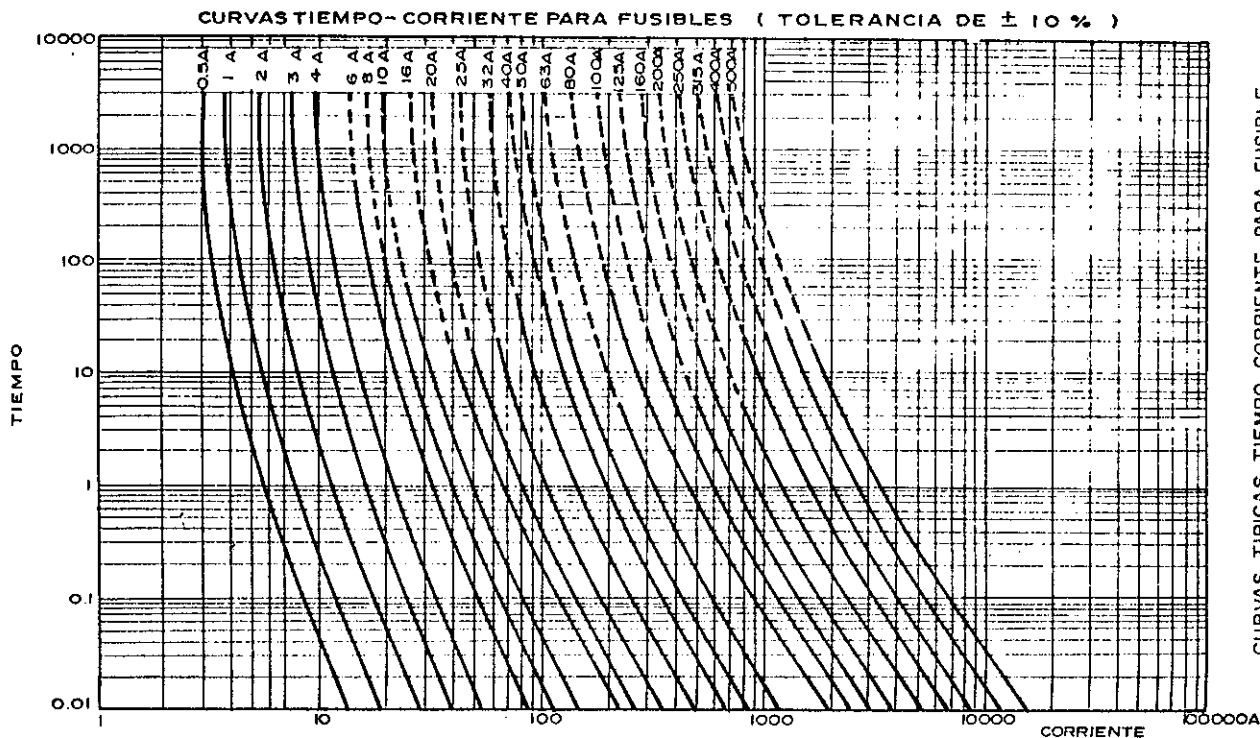
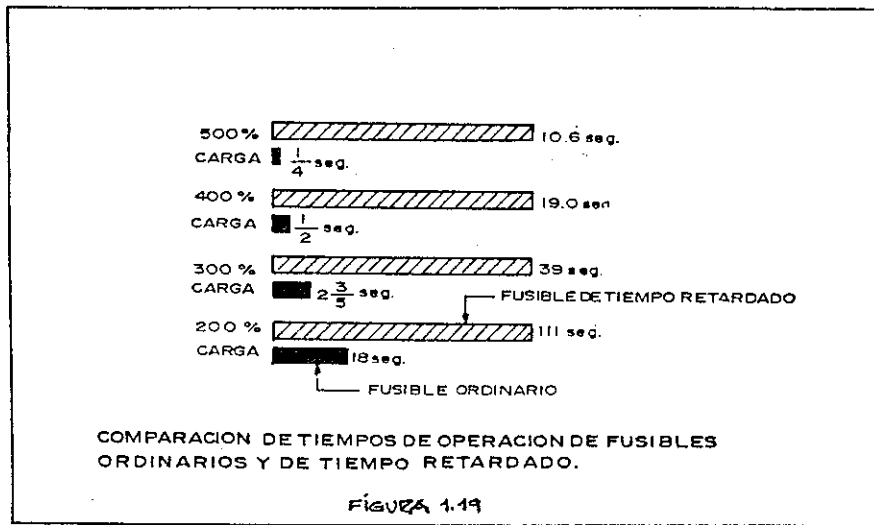
Las capacidades comerciales más comunes para el rango de 220V. hasta 600V, son: 15, 20, 25, 30, 35, 40, 45, 50, 60, 70, 80, 90, 100, 110, 125, 150, 175, 200, 225, 250, 300, 350, 400, 450, 500, 600, 700, 800, 1000, 1200, 1600, 2000, 2500, 30000, 4000, 5000 Amperios.

En algunas aplicaciones de fusibles, se usan los llamados de TIEMPO DE RETARDO; de hecho, todos los fusibles tiene un retraso inherente, pero los de tiempo retardado están diseñados en forma explícita para esto; estos fusibles están contruidos de tal forma que se funden instantáneamente en condiciones de corto circuito, pero con sobrecargas tales, como corrientes de inserción en el arranque de motores (para prevenir disparos innecesarios). Estos fusibles tienen láminas con elementos compuestos; una parte proporciona operación rápida en el rango de las corrientes de corto circuito, y la otra proporciona el retardo de tiempo en el rango de la mayoría de las sobrecorrientes. LA CONSTRUCCIÓN DE ESTOS FUSIBLES SE MUESTRA EN LA SIGUIENTE FIGURA. EN CORTO CIRCUITO, SE FUNDE EN LA MISMA FORMA QUE OTROS TIPOS, PERO ESTE ELEMENTO FUSIBLE, CON SOBRE CARGA, PERMANECE INACTIVO.



El calor que se produce por una sobrecarga, se alimenta al centro de la masa del disco de cobre, sobre el cual está montado el conector y el resorte. El conector y el resorte conectan las dos piezas eléctricamente, de manera que cuando la temperatura se incrementa por la sobrecarga hasta llegar al punto de fusión de la soldadura, el conector queda fuera de su lugar por el resorte.

Una comparación de los fusibles de operación con retardo con respecto a los fusibles ordinarios o normales, se muestran a continuación.





CAPITULO II

ESTUDIO DE CORTO CIRCUITOS EN LAS INSTALACIONES INDUSTRIALES

1.1 GENERALIDADES

El cálculo de las corrientes de corto circuito es esencial para la selección de la capacidad adecuada del equipo de protección y los dispositivos de interrupción. En los estudios de protección, es básico también para la coordinación de protecciones. Los procedimientos de cálculo de corto circuito son generales, ya que por un lado el fenómeno es el mismo, y por el otro, la metodología no difiere en forma importante entre un sistema eléctrico de potencia clásico y un sistema de potencia de tipo industrial.

La persona que diseña o hace cálculos para ajustes de protecciones en las instalaciones eléctricas, o bien selecciona o verifica las características del equipo de interrupción, tiene la necesidad de hacer cálculos de corto circuito.

2.2. CONCEPTOS BÁSICOS DEL ESTUDIO DE CORTO CIRCUITOS

Las instalaciones eléctricas en la industria, centros comerciales y en los grandes edificios, se diseñan para alimentar las cargas en una forma segura y confiable. Uno de los aspectos a los que se les pone mayor atención en el diseño de los sistemas de potencia, es el control adecuado de los cortos circuitos, o bien a las fallas (como se conoce comúnmente), ya que éstas pueden producir interrupciones del suministro eléctrico, con la consecuente pérdida de tiempo y dinero.

Aun con todas las precauciones y medidas tomadas, las fallas ocurren; algunas de las causas principales son las siguientes:

- 1) Sobretensiones de origen atmosféricos.
- 2) Envejecimiento prematuro de los aislamientos.
- 3) Falsos contactos.
- 4) Acumulación de polvo
- 5) Presencia de elementos corrosivos, humedad.
- 6) Presencia de roedores.
- 7) Errores humanos.

Cuando ocurre un corto circuito, se presentan situaciones no convenientes que se manifiestan en distintos fenómenos:

- 1) En el punto de la falla, se puede presentar un fenómeno de arco eléctrico o fusión de los metales mismos.
- 2) Las corrientes de corto circuito circulan desde las fuentes (alimentación de red y máquinas síncronas) hacia el punto de falla.
- 3) Todas las componentes de la instalación, por donde circulan las corrientes de corto circuito, se ven sujetas a esfuerzos térmicos y mecánicos. Estos esfuerzos varían con el cuadrado de la corriente (I^2) y de la duración de la corriente.
- 4) Las caídas de voltaje, en el sistema, están en proporción a la magnitud de las corrientes de corto circuito. La caída de voltaje máxima se presenta en el punto de ocurrencia de la falla. (Es prácticamente cero para el valor máximo de falla).

El máximo valor de la corriente de corto circuito está directamente relacionado con el tamaño y capacidad de la fuente de potencia y es independiente de la corriente de carga del circuito protegido por el dispositivo de protección.

Cuanto mayor es la capacidad de la fuente de potencia, mayor es la corriente de corto circuito.

2.2.1. FUENTES DE CORTO CIRCUITO

Cuando se hace un estudio para determinar la magnitud de las corrientes de corto circuito, es muy importante que se consideren todas las fuentes de corto circuito y que las características de las impedancia de estas fuentes sean conocidas. las fuentes de corto circuito son principalmente las siguientes:

2.2.1.1. GENERADORES

Como es sabido, los generadores eléctricos están accionados por turbinas o primotores, de modo que cuando ocurre un corto circuito en el circuito alimentado por el generador, éste tiende a seguir produciendo voltaje debido a que la excitación del campo se mantiene y el primotor continúa accionando al generador a la velocidad normal. El voltaje generado produce una corriente de corto circuito de gran magnitud que circula del generador (o generadores) al punto del corto circuito. El valor de esta corriente se encuentra limitada sólo por la impedancia del generador y la del circuito entre el generador y el punto de la falla. Si se trata de un corto circuito en las terminales del generador, la corriente sólo está limitada por la propia impedancia de éste.

2.2.1.2. MOTORES SINCRONOS

Los motores síncronos se construyen en forma muy parecida a los generadores, es decir: tienen un devanado de campo excitado por corriente directa y un devanado del estator por el cual circula la corriente alterna; el motor síncrono demanda corriente alterna del sistema y la transforma en energía mecánica.

Cuando se presenta el corto circuito en el sistema, el voltaje en éste se reduce a un valor muy bajo. En consecuencia, el motor suspende la entrega de energía a la carga mecánica, e inicia su frenado lentamente. Sin embargo, justo como el primotor acciona al generador, la inercia de la carga y el rotor

del motor accionan al motor síncrono. Entonces el motor síncrono se convierte en generador y entrega la corriente de corto circuito por varios ciclos después de que el corto circuito ha ocurrido. El valor de la corriente de corto circuito producida por el motor depende de la impedancia del mismo y de la del sistema al punto de corto circuito.

2.2.1.3. MOTORES DE INDUCCIÓN

La inercia de la carga y el rotor de un motor de inducción, tiene el mismo efecto sobre un motor síncrono, que sobre un motor de inducción, es decir, acciona el motor después de que ocurre el corto circuito en el sistema. Existe, sin embargo, una diferencia importante. El motor de inducción no tiene devanado de excitación en corriente continua, pero existe un flujo magnético en el motor de inducción durante la operación normal. Este flujo actúa como el producido por el devanado de campo en corriente continua en el motor síncrono.

El campo del motor de inducción, es producido por la inducción del estator.

El flujo del rotor permanece normal en la medida que el voltaje es aplicado al estator por la fuente externa. Sin embargo, si la fuente externa de voltaje fuera removida, como ocurre cuando se presenta un corto circuito en el sistema, el flujo en el rotor no puede decaer instantáneamente. Debido a que el flujo en el rotor no puede decaer en forma instantánea y porque la inercia de las partes rotatorias accionan al motor de inducción, se genera un voltaje en el devanado del estator; esto hace que una corriente de corto circuito circule hacia la falla, hasta que el flujo del rotor decae a cero. La corriente de corto circuito desaparece casi por completo aproximadamente después de cuatro ciclos, debido a que no hay una corriente de campo sostenida en el rotor para proporcionar un flujo, como en el caso de la máquina síncrona.

El flujo no es suficiente como para mantener la corriente de corto circuito por mucho tiempo, de modo que afecta sólo momentáneamente el comportamiento del interruptor y la capacidad de interrupción en dispositivos que interrumpen en alrededor de dos ciclos, de ahí que la inclusión de los motores de inducción en estudios de corto circuito se deben hacer en ciertos casos.

La magnitud de la corriente de corto circuito producida por un motor de inducción, depende de la impedancia del propio motor y de la impedancia del sistema en el punto de ocurrencia de la falla. La impedancia de la máquina efectiva en el momento del corto circuito, corresponde aproximadamente a la impedancia a rotor bloqueado. Consecuentemente, el valor inicial de la corriente de corto circuito es aproximadamente igual al valor de la corriente de arranque a rotor bloqueado del motor.

2.2.1.4. ALIMENTACIÓN O COMPAÑÍA SUMINISTRADORA

La alimentación a las industrias o comercios se hace por lo general de una fuente externa que proporciona la compañía suministradora de energía; esto se hace en alta tensión y pasa a través del transformador de la subestación. La compañía suministradora en el punto de conexión a la industria representa un equivalente de Thevenin de toda la red que se encuentra detrás, por lo que es en realidad una fuente importante de contribución de la corriente de corto circuito. El valor total de la corriente de corto circuito, en un punto de la red, es la suma de las contribuciones de cada uno de los elementos con la intensidad y duración de cada caso.

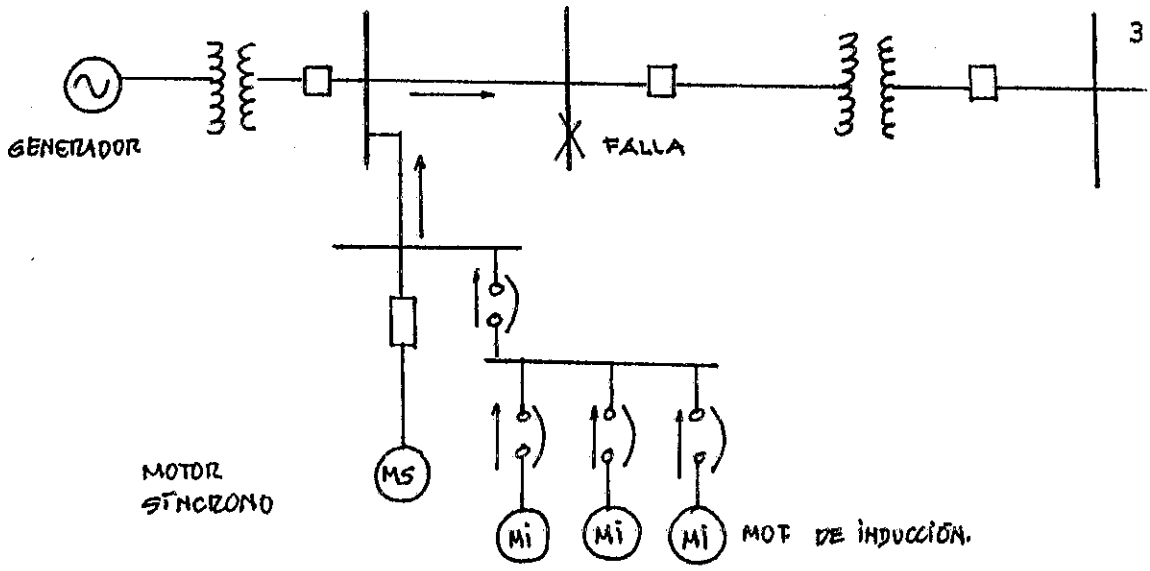
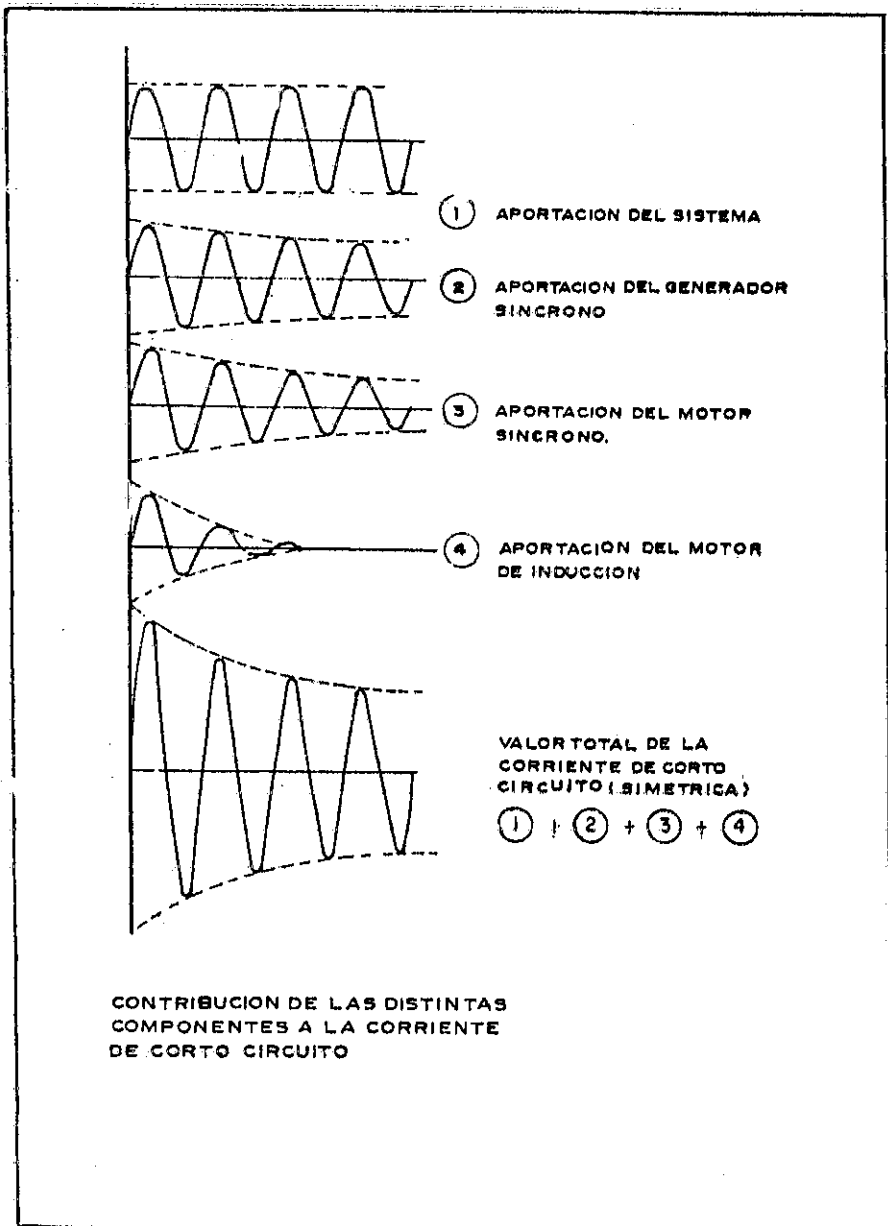


FIGURA 2.1

CONTRIBUCIÓN DE LAS DISTINTAS CORRIENTES DE CORTO CIRCUITO

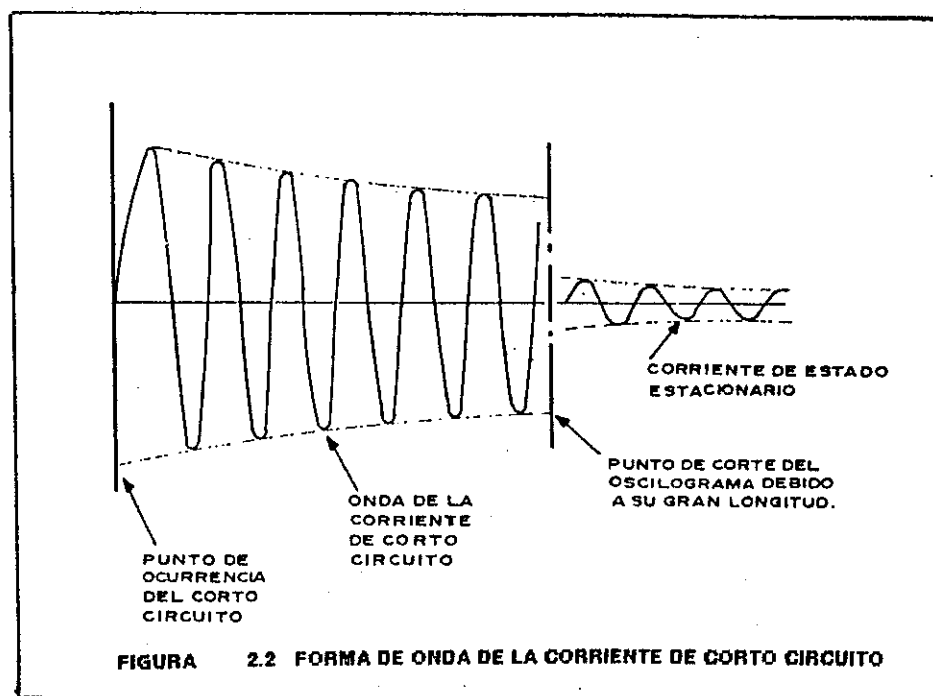


2.2.2. LAS REACTANCIAS DE LAS MÁQUINAS ROTATORIAS

La impedancia de una máquina rotatoria consiste, en principio, de una reactancia que no es un valor simple como es el caso de la impedancia de los transformadores o de los cables, ya que para las máquinas es un valor complejo y variable con el tiempo.

Si ocurre un corto circuito trifásico en las terminales de un generador, se observa, con la ayuda de un osciloscopio, que la corriente de corto circuito se inicia con un valor alto y decae a un valor de estado estacionario, después de algún tiempo que se ha iniciado el corto circuito. Se puede usar la reactancia de las máquinas para explicar el comportamiento de la corriente de corto circuito.

Las expresiones para analizar la variación de las REACTANCIAS en cualquier instante, requieren de una formulación complicada que involucran al tiempo como una de las variables. Por lo tanto, con el propósito de simplificar, se consideran tres valores de REACTANCIAS para generadores y motores en el cálculo de corto circuito en tiempos específicos. Estos valores se conocen como: la reactancia subtransitoria (X''_d), la reactancia transitoria (X'_d) y la reactancia síncrona (X_s).



2.2.2.1. REACTANCIA SUBTRANSITORIA ($X''d$)

Es la reactancia del devanado del estator en el instante en que ocurre el corto circuito y determina el valor de la corriente que circula durante los primeros ciclos después de la falla.

2.2.2.2. REACTANCIA TRANSITORIA ($X'd$)

Esta reactancia determina la corriente que sigue al período cuando la reactancia subtransitoria decae. La reactancia transitoria es efectiva después de uno y medio ciclos, y depende del diseño de la máquina.

2.2.2.3. REACTANCIA SINCRONA (X_s)

Esta reactancia es la que determina la corriente que circula cuando se llega a la condición de estado permanente. No es efectiva hasta después de varios segundos en que ocurre el corto circuito, por lo que no se usa normalmente en los estudios de corto circuito.

Los motores de inducción, por su parte, no tienen devanado de campo, pero las barras del rotor actúan como el devanado de amortiguamiento. Por lo tanto, los motores de inducción se dice que tienen reactancia subtransitoria.

2.2.3. CORRIENTES DE CORTO CIRCUITO SIMÉTRICAS Y ASIMÉTRICAS

Las palabras **SIMÉTRICA** y **ASIMÉTRICA** describen la forma de las ondas de corriente alterna, alrededor de su eje cero. Si las equivalentes de los picos de las ondas de corriente son simétricas alrededor del eje cero, se les denomina **ENVOLVENTES DE**

CORRIENTE SIMÉTRICA. Si las envolventes no son simétricas alrededor del cero de los ejes, se les denomina entonces **ENVOLVENTES DE CORRIENTE ASIMÉTRICA.** En cualquier caso, la envolvente es una línea que se traza uniendo los picos de las ondas.

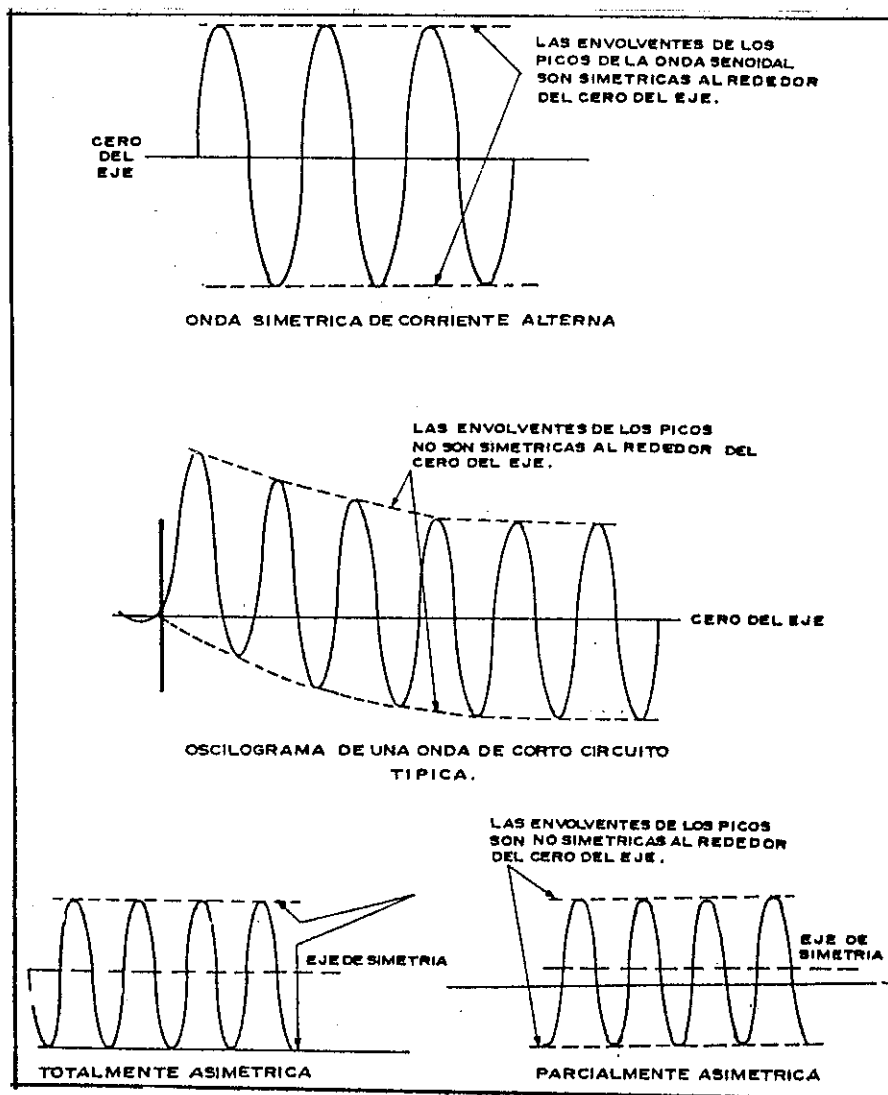


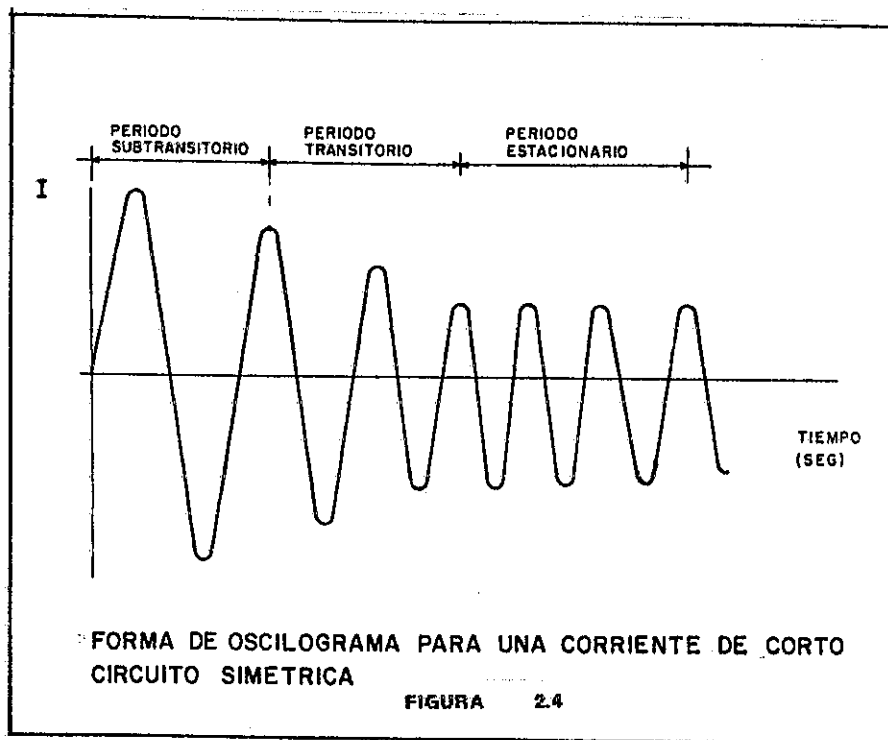
FIGURA 2.3 ENVOLVENTES DE CORRIENTE ASIMÉTRICA

La mayoría de las corrientes de corto circuito son casi siempre asimétricas, durante los primeros ciclos después de la ocurrencia del corto circuito. La corriente asimétrica está en su máximo durante el primer ciclo después que el corto circuito

ocurre y en unos pocos ciclos después se transforma en simétrica.

En la siguiente figura, se muestran algunas ondas simétricas.

ONDAS SIMÉTRICAS



2.3. EL CÁLCULO DE CORTO CIRCUITO

El cálculo del valor preciso de una corriente asimétrica en un tiempo dado después de falla, es un cálculo que puede resultar complejo. En consecuencia, se pueden desarrollar métodos simplificados que conduzcan a la obtención de las corrientes requeridas para el equipo y los dispositivos de protección.

En un sentido más elemental, el valor de la corriente de corto circuito simétrica, se obtiene por el uso apropiado de la impedancia en la ecuación básica:

$$I = E/Z$$

Donde E= Tensión del sistema

Z o X= Impedancia equivalente del sistema que incluye a la red y las fuentes de corto circuito.

Para el equipo, se establece que un dispositivo de protección debe tener la capacidad de interrumpir la máxima corriente de corto circuito que circula a la falla a través del dispositivo de protección en el punto de su localización. Este mismo concepto se aplica a la determinación de la capacidad de corriente de corto circuito de barras, aisladores y tableros.

2.3.1. TIPOS DE FALLAS EN LAS INSTALACIONES ELÉCTRICAS

INDUSTRIALES

Las fallas o corto circuitos pueden ocurrir en una instalación eléctrica industrial en distintas formas. El dispositivo de protección o equipo debe tener la capacidad de interrumpir o de soportar cualquier tipo de falla o las fallas que se puedan presentar.

Se considera la falla trifásica, aun cuando la probabilidad de ocurrencia de ésta sea baja y casi siempre sea causada por motivos accidentales.

2.3.1.1. FALLA TRIFÁSICA SOLIDA

Una falla trifásica sólida describe la condición en que las tres fases se unen físicamente con una impedancia de cero ohmios entre ellas, como si se soldaran o atornillaran físicamente.

Aun cuando este tipo de condiciones de falla no es el más frecuente en ocurrencia, resulta, por lo general, el de mayor valor, y por esta razón resulta el cálculo básico para las instalaciones industriales y comerciales.

2.3.1.2. FALLA DE FASE A FASE SOLIDA

En la mayoría de los sistemas trifásicos, los niveles de falla de fase a fase sólida son de aproximadamente el 87% de la corriente de falla trifásica sólida. Debido a esto, el cálculo de esta falla no siempre se requiere, ya que no representa el máximo valor.

2.3.1.3. FALLA DE LÍNEA (FASE) A TIERRA SOLIDA

En sistemas con el neutro, sólidamente conectado a tierra, la falla sólida de fase a tierra es por lo general, igual o ligeramente menor que la falla sólida trifásica, excepto cuando se conectan los neutros a tierra a través de un valor elevado de impedancia en el que el valor de corriente es significativamente menor.

El cálculo de la falla de línea a tierra es necesario en las instalaciones comerciales e industriales que tienen el neutro sólidamente aterrizado en el lado de bajo voltaje. Para el cálculo de la falla de línea a tierra, se requiere del uso de técnicas por componentes simétrica, ya que la corriente de falla a tierra se puede calcular como:

$$I_f = \frac{3V}{Z_1 + Z_2 + Z_0 + 3Z_n}$$

DONDE:

V= Voltaje de línea a neutro

Z1= Impedancia de secuencia positiva.

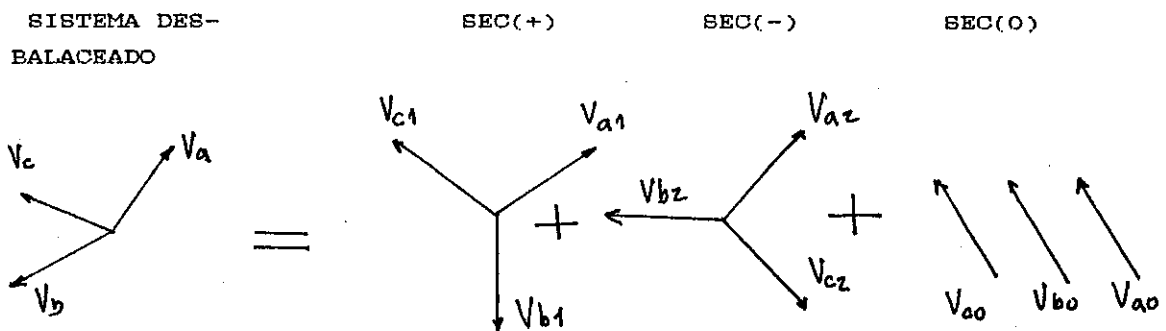
- Z_2 = Impedancia de secuencia negativa.
 Z_0 = Impedancia de secuencia cero.
 Z_n = Impedancia de conexión a tierra del neutro.

Este valor de Z_n en las instalaciones industriales puede ser una resistencia (R_n), cuyo valor se selecciona de manera que limita la corriente de falla a tierra.

2.4. TEORÍA DE COMPONENTES SIMÉTRICOS

La teoría de las componentes simétricas establece que tres vectores desequilibrados en un sistema trifásico, se pueden descomponer en tres sistemas equilibrados de vectores, denominados de secuencia positiva, negativa y cero independientes; así se resuelve cada una de estas redes como una red balanceada y después se regresa a la solución del problema original. Respaldando esta teoría, es general para circuitos trifásicos desbalanceados, y ofrece ventajas para las condiciones transitorias como es el corto circuito en los sistemas eléctricos de potencia.

REPRESENTACIÓN DE LOS VECTORES DE SECUENCIA



- Los componentes de secuencia positiva son de igual magnitud con diferencia de fase de 120° y con la misma secuencia de fase que el sistema original.
- Los componentes de secuencia negativa son de igual magnitud y con diferencia de fase de 120° , con la secuencia de fases opuestas al sistema original.
- Los componentes de secuencia cero, formados por tres vectores de igual magnitud y con una diferencia de cero grados.

Cada uno de los vectores desequilibrados originales es igual a la suma de sus componentes. Los vectores expresados en función de sus componentes, se expresa como:

$$V_a = V_{a1} + V_{a2} + V_{a0}$$

$$V_b = V_{b1} + V_{b2} + V_{b0}$$

$$V_c = V_{c1} + V_{c2} + V_{c0}$$

2.4.1. LOS OPERADORES DE LAS COMPONENTES SIMÉTRICAS

La letra "a" se utiliza normalmente para designar al operador que origina una rotación de 120° en sentido contrario al movimiento de las manecillas del reloj. Este operador es un número complejo de módulo uno (la unidad) y argumento de 120° y que se define como:

$$a = 1/120^\circ = -0.5 + j0.86$$

$$a^2 = 1/240^\circ = -0.5 - j0.86$$

$$a^3 = 1/360^\circ = 1/0^\circ = 1$$

$$a^4 = 1/120^\circ = a$$

Con lo anterior, se obtienen las siguientes relaciones:

$$\begin{aligned} V_{b^1} &= a^2 V_{a^1} & V_{c1} &= a V_{a^1} \\ V_{b^2} &= a V_{a^2} & V_{c^2} &= a^2 V_{a^2} \\ V_{b0} &= V_{a0} & V_{c0} &= V_{a0} \end{aligned}$$

Sustituyendo en las ecuaciones anteriores y realizando las operaciones matriciales necesarias, se pueden expresar los voltajes de secuencia en función de los de fase como:

$$\begin{bmatrix} V_{a^0} \\ V_{a^1} \\ V_{a^2} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix}$$

Las ecuaciones anteriores se pueden escribir en forma similar para las corrientes.

$$\begin{bmatrix} I_{a^0} \\ I_{a^1} \\ I_{a^2} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix}$$

2.4.2. FORMACIÓN DE REDES DE SECUENCIA PARA LOS ESTUDIOS DE CORTO CIRCUITO

Para los estudios de corto circuito, y en particular, para las fallas a tierra, se requiere que cada corriente de secuencia, circule por una red de impedancias de la misma secuencia, es decir, que un estudio de corto circuito por cualquier método que se aplique, requiere de la formación de las redes de secuencia positiva, secuencia negativa y secuencia cero. Para un sistema elemental como el que muestra en la figura:

2.5 LA TEORÍA DE LAS FALLAS TRIFÁSICA Y MONOFÁSICA

Para la obtención de las ecuaciones para las componentes simétricas de corriente y tensión en una red en general, durante una falla, se designan I_a , I_b , I_c , a las corrientes que salen del sistema equilibrado inicial.

Las tensiones de línea a tierra, se designan por V_a , V_b y V_c , antes de ocurrir la falla.

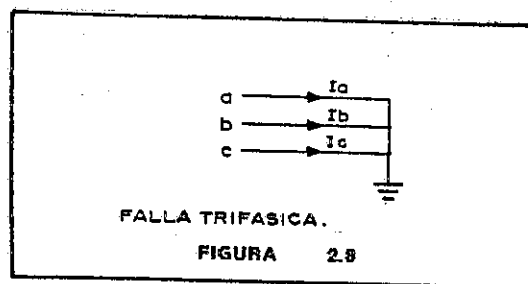
Al dibujar las redes de secuencia de un circuito cualquiera, éstas pueden reemplazarse por su equivalente de Thevennin, entre la barra considerada y el punto de falla.

2.5.1 FALLA TRIFÁSICA

En el análisis de fallas, lo que se pretende, en primer instancia, es obtener las expresiones que permitan calcular las corrientes de corto circuito que se requiera en el punto de falla seleccionado.

En la falla trifásica, las varillas hipotéticas están conectadas en la forma representada en la figura, que corresponde a la falla trifásica sólida.

El método de análisis general es el de componentes simétricas, a partir de un sistema elemental, como el que se muestra a continuación.



En la falla trifásica, el sistema se mantiene balanceado, por lo que sólo se consideran las componentes de secuencia (+). En un sistema equilibrado, como en una red de secuencia (+), las corrientes están defasadas 120° en secuencia ABC.

Aplicando el operador tenemos que:

$$I_b = a^2 * I_a$$

$$I_c = a * I_a$$

Sustituyendo estos valores en la matriz de componentes de corrientes.

$$\begin{bmatrix} I_a^0 \\ I_a^1 \\ I_a^2 \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_a \\ a^2 I_a \\ a I_a \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} I_a^0 \\ I_a^1 \\ I_a^2 \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} I_a + a^2 I_a + a I_a \\ I_a + a^3 I_a + a^3 I_a \\ I_a + a^4 I_a + a^2 I_a \end{bmatrix} = \frac{I_a}{3} \begin{bmatrix} 1 + a^2 + a \\ 1 + a^3 + a^3 \\ 1 + a^2 + a^4 \end{bmatrix}$$

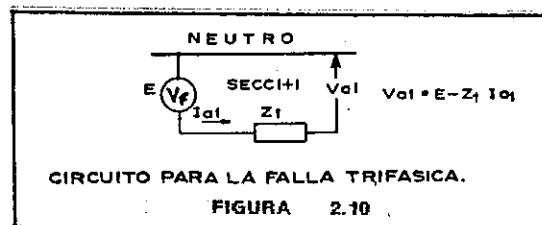
De aquí se obtiene que:

$$I_a^0 = 0$$

$$I_a^1 = I_a$$

$$I_a^2 = 0$$

En la figura siguiente se muestra el equivalente de Thevenin de la red de sec(+), que se obtiene en forma simplificada.



La ecuación de voltaje para esta red es:

$$V_{a1} = V_f - Z_1 * I_{a1} \quad \text{como } V_{a1} = 0$$

$$0 = V_f - Z_1 * I_{a1}$$

Por lo que $I_{a1} = V_f / Z_1$ que es conocida $I_{\phi} = V_f / Z_1$

NOTA:

En la ecuación: $V_{a0} = 1/3(V_a + V_b + V_c)$, se puede concluir que no hay componentes de secuencia cero, si la suma de los vectores desequilibrados es cero. Como la suma de los vectores de tensión entre líneas en un sistema trifásico es siempre cero, los componentes de secuencia cero no existen nunca en las tensiones de líneas, cualquiera que sea el desequilibrio. La suma de los vectores de las tres tensiones entre línea y neutro no es necesariamente cero y, por tanto, las tensiones, respecto al neutro, pueden tener componentes de secuencia cero.

En un sistema trifásico, la suma de las corrientes, en las líneas, es igual a la corriente I_n en el retorno por el neutro. por lo tanto,

$$I_a + I_b + I_c = I_n,$$

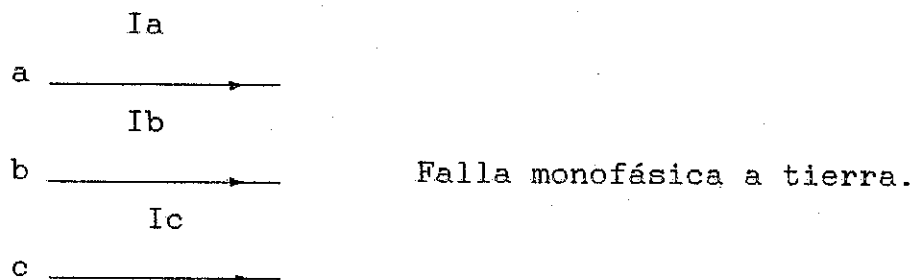
y tomando la ecuación $I_{a0} = 1/3 (I_a + I_b + I_c)$, se obtiene

$$I_n = 3I_{a0}$$

Si no hay retorno por el neutro de un sistema trifásico, I_n es cero y las corrientes en las líneas no contienen componentes de secuencia cero. Una carga conectada en DELTA no tiene retorno por el neutro y, por lo tanto, las corrientes que van a una carga conectada en DELTA no contienen componentes de secuencia cero

2.5.2 FALLA MONOFÁSICA (LÍNEA A TIERRA)

Supóngase que se presenta una falla de este tipo en una fase de un sistema trifásico, y en este momento las otras dos fases están en vacío, de acuerdo con el diagrama elemental siguiente:



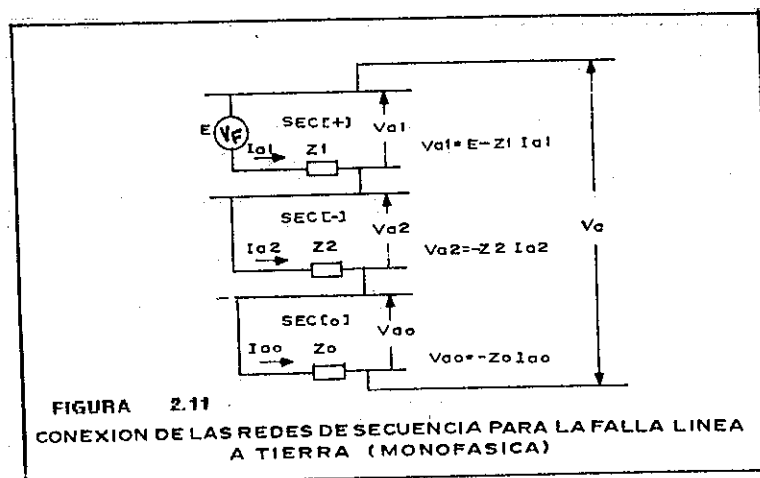
Las condiciones de falla son:

$$V_a = 0$$

$$I_b = I_c = 0$$

$$\begin{bmatrix} I_{a^0} \\ I_{a^1} \\ I_{a^2} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_a \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} I_a + 0 + 0 \\ I_a + 0 + 0 \\ I_a + 0 + 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_a/3 \\ I_a/3 \\ I_a/3 \end{bmatrix}$$

Como se observa, existen tres corrientes de secuencia, además $I_{a0} = I_{a1} = I_{a2}$; esto significa que las tres redes están conectadas en serie como se muestra en la figura siguiente:



Por lo tanto:

$$V_a = V_{a0} + V_{a1} + V_{a2}$$

$$V_a = V_f - Z_1 I_{a1} - Z_2 I_{a2} - Z_0 I_{a0}$$

$$\text{Pero } V_a = 0$$

$$0 = V_f - Z_1 I_{a1} - Z_2 I_{a2} - Z_0 I_{a0}$$

$$V_f = Z_1 I_{a1} + Z_2 I_{a2} + Z_0 I_{a0}$$

$$V_f = I_{a1}(Z_1 + Z_2 + Z_0)$$

$$I_{a1} = \frac{V_f}{Z_1 + Z_2 + Z_0}$$

La corriente de falla total sería:

$$I_a = I_f = I_{a0} + I_{a1} + I_{a2} = I_f = I_{a1} + I_{a1} + I_{a1} = 3I_{a1}$$

$$I_f = \frac{3V_f}{Z_1 + Z_2 + Z_0}$$

Si la falla ocurre en un sistema con neutro conectado a tierra a través de reactancia Z_n :

$$I_f = \frac{3V_f}{Z_1 + Z_2 + (Z_0 + Z_n)}$$

2.6. DETALLE DE LOS CÁLCULOS DE CORTO CIRCUITO

En esta parte, se presentan algunos de los detalles de los cálculos de corto circuito que incluyen desde la representación del propio sistema, ya sea en forma general o como una impedancia equivalente del punto de falla hacia la fuente, y se inicia por la obtención de los valores equivalentes de las impedancias de los elementos del sistema. Después de esta representación, el cálculo de los valores de corto circuito, resulta relativamente simple con un procedimiento de paso a paso.

Este procedimiento de paso a paso debe proporcionar las bases para la realización de los cálculos de corto circuito para la mayoría de los tipos de instalaciones industriales y comerciales, para sistemas cuya tensión de alimentación sea de 115kV con voltajes de distribución o utilización de 13.8Kv, 4.16Kv, 440 o 240v. En el caso de instalaciones industriales, se requiere de una representación más amplia, aun cuando un cálculo de corto circuito se necesite sólo para una parte del sistema, por ejemplo, cuando se instala un nuevo equipo y sólo se requiere conocer el valor de la corriente de corto circuito en el alimentador del equipo.

2.6.1. EL PROCEDIMIENTO PASO A PASO

Los siguientes pasos identifican las consideraciones básicas para la realización de cálculos de corto circuito. Desde luego que con la práctica, algunos de estos pasos se pueden combinar o simplificar. Por ejemplo, el uso de un diagrama unifilar o de impedancias. Los pasos básicos son los siguientes:

1. Preparar un diagrama unifilar del sistema, incluyendo todas las componentes significativas del mismo.
2. Determinar los puntos de falla y el tipo de corriente de corto circuito que se basan en la clase del equipo instalado (generadores, motores sincrónicos, grupo de motores de inducción, red de alimentación).
3. Preparar el diagrama de impedancias correspondiente reemplazando cada elemento por su impedancia y cada fuente de corto circuito (generadores, motores sincrónicos, grupo de motores de inducción, red de alimentación) por una fuente de voltaje en serie con una impedancia.
4. Para el punto de falla designado y las condiciones de falla, se debe reducir la red de manera que se obtenga una impedancia equivalente entre el punto de falla y la fuente.

2.7. APLICACIÓN DEL CALCULO DE CORTO CIRCUITO A INSTALACIONES INDUSTRIALES Y COMERCIALES

Los métodos de cálculo de corto circuito son generales y aplicables a cualquier sistema eléctrico, sin embargo, en el caso de las instalaciones industriales y comerciales, se debe hacer algunas consideraciones particulares, debido a que se tienen cargas en mediana y baja tensión, y por ejemplo, las resistencias que son despreciables en los sistemas eléctricos de potencia en alta tensión, en instalaciones industriales, no lo son.

En algunos casos, se puede hacer uso de métodos simplificados para el cálculo de las corrientes de corto circuito; los conceptos de estos métodos se pueden hacer

extensivos a los programas digitales.

Estos métodos simplificados se basan en el cálculo de la corriente de corto circuito simétrica, y se modela cada generador como una fuente de voltaje detrás de la reactancia apropiada (por lo general, la Subtransitoria). Cuando se usa la reactancia subtransitoria, se obtiene el valor inicial de la corriente de corto circuito, y cuando se usa la transitoria, se obtiene el valor de esta corriente unos ciclos después. La llamada componente de corriente directa se ignora.

A este método también se le conoce como E/X, debido a que se desprecia el valor de la resistencia, especialmente en las componentes de alta tensión (Líneas de transmisión, transformadores, cables de potencia), en donde el valor de la reactancia predomina sobre el de la resistencia. En las instalaciones en baja tensión, esta consideración no siempre es válida y entonces la reactancia se reemplaza por una Impedancia. El efecto de no incorporar el valor de R en el cálculo de la corriente de corto circuito mediante un cociente E/X, se puede dar a partir de factores, cuyos valores dependen de la relación X/R del sistema y de la velocidad de operación del interruptor.

Este método simplificado se puede usar siempre para dimensionar interruptores y puede resultar un tanto conservador en su cálculo, ya que los factores de corrección ajustan los decrementos de las componentes de corriente alterna y de corriente continua de la corriente de corto circuito.

Para calcular el valor de la relación X/R, para una falla en un punto determinado, existen dos métodos distintos (pero equivalentes).

a) El primer método involucra la reducción de la red para encontrar el equivalente de Thevenin para REACTANCIAS y para resistencias. El procedimiento apropiado consiste en construir el diagrama de REACTANCIAS de la red (depreciando las resistencias que se suponen tienen valores muy bajos en

comparación con la reactancias) entonces se reduce la red hasta encontrar una reactancia equivalente de Thevenin que se conecta entre la fuente y el punto de la falla.

En seguida, se construye la red en forma similar al caso anterior, pero ahora sólo con resistencias (despreciando todas las reactancias), entonces se reduce esta red hasta encontrar el equivalente de Thevenin para resistencias, de la fuente al punto de falla.

La relación X/R para una falla en un punto dado es la relación entre los equivalentes de Thevenin para las redes de Reactancia y Resistencia.

b) El segundo método se basa en la formación de la llamada matriz Z_{bus} . En este caso, se utilizan programas digitales. Para lograr la relación X/R , se puede correr el programa dos veces, una vez para la reactancia, formando X_{bus} , y atraparé la red de resistencia, obteniendo Z_{bus} , de modo que como la diagonal principal de las matrices representa cada nodo o bus del sistema; para cualquier nodo K la relación (X/R) es:

$$(X/R) = X_{bus_k} / R_{bus_k}$$

A continuación, se hará un ejemplo para encontrar esta relación. Los cálculos detallados de los corto circuitos no se analizan en este trabajo de tesis por estar fuera del enfoque y objetivos del mismo.

EJEMPLO

Para el sistema mostrado en la figura, calcular la relación X/R para un corto circuito trifásico en el bus 1 (barra 1).

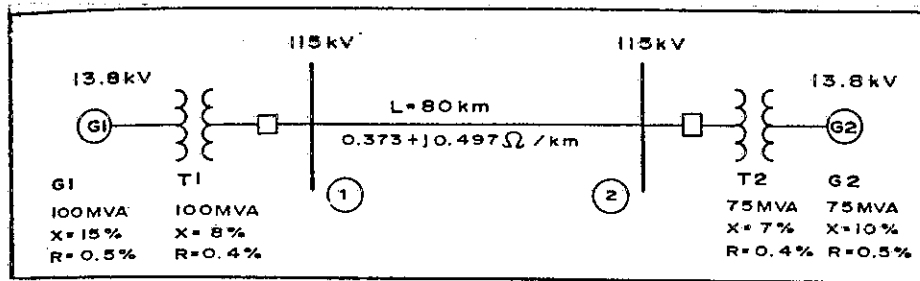


FIGURA 2.12 DIAGRAMA DEL EJEMPLO ANTERIOR

SOLUCIÓN

Si se toma como base de potencia 100MVA, se pueden convertir los valores dados a por unidad.

Para el generador G1:

$$X''d = 0.15, \quad R = 0.005$$

Para el generador G2:

$$X''d = 0.10 * \frac{100}{75} = 0.1333$$

$$R = 0.005 * \frac{100}{75} = 0.0066$$

Para el transformador T1:

$$X = 0.08 \quad R = 0.004$$

Para el transformador T2:

$$X = 0.070 * \frac{100}{75} = 0.093$$

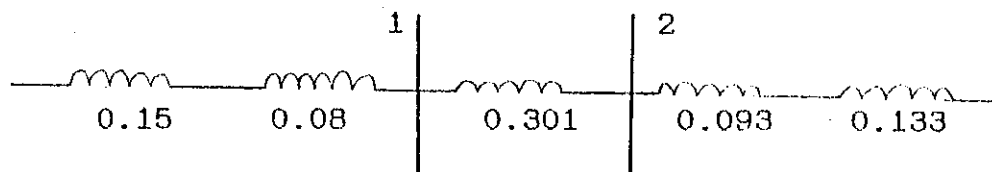
$$R = 0.004 * \frac{100}{75} = 0.005$$

Para la línea de transmisión de 115 Kv:

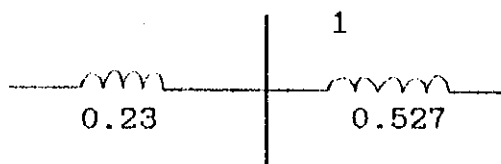
$$X = 0.497 * 80 * \frac{100}{115^2} = 0.301$$

$$R = 0.373 * 80 * \frac{100}{115^2} = 0.226$$

EL DIAGRAMA DE REACTANCIAS CORRESPONDIENTE ES EL SIGUIENTE:



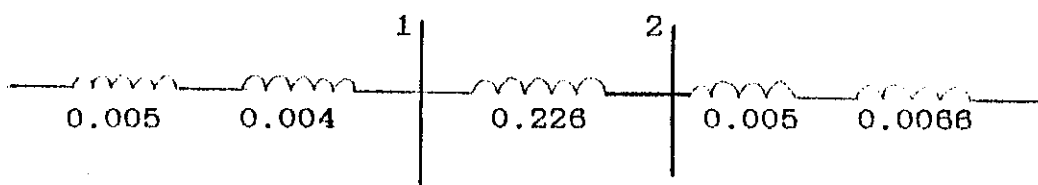
Reduciendo para la falla en el bus 1 (barra 1).



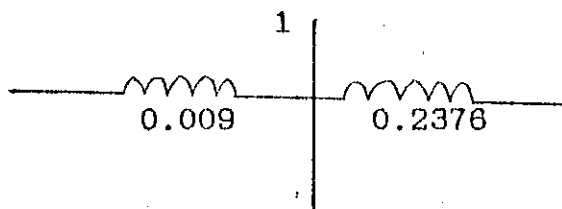
Combinando en paralelo las dos reactancias, se obtiene la equivalente de Thevenin.

$$X(\text{thev}) = \frac{0.23 * 0.527}{0.23 + 0.527} = 0.16 \Omega$$

El correspondiente diagrama de resistencias es el siguiente:



Reduciendo



Combinando en paralelo

$$R(\text{thev}) = \frac{0.009 * 0.2376}{0.009 + 0.2376} = 0.00867 \Omega$$

La relación X/R es:
$$\frac{X/R = X(\text{thev})}{R(\text{thev})} = \frac{0.16}{0.00867} = 18.45$$

2.8. LOS CÁLCULOS DE CORTO CIRCUITO PARA LA PROTECCIÓN POR RELEVADORES

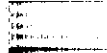
- A) El ajuste instantáneo de los relevadores requiere del valor de la corriente de corto circuito del primer ciclo; para esto, se multiplica la corriente de corto circuito simétrica por 1.60
- B) Para períodos de tiempo de hasta alrededor de 5 ciclos después que se presenta la falla, se requiere de la corriente simétrica, por lo que generalmente no se requiere de factores de multiplicación.
- C) Para retrasos de tiempo mas allá de 6 ciclos, se debe hacer el análisis tomando en cuenta únicamente los generadores síncronos y los transformadores que se encuentran interconectados a las líneas. Para este cálculo, se usa la reactancia transitoria ($X'd$). La contribución de los motores se considera despreciable.

En general, se requiere calcular el corto circuito trifásico y de fase a tierra; en el caso de que no se requiera relevador de sobrecorriente de falla a tierra, puede no requerirse el cálculo de la corriente de fase a tierra. Si se usan relevadores de bajo voltaje, se pueden requerir los niveles de voltaje en las barras.

La coordinación de los dispositivos de protección requieren frecuentemente que se calculen los valores de las corrientes de corto circuito, máxima y mínima.

Un método para obtener la corriente de corto circuito de valor mínimo, es la "Representación de la red para aproximadamente 30 ciclos con un mínimo de fuentes de corto circuito conectadas".

Este estudio representa generación mínima con algunos interruptores abiertos. Los circuitos que alimentan motores eléctricos se pueden considerar desconectados. Los generadores se representan con su reactancia transitoria. Este estudio sirve para determinar qué valor mínimo de la corriente de corto circuito es suficiente para operar los relevadores.



CAPITULO III

PROTECCIÓN PARA TRANSFORMADORES

3.1. GENERALIDADES

En este capítulo, se describirán las prácticas de protección para transformadores de los tipos más utilizados en sistemas eléctricos.

Los transformadores de potencia constituyen uno de los elementos más importantes en los sistemas eléctricos de potencia, ya sea en las grandes redes eléctricas o en las instalaciones industriales, que forman parte de las subestaciones eléctricas en cualquiera de sus modalidades, como elevadoras en las plantas generadoras, y reductoras o de enlace, por lo que su continuidad de servicio es muy importante; es necesario que se dispongan de elementos de protección contra las posibles fallas que se presenten.

En general, se debe vigilar y proteger los transformadores contra elevaciones de temperatura en el aceite, por lo tanto, se emplean termómetros especiales, y protección contra sobrecargas; se emplean los llamados elementos de imagen térmica con relevadores térmicos.

Aun cuando el nivel de confiabilidad en el diseño y construcción de los transformadores utilizados en las instalaciones industriales y en sistemas de potencia es elevado, las condiciones de operación los exponen a cierto tipo de fallas que les pueden producir defectos.

Las principales causas de fallas en los aislamientos de un transformador son:

- Elevación de temperatura a límites superiores de los admi-

sibles,

- Sobretensiones de origen atmosférico (y por maniobra de interruptores en algunos casos).

Desde el punto de vista de su estudio, las fallas en los transformadores se pueden clasificar en tres grandes grupos:

- 1) fallas en el equipo auxiliar que forma parte del transformador,
- 2) fallas en la parte interior del transformador como son los devanados y conexiones, y
- 3) sobrecargas y corto circuitos internos.

3.2. FALLAS EN EL EQUIPO AUXILIAR

En los transformadores de gran capacidad, los elementos considerados como auxiliares del transformador pueden alcanzar un numero considerable, y en algunas ocasiones, una falla en estos elementos auxiliares se pueden manifestar o traducir en una falla del transformador mismo; esto significa que es importante prevenir las fallas en estos equipos o elementos auxiliares, con el propósito de evitar fallas mayores en el transformador, como serían, por ejemplo, los cortos circuitos entre espiras de una misma fase o entre devanados de alto y bajo voltaje, o bien, entre devanados de dos fases distintas.

Se considera como equipo auxiliar el siguiente:

3.2.1. ACEITE PARA EL TRANSFORMADOR

Un nivel bajo de aceite en los transformadores resulta peligroso debido a que partes vivas como son conductores conectados a las boquillas o conductores de las bobinas que se deben encontrar sumergidos en aceite, se encuentran expuestos a fallas por ruptura dieléctrica cuando el nivel baja. Por esta razón, se debe de instalar en los transformadores indicadores de nivel de aceite con contactos que accionen una alarma cuando se presente esta situación en transformadores de gran potencia.

3.2.2. COLCHÓN DE GAS

El deterioro del aceite del transformador y los aislamientos se pueden minimizar si el oxígeno y las mezclas derivadas de éste son excluidas del espacio gaseoso dentro del transformador. Como la presión de operación dentro del tanque puede tener un rango de variación muy amplio, no siempre es recomendable instalar tanques completamente sellados; en los casos en que se usaran estos tipos de tanques, se deben emplear usar también medidores de presión con el objeto de tener una indicación visual de la presión dentro del transformador.

En algunos casos, se instala el tanque conservador con el objeto de minimizar la expansión y contracción de aceite; se agregan además sales de aluminio para evitar que se filtre la humedad.

En algunas ocasiones, se instala un cilindro de nitrógeno entre el transformador y el medio exterior para poder controlar la presión que generalmente se fija entre 0.5 y 0.8 atm. En este caso y en cualquier otro en que se emplee control de presión, se deben instalar indicadores con alarmas para baja presión.

3.2.3. BOMBAS DE ACEITE Y VENTILADORES DE AIRE FORZADO

La temperatura máxima del aceite generalmente es un indicador de la carga con que opera el transformador, de manera que un aumento en la temperatura del aceite puede ser una indicación de una sobrecarga o también una falla en el sistema de enfriamiento, que según sea el tipo de enfriamiento empleado por el transformador, puede ocurrir en la bomba de aceite (para enfriamiento FOA), el bloqueo de alguna válvula de los radiadores o bien la no operación de los ventiladores (para enfriamiento OA/FA). Para detectar este tipo de fallas, normalmente se instala un termómetro con contactos de alarma que indicaran elevación en la temperatura del aceite del transformador por cualquiera de las fallas mencionadas anteriormente.

3.2.4. AISLAMIENTO DEL NÚCLEO Y BOBINA

Las fallas iniciales pueden generar fallas mayores, si no se

tiene cuidado en las etapas iniciales; en principio, las fallas en los aislamientos se pueden presentar por cualquiera de las siguientes causas.

- a) el aislamiento entre las laminaciones del núcleo y los tornillos empleados para su sujeción puede ser de poca calidad o bien se puede dañar durante el montaje,
- b) el aislamiento entre bobinas, y entre bobinas y el núcleo, o bien, el aislamiento de los conductores pueden ser de poca calidad y se pueden dañar durante la construcción del transformador, o pueden perder sus características por envejecimiento o continuas sobrecargas,
- c) conexiones o uniones mal hechas durante la construcción.

Este tipo de fallas iniciales (o incipientes) generalmente producen gases dentro del transformador y se pueden detectar antes de que causen males mayores mediante el uso de relevadores, que operan a base de presión de gas, que se denominan relevadores **BUCHHOLS**.

El relevador **BUCHHOLZ** opera por la acción de la presión de los gases que se generan en el interior del transformador, debido a las fallas incipientes que se pueden presentar.

3.3. FALLAS EN LA PARTE INTERIOR (devanados y conexiones)

Las fallas eléctricas en los devanados que pueden causar daño en forma inmediata se clasifican en la forma siguiente:

- a) fallas entre las espiras adyacentes de un mismo devanado (alto voltaje o bajo voltaje) o bien, fallas de fase a fase en la parte exterior o en los devanados mismos, o cortocircuitos entre espiras de alto voltaje o bajo voltaje;
- b) fallas a tierra a través de todo el devanado o bien, fallas a tierra en las terminales externas de alto a bajo voltaje.

Estas fallas se detectan por un desbalance en las corrientes o en los voltajes y su inicio tiene orígenes diversos; por ejemplo, una falla entre espiras se puede originar con un punto de contacto resultante de las fuerzas mecánicas o del deterioro

del aislamiento debido a sobrecargas excesivas, pérdida de alguna conexión o bien, ruptura dieléctrica del aislamiento del transformador, debido a algún impulso de tensión.

Las fallas a tierra a través de grandes porciones del devanado pueden originar valores considerables de corrientes de falla a tierra y por consiguiente producir grandes cantidades de gas debidas a la descomposición del aceite, por lo que no es difícil detectar estas fallas; sin embargo, se requiere eliminarlas rápidamente con el objeto de evitar daños.

3.4. SOBRECARGAS Y CORTO CIRCUITOS EXTERNOS

Los transformadores se pueden encontrar sometidos a sobrecargas durante largos períodos de tiempo, los cuales están limitados por la elevación de temperatura de los devanados y del medio refrigerante que se use. Las sobrecargas excesivas en los transformadores producen deterioros en los aislamientos y fallas subsecuentes, por lo que como se ha indicado con anterioridad, es necesario tener indicadores de temperatura con alarma de tal forma que indiquen, oportunamente, cuando los límites permisibles de temperatura se están excediendo.

Los cortos circuitos externos en los transformadores sólo se encuentran limitados por la impedancia del transformador; de manera que si el valor de la impedancia es pequeño, la corriente de corto circuito puede resultar excesiva y producir en el transformador, por esfuerzos mecánicos debido a los esfuerzos magnéticos, desplazamientos en las bobinas o fallas en la conexiones.

3.4.1. RELEVADORES CON TIPO DE ARMADURA ATRAÍDA

Estos relevadores incluyen una armadura fija, un brazo móvil y un elemento de sujeción; estos comprenden al tipo más simple que responden tanto a señales de corriente alterna AC como de corriente directa DC.

Este tipo de relevadores opera bajo el principio de que una fuerza electromagnética se produce por un flujo magnético que se origina de una corriente. En relevadores que operan con DC, esta

fuerza es constante, y si excede a la fuerza de atracción el relevador, opera en forma confiable. En los relevadores accionados por AC, la fuerza está dada por la expresión.

$$F = K I^2$$

$$= K (I_{\max} \text{ Sen } \omega t)^2 = 1/2 K (I_{\max}^2 - I_{\max}^2 \text{ Cos } 2\omega t)$$

Esto significa que la fuerza electromagnética consiste en dos componentes. Una componente independiente del tiempo ($1/2 K I_{\max}^2$) y otra dependiente del tiempo que oscila a doble frecuencia ($1/2 K I_{\max}^2 \text{ Cos } 2\omega t$).

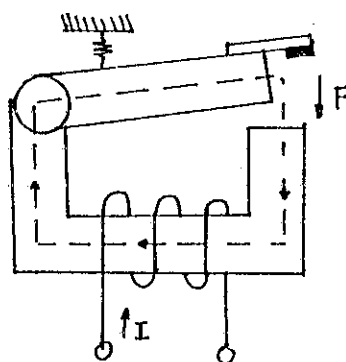


FIGURA 3.1 RELEVADOR TIPO ARMADURA ATRAIDA

3.4.2. RELEVADORES DE INDUCCIÓN

Estos relevadores incluyen una armadura fija con anillos de sombra y una armadura metálica giratoria, que actúan conjuntamente para producir un desplazamiento angular.

En estos relevadores, el par se produce cuando un flujo alterno reacciona con otra corriente inducida en el rotor por otro flujo alterno desplazado en el tiempo y el espacio pero de igual frecuencia. Este tipo de relevadores es muy usado en los sistemas que utilizan alimentación AC.

Los relevadores de inducción dan la posibilidad de ajustar su velocidad de acción y se pueden obtener diferentes formas de curvas tiempo-corriente, que dependen de si el rotor es de disco o de copa. Los tipos más comunes de estos se conocen como de polos sombreados o de tipo "Wattmetro".

En el relevador de polos sombreados, el flujo principal se divide en dos flujos defasados en el tiempo y el espacio con el

auxilio de un anillo de sombra (espira de sombra).

En general, se espera que el relevador ejecute una acción y "sienta" la diferencia entre las condiciones de falla y de no falla. Esto depende de la curva característica de operación del relevador.

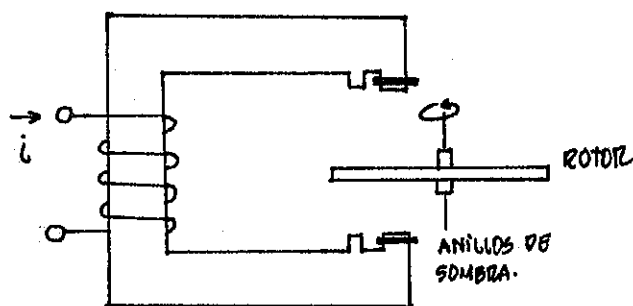


FIGURA 3.2 RELEVADOR TIPO INDUCCION

3.5. PROTECCIÓN POR RELEVADOR BUCHHOLZ

El relevador Buchholz se emplea en los transformadores de potencia que usan aceite como medio refrigerante y tienen tanque conservador (deposito de expansión); permite detectar las fallas en el interior del transformador, por lo que la protección del transformador se debe complementar con otros elementos que detecten también fallas externas en el mismo.

El principio de operación del relevador Buchholz se basa en el hecho de que cualquier falla que se origine en el interior de un transformador está precedida por otros fenómenos, a veces no perceptibles pero que a medida que transcurre el tiempo pueden provocar fallas más graves que eventualmente producen daños severos al transformador, por lo que resulta importante detectar las fallas incipientes (incipiantes) y enviar señales de alarma acústica o bien óptica sin que necesariamente se envíe una señal de disparo al interruptor que deje fuera de servicio al transformador. Las fallas más importantes que pueden ser detectadas por un relevador Buchholz son las siguientes:

- a) Cuando se produce algún corto circuito, entre las espiras de

los devanados de un transformador, provoca un arco eléctrico que genera gases en el aceite dieléctrico, que se manifiestan como humos que hacen operar al relevador.

b) Cuando se produce una sobrecarga brusca o un corto circuito, se manifiesta como un fuerte aumento en la temperatura de las capas interiores de los devanados hacia el exterior, de manera tal que el aceite refrigerante que se encuentra en contacto con las bobinas se volatiliza y descompone; los gases, producto de esta descomposición, circulan hacia el exterior de los devanados, y producen burbujas que rechazan la correspondiente cantidad de aceite, que se traduce como una fuerte circulación que normalmente es detectado por el relevador Buchholz.

c) Algunas veces por deficiencia en la fabricación de los transformadores, y algunas otras como una consecuencia de corto circuitos que se presentan, el núcleo sufre pequeñas deformaciones respecto a la condición original que debería tener, lo que produce un incremento considerable en las corrientes circulantes, que a su vez producen un aumento brusco de temperatura con la consecuente producción de gases que son detectados por el relevador Buchholz.

d) Una falla del aislamiento a tierra se traduce en un corto circuito de fase a tierra con presencia de un arco eléctrico que volatiliza y descompone el aceite siguiendo el mecanismo de circulación de aceite por las burbujas de gas en el interior del transformador y son detectadas por el relevador Buchholz.

Estas fallas del aislamiento de los devanados a tierra frecuentemente son producidas por sobretensiones atmosféricas o por maniobra de interruptores en ciertas condiciones de operación del transformador o la red, por lo que la protección contra este tipo de sobretensiones es un aspecto que debe ser considerado como importante en la parte de los diseños de instalaciones con protección del equipo eléctrico contra sobretensiones.

e) La descomposición química del aceite se puede presentar por diferentes circunstancias, que van desde la mala calidad del mismo hasta sobrecargas continuas; el proceso de descomposición trae como consecuencia la producción de gases por ocurrencia de

descargas, que en un principio pueden ser pequeñas, pero que posteriormente se pueden traducir en arcos eléctricos que a su vez producen una mayor cantidad de gases que deben ser detectados con el proceso descrito anteriormente por el relevador Buchholz.

Desde el punto de vista de instalación, el relevador Buchholz se localiza en el tubo que va del tanque del transformador al tanque conservador o de expansión.

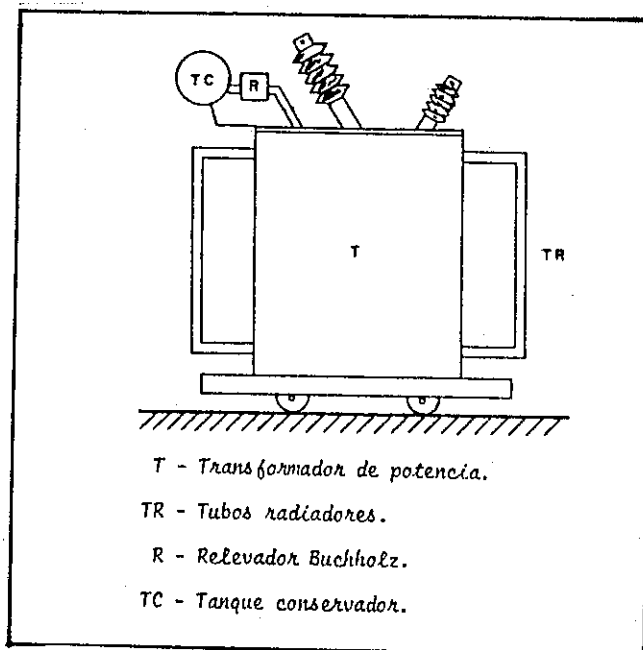


FIGURA 3.3 PROTECCION CON RELEVADOR BUCHHOLZ

3.6. PROTECCIÓN DE IMAGEN TÉRMICA

Las corrientes de sobrecarga o de corto circuito en las instalaciones producen efectos térmicos y dinámicos; el principio de operación de la protección por imagen térmica está basado en el efecto térmico de la sobrecorriente, y la característica de operación de las protecciones por imagen térmica es similar a algunas protecciones de tiempo dependiente y su principio es más fino en cierto modo que el empleado para la operación del fusible.

La corriente que recibe o entrega una máquina, o bien, que circula por una línea de transmisión, por lo general requiere de algún medio de protección contra el efecto térmico que produce. En los modelos de protección, el principio de protección se basa en la deformación de una lámina bimetalica y el subsecuente

cierre de un contacto, es decir, que una sobrecarga o corriente de corto circuito se detecta por el relevador como una acumulación de calor por el efecto Joule.

La acción de intervención se presenta sólo cuando la cantidad de calor acumulada supera por frecuencia y duración una determinada temperatura del bimetálico. Este tipo de protección, cuando no se toman en consideración las condiciones ambientales y climatológicas, puede provocar intervenciones innecesarias; por otra parte, un ajuste en la protección demasiado elevado para evitar estos disparos o accionamientos innecesarios de la protección, puede producir, en condiciones ambientales desfavorables, daños graves por calentamiento excesivos. Es decir, que la intervención de un relevador de imagen térmica, aunque es aparentemente simple, debe cumplir con ciertos requerimientos operacionales, tales como:

- 1) adecuar la capacidad térmica del relevador a aquella de la máquina, de modo que se obtenga una curva tiempo-corriente que tenga la misma forma;
- 2) introducir dispositivos de compensación adaptados para corregir los "brincos" o variaciones bruscas de temperatura en los casos, a veces muy frecuentes, de instalación de las máquinas eléctricas y los relevadores en ambientes distintos, como por ejemplo en el interior y exterior de una planta generadora;
- 3) corregir la relación de transformación de los transformadores de corriente, de tal manera que la corriente que circule por ellos esté en fase y de acuerdo con la que circula por la máquina. Una situación que se puede presentar complicada en el caso de la protección de imagen térmica, es el de las máquinas que se encuentran instaladas en ambientes cambiantes, que por lo general representa el caso más frecuente, como es el caso de máquinas (especialmente transformadores de potencia) que se encuentran a la intemperie y por lo tanto expuestas a todos los cambios climatológicos. En las temporadas calurosas, como por ejemplo el verano, las máquinas se encuentran bajo

la acción de los rayos solares y se puede tener un incremento de temperatura respecto a las de régimen normal de 40 o 50°C, mientras que los relevadores que no se encuentran expuestos al sol o al ambiente externo no resienten cambios de más de 10 o 15°C por dar un orden de magnitud. Esto significa que la protección de imagen térmica debe estar preferentemente compensada para considerar diferentes casos y evitar errores en lo posible.

La protección de imagen térmica en su concepto más elemental está constituida de las siguientes partes funcionales.

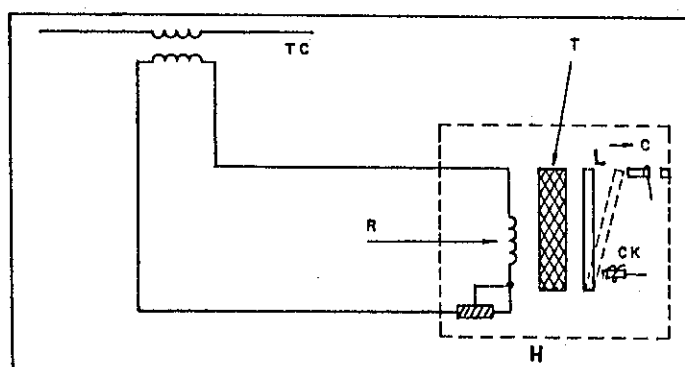


FIGURA 3.4 PROTECCION DE IMAGEN TERMICA

- a) Una resistencia R derivada directamente de un transformador de corriente conectado a la máquina que se va a proteger.
- b) Un sistema T, transmisor del calor producido por efecto Joule del devanado R.
- c) Una lámina metálica L que se dilata según la temperatura producida por el sistema de recalentamiento.
- d) Un sistema H para la conservación (o difusión) del calor, según sea el tipo de protección. A este elemento se relacionan otros órganos auxiliares como son el contacto C soldado a la lámina móvil, el dispositivo Ck de ajuste de la temperatura máxima de disparo. La resistencia R tiene la función de transmitir el calor producido por la corriente secundaria del transformador de corriente TC de la máquina y debe tener una constante térmica tan próxima a la de la

máquina como sea posible. Debido a las pequeñas dimensiones de la resistencia, es conveniente introducir una masa metálica T que permite acumular el calor por un tiempo relativamente largo y al mismo tiempo transmitirlo a la lámina L. El sistema H está constituido por una cámara termostática, de manera que limite hasta donde sea posible los cambios de temperatura en el exterior.

Desde luego que cuando la resistencia y la masa T se recalientan, por efecto de la corriente de régimen, la protección tiende a alcanzar valores sucesivos de etapas de equilibrio térmico con tiempos de intervención que están en función de:

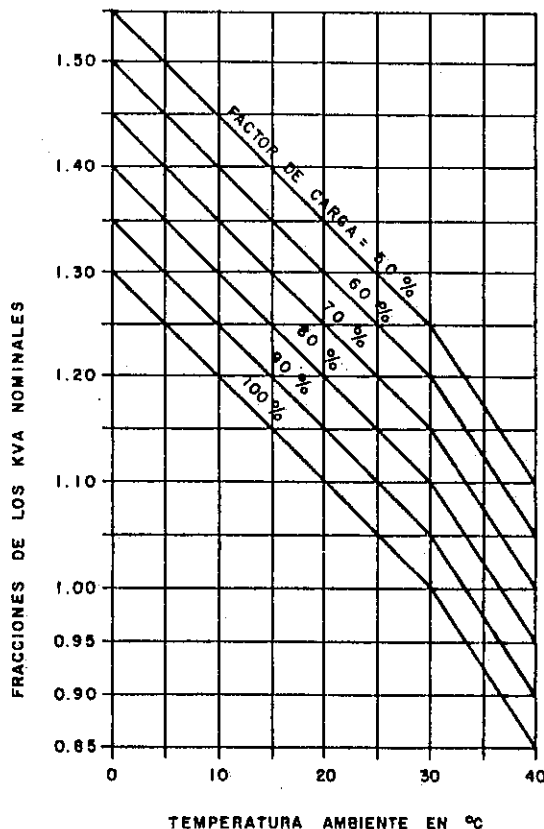
- a) la temperatura ambiente,
- b) la sobrecorriente,
- c) de la duración de la sobrecorriente,
- d) de las características constructivas del dispositivo de protección.

Desde el punto de vista de la aplicación de los relevadores de imagen térmica, es conveniente tener una idea del consumo a fin de seleccionar correctamente la capacidad en VA (BURDEN) del transformador de corriente, y es así como se encuentran consumos para este tipo de relevador entre 6 y 20 W.

Para tener una idea de la intervención del relevador de imagen térmica en condiciones de sobrecarga, es conveniente recordar que la potencia suministrada por una máquina (transformador por ejemplo) también es función de la temperatura ambiente, y si se denota por I_n el valor de la corriente nominal, el valor de la corriente que puede suministrar la máquina en función de la temperatura es:

$$I = I_n (1.3 - T_a/100)$$

De la ecuación anterior, I es la corriente que puede suministrar el transformador tomando en cuenta la temperatura; I_n es la corriente nominal y T_a la temperatura ambiente en grados centígrados. Esta expresión se puede representar gráficamente como sigue:



POTENCIA DISPONIBLE EN UNA MAQUINA EN CONDICIONES DE CARGA Y DE TEMPERATURA AMBIENTE.

FIGURA 3.5

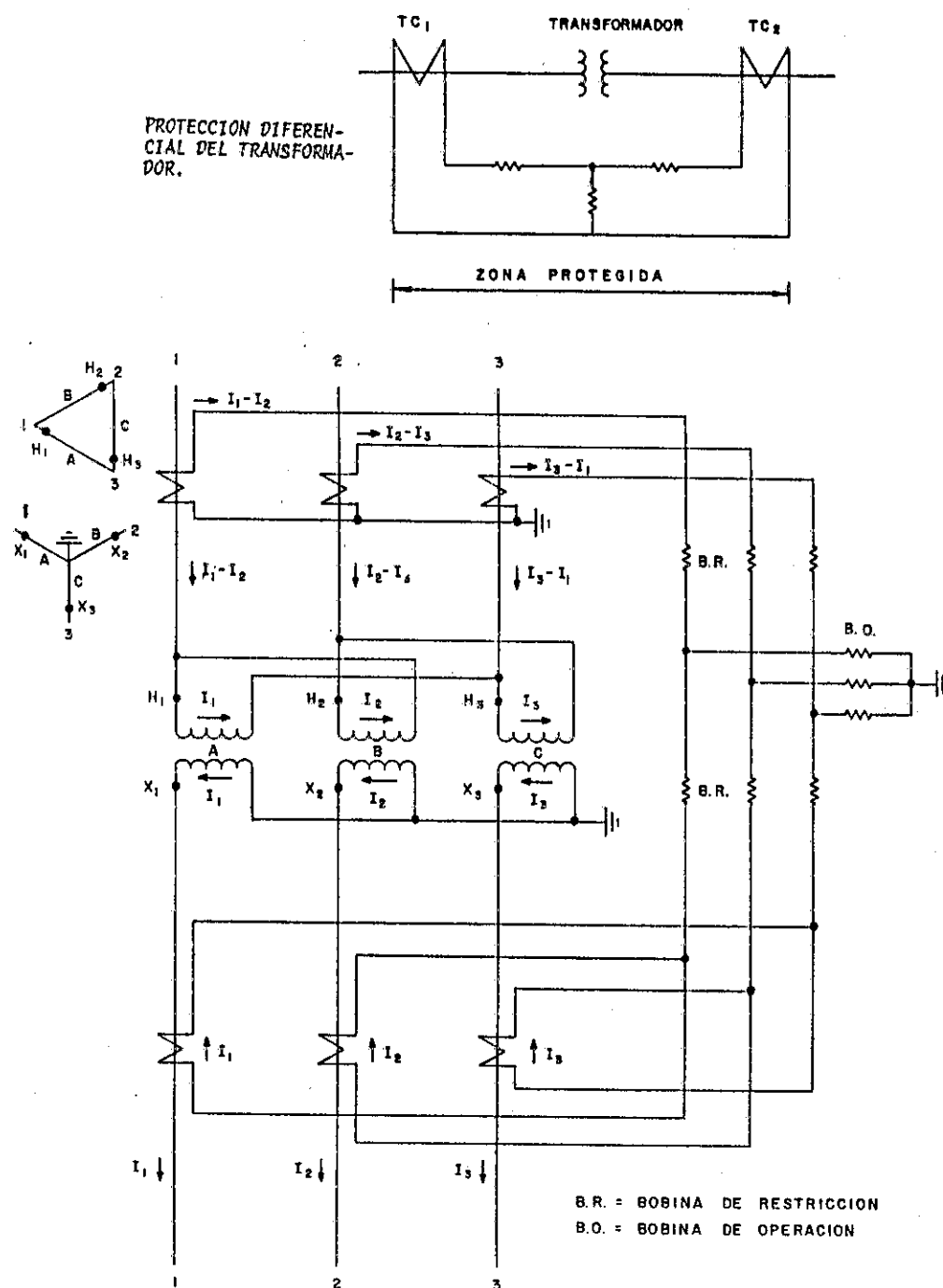
3.7. PROTECCIÓN DIFERENCIAL DE LOS TRANSFORMADORES

La protección DIFERENCIAL es el tipo de protección más importante empleado para la protección de transformadores contra fallas internas de fase a fase y de fase a tierra. Por lo general, se aplica a transformadores con potencias del orden de 5MVA o mayores. El principio de operación del relevador diferencial consiste básicamente en que cualquier desviación de los valores de intensidad de corriente, en los extremos de entrada y salida de la zona protegida, indica una falla en el interior de esa zona, de manera que esta señal se puede emplear como indicadora y para disparo del interruptor; por eso el relevador diferencial debe reunir las características de una alta selectividad combinada con un tiempo rápido de disparo.

Es importante también tomar en consideración que debido a que los transformadores de potencia se encuentran en **delta-estrella**, existe un defasamiento de 30° en sus corrientes, por lo que es necesario compensar este desplazamiento con la conexión de los transformadores de corriente de manera que los TC que se conecten el lado de la delta del transformador protegido se deben

de conectar en estrella y los TC que se conectan del lado de la estrella del transformador protegido, se deben de conectar en delta.

PROTECCIÓN DEFERENCIAL DEL TRANSFORMADOR



PROTECCION DIFERENCIAL DEL TRANSFORMADOR.

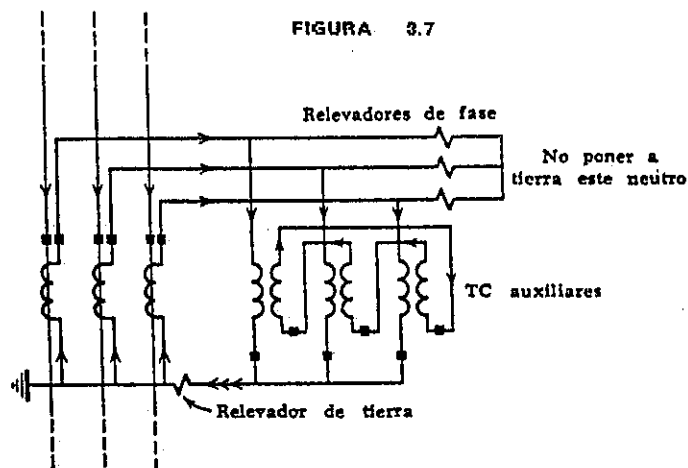
FIGURA 3.8

En la práctica, los fabricantes acostumbran recomendar protección diferencial para la protección contra cortocircuitos para todos los bancos de transformadores de potencia desde 1000 KVA o mayores. Un muestreo de un gran número representativo de compañías de potencia demostró que una minoría favorecía la protección diferencial para bancos tan bajos como 1000 KVA, pero que prácticamente era unánime la aprobación de dicha protección para bancos designados a 5000 KVA y mayores.

El relevador diferencial deberá hacer funcionar un relevador auxiliar de reposición manual que dispara todos los interruptores de los transformadores. La característica de reposición manual es para disminuir la probabilidad de que un interruptor de transformador se recierre en forma inadvertida, y sujetar así el transformador a un daño adicional innecesario.

3.7.1. LA DERIVACIÓN DE LA CORRIENTE DE SECUENCIA CERO

En la siguiente figura, se muestra cómo pueden conectarse tres CT auxiliares para derivar las corrientes de secuencia cero de los relevadores en el secundario de los CT conectados en estrella.



Existen otras formas de derivación semejante, pero no se mostrarán en este trabajo de tesis, porque la mostrada tiene la ventaja de que la relación de los CT auxiliares no es importante.

en tanto que los tres sean semejantes. Dicha derivación es útil en un circuito diferencial donde los CT principales deben estar conectados en estrella, pero donde deben evitarse las corrientes de secuencia cero para los relevadores de fase. Otra utilización es impedir el mal funcionamiento de los relevadores direccionales monofásicos durante fallas a tierra en ciertas condiciones.

La derivación de la corriente de secuencia cero, como ya se dijo, es útil donde se necesite excluir las componentes de secuencia cero de la corriente de los circuitos secundarios externos de los CT conectados en estrella. Dicha derivación permitirá conectar los CT en estrella en el lado de la estrella de un transformador de potencia y en delta en el lado de la delta. Rara vez se aprovecha esta posibilidad debido a que por lo general no hay impedimento en utilizar las conexiones convencionales, y de hecho se prefieren éstas. La derivación es útil algunas veces para la aplicación de la figura siguiente, en donde se va a incluir en la zona de protección del banco principal un transformador de puesta a tierra en el lado de la delta de un transformador de potencia estrella-delta. Se hace resaltar que como se indica en la figura, el neutro de la conexión del relevador no deberá estar conectado al neutro de los CT, pues esto disminuiría la eficacia de la derivación. Tampoco los CT escogidos para la derivación se saturarán para las tensiones que pueden aplicarse cuando fluyan grandes corrientes de fase.

3.8. FUNCIONAMIENTO DE LA PROTECCIÓN DIFERENCIAL

Por lo general, la protección diferencial de los transformadores está basada en el uso de relevadores del tipo "eje balanceado" o de brazo móvil en equilibrio del tipo electromecánico en donde los contactos se mantienen normalmente abiertos por gravedad, o mediante el uso de resortes muy blandos de manera tal que la corriente que circula en la bobina de operación hala el brazo libre y cierra los contactos; estos relevadores son muy sensibles a las corrientes de operación, por eso se les provee de una bobina de restricción.

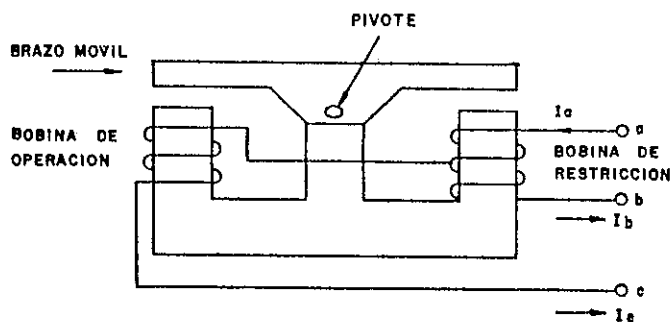


FIGURA 3.8 BOBINAS DEL RELEVADOR DIFERENCIAL

El diagrama eléctrico correspondiente es el siguiente:

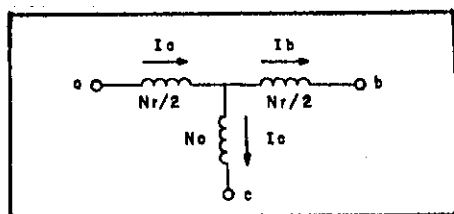


FIGURA 3.8

Obsérvese que se cumple que: $I_c = I_a - I_b$ y normalmente las tres corrientes se encuentran en fase.

El relevador tiene tendencia a operar cuando las corrientes $I_a \neq I_b$, lo cual dará $I_c \neq 0$ y entonces se desarrollarán fuerzas electromagnéticas que son proporcionales al cuadrado de las fuerzas magnetomotrices. Cuando las corrientes $I_a = I_b$ entonces $I_c = 0$ y no se presenta la condición de operación.

La condición para la operación del relevador es entonces:

$$(N_o I_c)^2 > (N_r I_a / 2 + N_r I_b / 2)^2$$

donde N_r : número de espiras de la bobina de restricción

N_o : número de espiras de la bobina de operación.

Si se establece una relación entre el número de espiras de la bobina de restricción y el número de espiras de la bobina de operación, mediante una constante K_e tal que $0 < K_e < 1$.

Se tiene

$N_r = K_e N_o$, De tal forma que la ecuación del par operante

es: $(NoIc)^2 > (Ke*No/2 (Ia+Ib))^2$.

Extrayendo la raíz cuadrada a ambos extremos (considerando solo el término positivo).

$Ic > Ke/2*(Ia+Ib)$ pero como en condiciones de operación $Ic = Ia - Ib$,

entonces:

$(Ia - Ib) > Ke/2 (Ia + Ib)$. Sumando Ib a ambos miembros de la desigualdad:

$$Ia > [(2 + Ke)/(2 - Ke)]Ib$$

o también

$$Ib > [(2 + Ke)/(2 - Ke)]Ia$$

Estas ecuaciones determinan en forma automática la zona de operación del relevador en la forma siguiente:

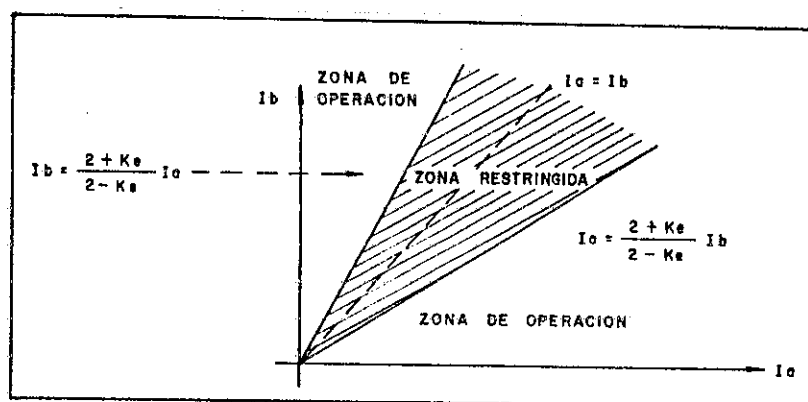


FIGURA 3.10 ZONAS DE OPERACION Y RESTRICCION

La aplicación de esta protección diferencial a los transformadores se obtiene como se indica a continuación:

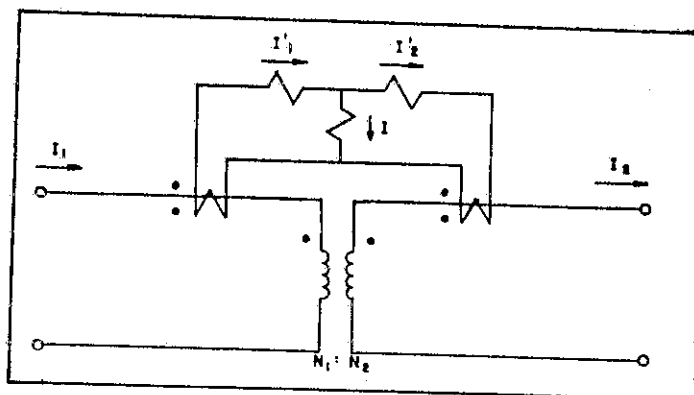


FIGURA 3.11 PROTECCION DIFERENCIAL EN UN TRANSFORMADOR

Si se designan por a_1 , a la relación de transformación de los transformadores de corriente en el lado primario y a_2 , a la relación de transformación de los transformadores de corriente en el lado secundario.

Aplicando la ley de kirchhoff de corrientes al circuito del relevador diferencial:

$$I = I'_1 - I'_2$$

pero $I'_1 = I_1 / a_1$

$$I'_2 = I_2 / a_2$$

De manera que la corriente en la bobina de operación es:

$$I = I_1 / a_1 - I_2 / a_2$$

Y como se sabe la relación de transformación se puede seleccionar de manera que:

$$a_2 / a_1 = N_1 / N_2$$

De manera que la ecuación para la corriente I en la bobina de operación del relevador se puede transformar en:

$$I = 1/a_1 (I_1 - I_2 / N_1 N_2)$$

Para un transformador ideal se cumple que: $N_1 / N_2 = I_2 / I_1$, por lo tanto $I_2 = I_1 N_1 / N_2$ y la corriente $I=0$ en condiciones normales. Cuando ocurre un corto circuito $I \neq 0$.

Aunque este trabajo de tesis no está enfocado a los diversos y complejos cálculos de relevadores, se realizara un ejemplo básico para la mejor comprensión de las ecuaciones anteriores.

EJEMPLO:

Un transformador de potencia de 1000 KVA usado como reductor de 23000 a 230 voltios se desea proteger con un relevador diferencial por lo que:

- Se pide seleccionar la relación de transformación apropiada para los transformadores de corriente.
- También se desea la relación entre las espiras de las bobinas de restricción (N_r) y operación (N_o), si el

relevador debe tolerar una variación en la corriente hasta del 20% de I_1 .

SOLUCIÓN

a) La corriente nominal del transformador en el lado de alto voltaje es

$$I_1 = I_p = 1000\text{Kva}/23\text{Kv} = 43.47 \text{ amperios}$$

la relación de transformación del transformador de potencia es:

$$a = 23000/230 = 100$$

La corriente secundaria es:

$$I_2 = I_p = 100 * 43.47 = 4347 \text{ amperios.}$$

Por lo tanto:

Transformadores de corriente en el devanado de alto voltaje 50:5

Transformadores de corriente en el devanado de bajo voltaje 5000:5

La potencia en VA de los transformadores, así como el resto de especificaciones se hace de acuerdo con cálculos que no se estudian en este trabajo.

b) Si se supone una tolerancia hasta del 20% en las corrientes, se tiene que:

$$I_2 = 0.8 I_1$$

En estas condiciones, el relevador está en su frontera de operación por lo que la ecuación:

$$I_a > [(2 + K_e)/(2 - K_e)] I_b$$

se transforma en:

$$[(2 - K_e)/(2 + K_e)] I_a > I_b$$

y para las condiciones establecidas

$$[(2 - K_e)/(2 + K_e)] I_1 = 0.8 I_1$$

$$2 - K_e = (2 + K_e) 0.8$$

$$1.8 K_e = 0.4$$

Por lo que $K_e = 0.222$

3.9. PROTECCIÓN DE TRANSFORMADORES SEGÚN SU CAPACIDAD

En general para la protección de los transformadores, se pueden usar, según la capacidad y tensión de transmisión, los

siguientes dispositivos:

1. fusibles,
2. relevadores de sobrecorriente (No direccionales y direccionales),
3. relevadores diferenciales (de disco de inducción y armónicamente restringidos),
4. relevadores de presión (presión de aire o presión de aceite),
5. dispositivos de temperatura,
6. analizadores de gas.

Estos dispositivos se pueden usar en forma individual o en diferentes combinaciones, para lo cual es necesario tomar el costo de la protección, por lo que para determinar la protección apropiada de los transformadores, se deben considerar algunos factores concernientes con el transformador y su localización en el sistema; algunos de estos factores son los siguientes:

3.9.1. CAPACIDAD EN KVA

El tamaño (capacidad en KVA de los transformadores) varía de acuerdo con las normas y prácticas usadas por las empresas eléctricas, no obstante para un criterio de aplicación, se puede tomar como guía general lo siguiente:

- a) para transformadores hasta 2500 KVA, se puede proteger la mayoría de los casos sólo con fusibles;
- b) para transformadores de 2500 a 5000 KVA se pueden usar, eventualmente, fusibles para la protección contra sobrecorrientes. Es deseable el uso de relevadores de sobrecorriente desde el punto de vista de sensibilidad y para la coordinación con otros relevadores de protección en el sistema, tanto en los lados de alto voltaje, como de bajo voltaje del transformador;
- c) para transformadores de 5000 a 10000 KVA, se recomienda la protección diferencial al menos con relevadores del tipo inducción;
- d) para transformadores de 10000 KVA y potencias superiores, se recomienda la protección diferencial con relevadores de

presión y/o temperatura y una adecuada coordinación con el resto de los elementos de protección del sistema.

3.9.2. LOCALIZACIÓN Y FUNCIÓN EN EL SISTEMA

Dependiendo de la función que desempeñe el transformador dentro del sistema, así como su localización, la decisión del tipo de protección que se debe adoptar estará afectada principalmente por:

a) Si el transformador forma parte importante de toda la red, y si la localización del transformador en el sistema de potencia está sujeto al estudio de los problemas de estabilidad.

En el caso de que se tenga una respuesta afirmativa a los planteamientos anteriores, probablemente el transformador se someta a una doble protección diferencial y adicionalmente se usen relevadores de presión y de temperatura.

b) Si el transformador en cuestión es del tipo reductor, es posible que una protección diferencial reforzada con relevadores de sobrecorriente sea suficiente.

c) Si el transformador está cercano a una fuente de generación, como puede ser el caso de un transformador elevador en una central generadora, requerirá de una protección diferencial con alta restricción de armónicas, debido al problema de las corrientes magnetizantes de inserción, además de los relevadores de presión y temperatura.

3.9.3. TENSIÓN DE OPERACIÓN

En términos generales, se puede afirmar que a mayor tensión de operación, se requiere de una mejor protección, ya que es importante detectar y eliminar las fallas con un mínimo de retraso y con máximo de seguridad.

3.9.4. CONEXIONES Y OPERACIONES DE DISEÑO

Los siguientes factores se consideran importantes:

- a) si es un transformador de dos o tres devanados;
- b) si se trata de un auto transformador;
- c) la forma en que se encuentra el neutro conectado a tierra

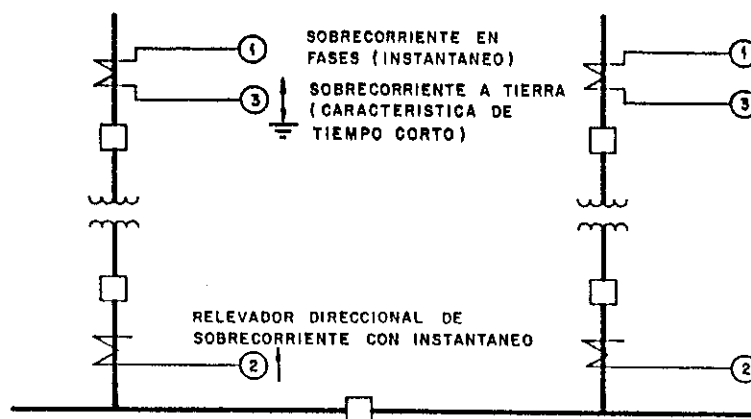
- Sólidamente conectado a tierra
 - Conectado a tierra a través de resistencia
 - Conectado a tierra a través de un transformador de distribución;
- d) disponibilidad de cambiador de derivaciones (taps) fuera de carga;
- e) uso de cambiador automático de derivaciones con carga.

En el caso de transformadores que se encuentren dentro de los criterios anteriormente expuestos y usen protección contra sobrecorriente, los valores mínimos de corriente de disparo se deben especificar de acuerdo con los siguientes criterios.

- a) Transformadores enfriados por aceite o Askarel.
I de disparo = $2.5 * I$ de placa
- b) Transformadores tipo seco.
I de disparo = $1.25 * I$ de placa
- c) Con enfriamiento por aceite o Askarel pero impedancia menor del 6%
I de disparo = $6 * I$ de placa
- d) Con enfriamiento por aceite o Askarel pero con impedancia entre 6 y 8%.
I de disparo = $4 * I$ de placa.

Para describir un esquema típico de protección contra sobrecorriente en transformadores, se puede usar el siguiente diagrama.

FIGURA 3.12 ESQUEMA TÍPICO DE PROTECCION CONTRA SOBRECORRIENTES



3.10. CORRIENTES MAGNETIZANTES DE INSERCIÓN (INRUSH CURRENT)

Cuando un transformador se energiza inicialmente, existe un transitorio de la corriente de excitación que puede parecer como una falla interna para los relevadores diferenciales. Los valores pico de las corrientes magnetizantes de inserción pueden ser del orden de 8 a 10 veces el valor pico de la corriente de plena carga; este valor está afectado principalmente por los siguientes factores:

- 1) tamaño del banco de transformadores,
- 2) tamaño del sistema de potencia,
- 3) resistencia en el sistema desde la fuente hasta el banco,
- 4) tipo de acero usado en el núcleo del transformador,
- 5) flujo residual en el banco,
- 6) forma de energización del banco (inicial o restablecimiento)

El máximo valor de la corriente magnetizante de inserción se presenta en el transformador cuando la onda de voltaje está próxima al cero. En este instante, la corriente y el flujo deben ser un máximo en el circuito que es altamente inductivo, y media onda de voltaje requiere un cambio en el flujo de hasta dos veces el máximo flujo.

El flujo residual en el banco de transformadores se puede sumar o restar al flujo transitorio, de manera que se incremente o reduzca la corriente magnetizante de inserción. Desde el punto de vista de la magnetización, los transformadores de potencia operan por lo general cerca de la rodilla de la curva de saturación, de manera que los requerimientos de flujo adicional de la onda de voltaje cero, en la energización más el flujo residual, saturará definitivamente al hierro e incrementará las componentes de la corriente de magnetización. Una onda típica de corriente magnetizante de inserción se muestra en la figura siguiente.

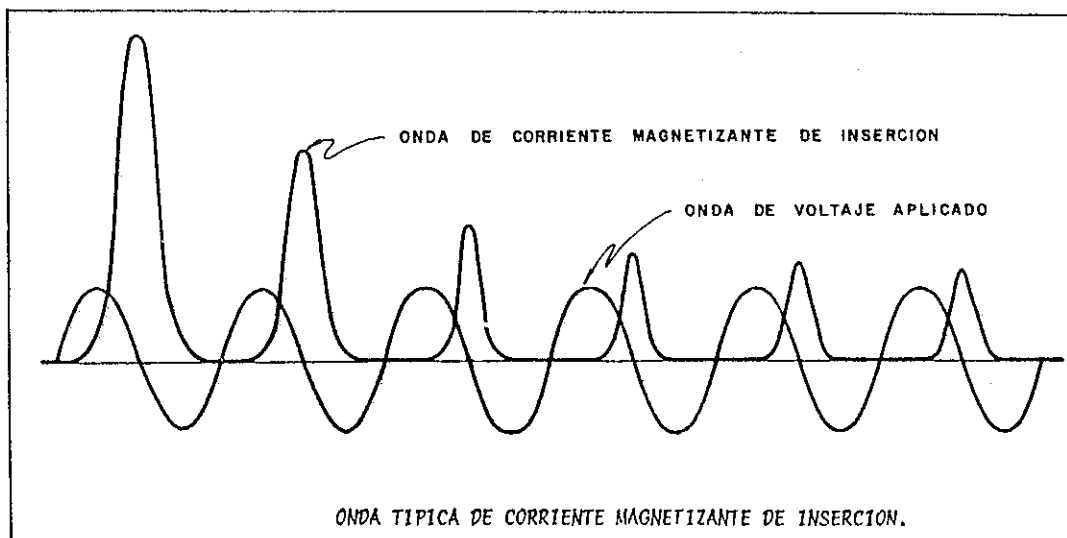


FIGURA 3.18

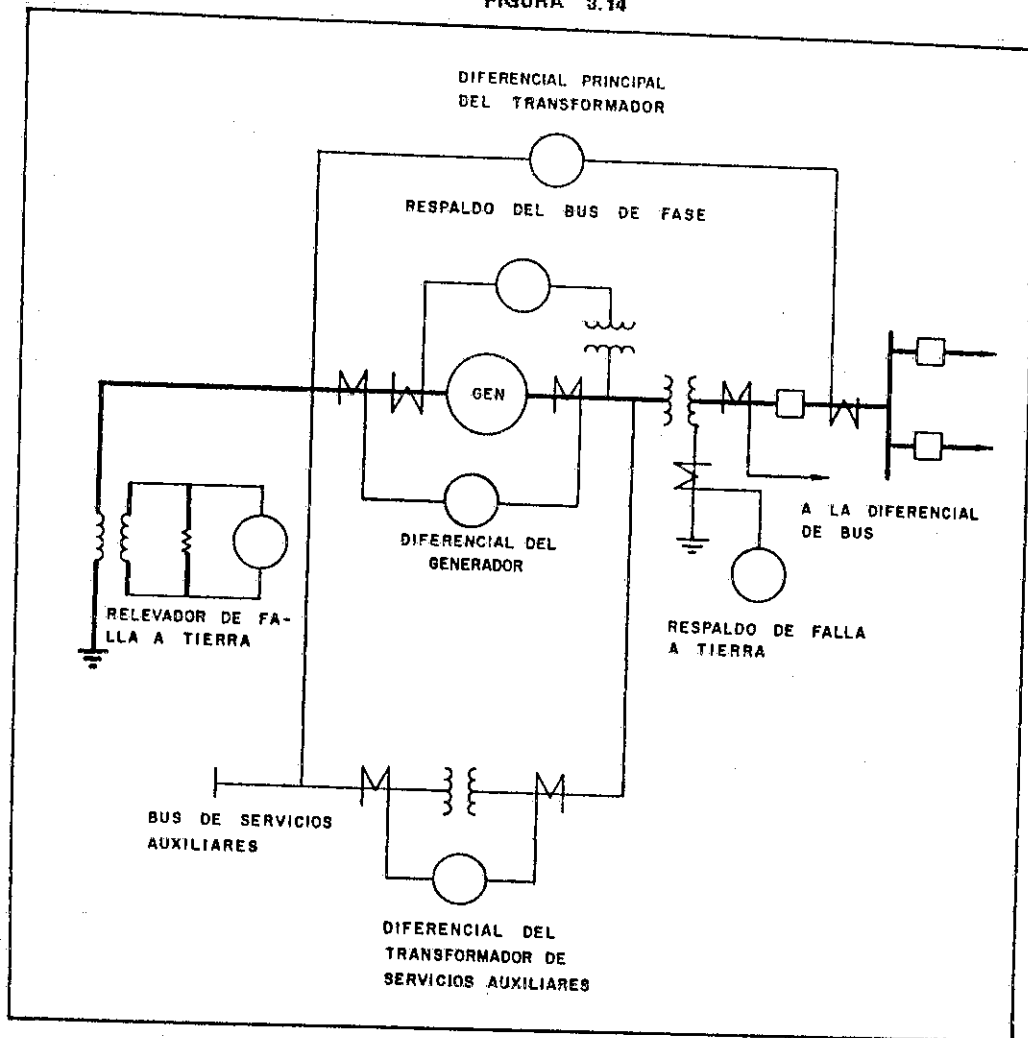
La corriente magnetizante de inserción por lo general decae rápidamente en los primeros ciclos, y a partir de ahí en forma muy lenta tomando de 4 a 5 segundos para llegar a su mínimo valor cuando la resistencia es baja. La constante de tiempo del circuito (L/R) de hecho no se mantiene constante debido a que la inductancia L varía como resultado de la saturación en el transformador. Durante los primeros pocos ciclos, la saturación es alta; de ahí que L sea pequeña. Debido a la pérdida de amortiguamiento del sistema la saturación baja y L se incrementa. De acuerdo con investigaciones experimentales en pruebas de laboratorio, la constante de tiempo de la corriente magnetizante de inserción varía de 10 ciclos para pequeñas unidades, y hasta 1 minuto para transformadores grandes.

El valor de la resistencia de la fuente al banco determina el amortiguamiento de la onda de corriente; de ahí que los transformadores o bancos de transformadores próximos a las centrales generadoras tendrán un efecto severo de corrientes magnetizantes.

Por otro lado para una subestación eléctrica lejana de la central generadora, la corriente magnetizante de inserción no es severa y debido a la resistencia en la línea de transmisión de interconexión, se amortigua rápidamente.

ESQUEMA GENERAL DE PROTECCIÓN PARA LA UNIDAD GENERADOR
TRANSFORMADOR

FIGURA 3.14



CAPITULO IV

PROTECCIÓN PARA MOTORES Y GENERADORES

4.1. PROTECCIÓN DE MOTORES ELÉCTRICOS

La protección de los motores eléctricos varía en forma considerable, y se puede decir que es menos estandarizada que la protección de otros aparatos o componentes de una instalación eléctrica. Esto se debe a la gran variedad de tamaños y tipo de aplicaciones de los motores.

Por lo anterior, se puede afirmar que la protección se basa principalmente en la importancia del motor, y por supuesto, de la potencia del mismo.

4.1.1. RIESGOS DURANTE LA OPERACIÓN DE LOS MOTORES ELÉCTRICOS

Durante la operación de los equipos y aparatos eléctricos, se pueden presentar algunos riesgos de operación que están presentes en forma potencial, que normalmente son:

1. Fallas por corto circuito entre fases y/o a tierra.
2. Daño térmico por:
 - a) sobrecarga (continua o intermitente),
 - b) rotor bloqueado (Falla en el arranque o frenado),
3. Condiciones anormales de operación como:
 - a) operación desbalanceada,
 - b) bajo voltaje y alto voltaje,
 - c) inversión de fases,
 - d) condiciones ambientales desfavorables,
 - e) secuencia de arranque incompleta.

Existe otro tipo de clasificación de estas distintas fallas, y se reclasifican como sigue:

- a) Propias del motor:
 - 1. fallas de aislamiento,
 - 2. fallas mecánicas.

- b) Debidas a la carga:
 - 1. sobrecarga (o baja carga),
 - 2. alta inercia.

- c) Debidas al ambiente:
 - 1. problemas de ventilación,
 - 2. ambientes contaminados, húmedos o con altas temperaturas.

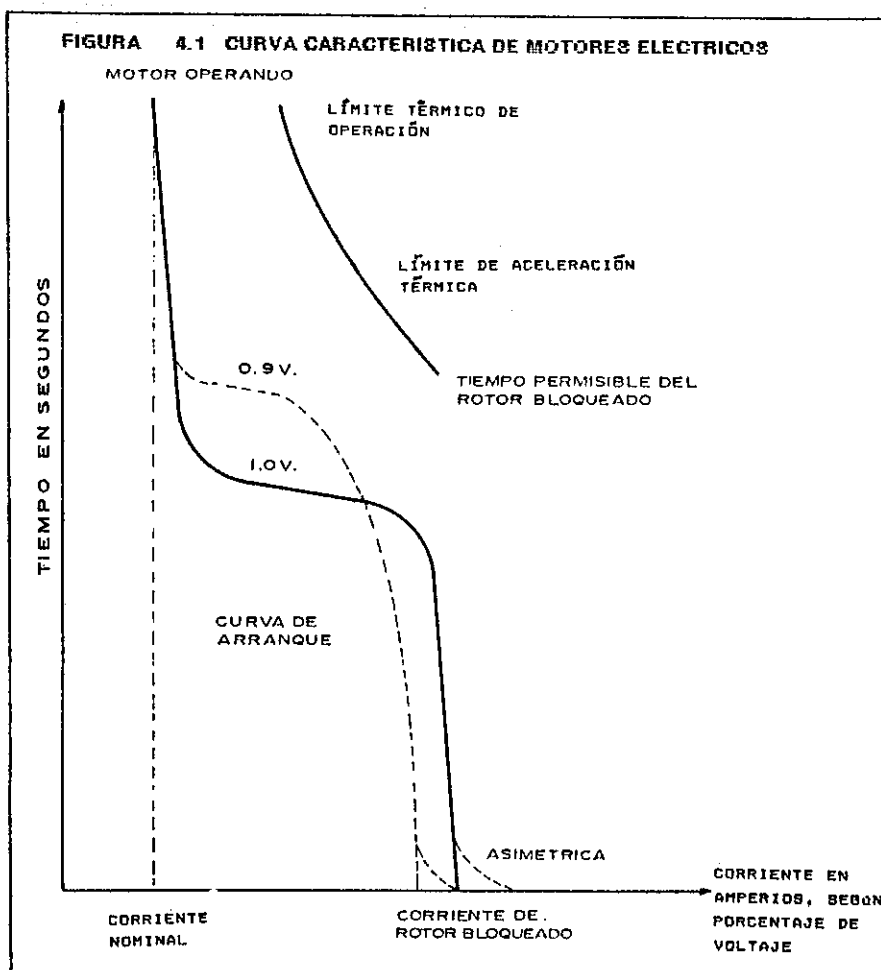
- d) Debidas a la fuente de alimentación.
 - 1. corto circuitos, fases abiertas,
 - 2. sobrevoltaje o bajo voltaje,
 - 3. inversión de Fases.

4.1.2. CARACTERÍSTICAS DE LOS MOTORES A CONSIDERAR EN LA PROTECCIÓN

Cuando se estudia la protección de motores eléctricos, especialmente los grandes; es necesario considerar con cierto detalle algunas de sus características.

- 1. Las curvas de corriente de arranque.
- 2. Las curvas de capacidad térmica, que deben incluir el límite térmico a rotor bloqueado.

Estas características se obtienen normalmente de los fabricantes de motores eléctricos y son básicas para la selección y aplicación de las protecciones. La forma típica de estas curvas se muestra en la figura siguiente.



De la gráfica anterior, puede observarse que la corriente máxima de arranque del motor se obtiene con el voltaje nominal de la máquina (línea continua). Las corrientes para voltajes menores se muestran a la izquierda de la curva anterior (línea punteada), con un tiempo mayor para lograr la corriente nominal del motor.

Existen tres límites térmicos diferentes, los cuales se muestran juntos en una curva. Estos límites térmicos son zonas relativamente indeterminadas.

1. La porción de corriente más alta indica el número permisible de veces de la corriente del rotor bloqueado. Este es el tiempo en que el rotor puede permanecer en reposo después de que el motor ha sido energizado, antes de que ocurra el daño térmico en las barras del rotor y los anillos conectores, o bien, en el estator.

En los motores muy grandes, este límite térmico del rotor, puede ser menor que el tiempo de arranque, de manera que estos motores deben arrancar instantáneamente para evitar el daño térmico.

2. El límite térmico de aceleración de la corriente de rotor bloqueado, a la corriente de par de arranque del motor, es alrededor del 75% de la velocidad. Puede observarse que la parte baja de la curva es el máximo valor permisible a rotor bloqueado, y la parte superior es el límite térmico de operación.

3. El límite térmico de operación representa la capacidad de sobrecarga del motor durante la operación en emergencia.

4.1.3. PROTECCIÓN GENERAL DEL MOTORES ELECTRICOS

La protección para motores existe en distintas formas, ya que hay una gran variedad de diseños, y se pueden hacer, ya sea individualmente o en distintas combinaciones. Cada una tiene sus propias particularidades, por lo que resulta difícil hacerlo.

Los fundamentos básicos de la protección de motores eléctricos establecen que se debe permitir operar por encima de las sobrecargas y condiciones anormales de operación, pero sin exceder demasiado sus límites térmicos y mecánicos, y al mismo tiempo proporcionar la máxima sensibilidad de fallas.

En el caso de motores arriba de 600 V, se establece que cada motor se debe proteger contra sobrecargas peligrosas y fallas en el arranque, por medio de un dispositivo térmico que sea sensible a la corriente. Si la sobrecorriente es por falla, se deben usar fusibles o interruptores (combinados con relevadores) con la capacidad adecuada.

Para motores de hasta 600 V, cada motor se debe proteger contra sobrecargas peligrosas y fallas en el arranque por medio de un dispositivo protector contra sobrecargas y sobrecorriente, como son los interruptores termomagnéticos.

En general, los relevadores son elementos sensores, los cuales basan su función operativa en movimientos ocasionados por fuerzas electromagnéticas. Como ya se mencionó en el capítulo

anterior, para realizar la protección de fallas de sobrecorriente, por ejemplo, se utilizan relés o relevadores de sobre corriente. Los relevadores garantizan una eficiente protección, ya que pueden construirse para brindar una mayor exactitud en la variación de los parámetros vigilados por los fusibles.

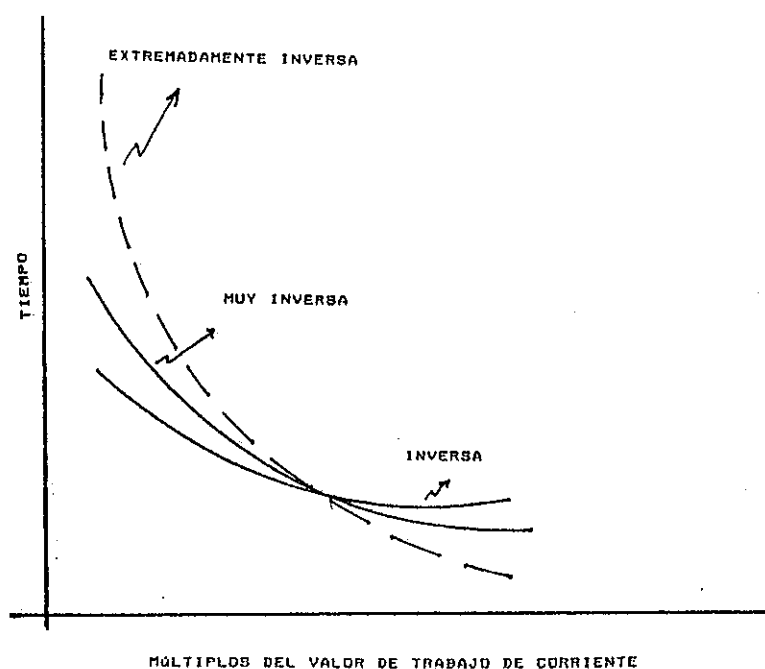
Los relevadores son elementos que indican en qué momento debe realizarse una función protectora; para esto, trabajan conjuntamente con interruptores, los cuales son los encargados de llevar a cabo la desconexión eléctrica del circuito.

El tiempo de actuación del relevador está dado en función de su curva característica tiempo-corriente, la cual puede ser:

- a) normalmente inversa,
- b) muy inversa,
- c) extremadamente inversa.

Estas curvas son parecidas a las curvas de tiempo-corriente de los fusibles; a medida que se vuelven más inversas, su tiempo de respuesta, al incrementar la corriente, se vuelve menor.

FIGURA 4.2 CURVAS TIEMPO-CORRIENTE DE LOS RELEVADORES



4.1.3.1. PROTECCIÓN CONTRA FALLA DE FASE

Para este tipo de falla, se pueden usar relevadores de sobre-corriente del tipo instantáneo no direccionales.

Por lo general, estas fallas proporcionan una corriente mayor que la de arranque a rotor blóqueado.

El motor representa un elemento terminal del sistema eléctrico, de manera que se puede usar un relevador de tipo instantáneo, lo cual no representa un problema de coordinación. La contribución del motor al corto circuito es relativamente pequeña ($1/X''d$) y decae rápidamente en unos cuantos ciclos; de manera que se pueden aplicar relevadores no direccionales.

Los CT's que alimentan a estos relevadores, se deben seleccionar de manera que la máxima corriente del motor proporcione de 4 a 5 amperios en el secundario.

Los relevadores instantáneos de fase se deben ajustar arriba de la corriente simétrica de rotor bloqueado y debajo de la mínima corriente de falla. Esto se puede igualar, donde la corriente de rotor bloqueado (I_{rb}) simétrica es:

$$I_{rb} = 1/(X_{11} + X''d)$$

Donde X_{11} es la reactancia total o equivalente del sistema de potencia, o bien de la fuente al motor.

Cuando la fuente de alimentación al motor es muy grande o casi infinita, entonces la corriente de falla trifásica en el motor se puede calcular así:

$$I_{\phi} = 1/X_{11}$$

Para una falla de fase a fase, suponiendo que las reactancias de secuencia positiva y negativa son iguales, entonces $X_{11} = X_{21}$.

$$I_{\phi\phi} = 0.866 I_{\phi} = 0.866/X_{11}$$

Si la relación del ajuste de disparo del relevador a la corriente de rotor bloqueado es Pr , entonces

$$Pr = I_{pu}/I_{rb}, \quad \text{de donde } I_{pu} = \text{corriente de disparo del relevador.}$$

$$I_{rb} = \text{Corriente de rotor bloqueado.}$$

Por lo general, los rangos típicos de Pr deben estar en el rango de 1.6 a 2.0 y algunas veces mayores.

Si Pf es la relación de la corriente mínima de falla a la

corriente de ajuste (disparo) del relevador.

$Pf = I_{\phi\phi}^{\text{mínima}} / I_{pu}$, y en forma general Pf debe estar entre 2 y 3 o a veces mayor.

De las ecuaciones anteriores tenemos:

$$I_{\phi\phi} = Pf I_{pu} = Pf * Pr * I_{rb},$$

de donde obtenemos $I_{\phi\phi} / I_{rb} = Pf Pr$ o bien $I_{\phi\phi} / I_{rb} = 1.155 Pf * Pr$

De lo anterior, se concluye que la falla trifásica en un motor debe ser $1.155 Pf * Pr$ o mayor para una buena protección de sobrecorriente instantánea.

Por ejemplo, para los valores mínimos recomendados de $Pr=1.6$ y $Pf=2$, en una falla trifásica, la corriente de falla debería ser 3.7 veces la corriente de rotor bloqueado. Y para $Pr=2$ y $Pf=3$, la falla trifásica sería al menos 6.9 veces la corriente de rotor bloqueado.

4.1.3.2. PROTECCIÓN DE SOBRECORRIENTE INSTANTÁNEA DE FASE

El propósito de esta protección es detectar condiciones de falla de fase con retraso (o retardo) no intencional.

Con la interrupción rápida de esta falla, se tienen los siguientes resultados:

- 1) limita los daños en el punto de la falla;
- 2) limita la duración de la variación de voltaje que acompaña a la falla;
- 3) limita la posibilidad de que la falla genere un fuego o algún daño por explosión.

Esta protección se logra con la aplicación de relevadores de sobrecorriente instantáneos de fase, alimentados por transformadores de corriente.

Cuando se usa el relevador de fase a neutro, entonces se usan sólo dos CT's de fase.

Estos relevadores se usan con el siguiente equipo:

- 1) interruptores de medio voltaje, del tipo usado en arrancadores de motores,
- 2) contactores tipo arrancador de medio voltaje que no usen fusibles de potencia.

Los relevadores de tipo instantáneo se pueden ajustar para

abrir en forma instantánea, si los valores de corriente exceden las corrientes normales de arranque.

La protección de sobrecorriente para el motor en operación, ya sea de tipo térmico o de disco (inducción), se alimenta por lo general de un transformador de corriente que se puede saturar con las corrientes de falla, con lo que se controla el posible daño del relevador usado en esta protección.

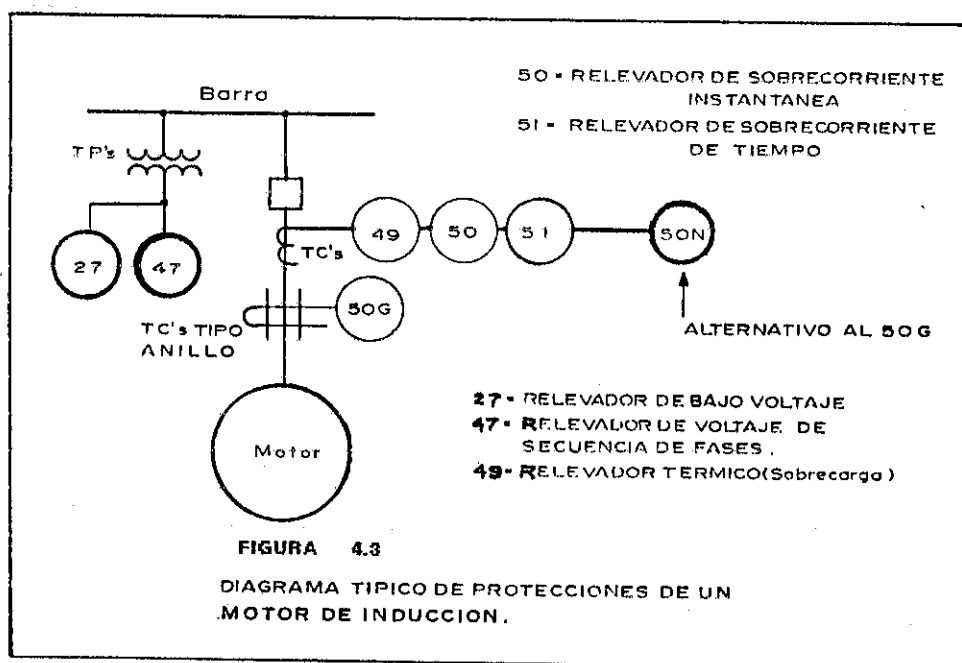
4.1.3.3. PROTECCIÓN CONTRA SOBRECARGA

Para la protección de motores de uso continuo, mayores de 1 HP, se debe considerar una corriente a plena carga de 125%.

Para los demás motores, menores de 1 HP, se aplica un factor no mayor al 115% de la corriente a plena carga. Si por algún caso los valores indicados anteriormente no son suficientes para arrancar el motor o conducir su corriente de carga, se pueden tomar los valores inmediatos superiores.

Para motores de servicio intermitente se consideran protegidos contra sobrecarga, si los dispositivos para protección contra corto circuito, no rebasan los valores indicados anteriormente.

En la siguiente figura, puede observarse la forma típica de protección de un motor de inducción.



4.1.3.4. PROTECCIÓN CONTRA SOBRECARGA (49)

Es un relevador que funciona cuando la temperatura de la armadura de una máquina o de cualquier otro devanado que lleve corriente, o bien cuando la temperatura de un transformador exceden de un valor predeterminado.

En el diagrama anterior, el relevador [49] es llamado relevador térmico de sobrecarga. Para el ajuste de estos relevadores, es conveniente que el motor pueda soportar algunas sobrecargas de una magnitud y con una duración que no le provoque daño, por lo que se recomienda que se seleccione una corriente de disparo entre el 115% y el 125% del valor de la corriente de plena carga.

4.1.3.5. PROTECCIÓN DE SOBRECORRIENTE INSTANTÁNEA (50)

El relevador (50) es un relevador instantáneo de sobrecorriente o relevador de índice de crecimiento que funciona instantáneamente con un valor excesivo de índice de crecimiento de la corriente, e indica una falla en el aparato o circuito que se esta protegiendo.

Este tipo de relevador de sobrecorriente no se debe usar en circuitos en donde se encuentren conectados en serie relevadores del mismo tipo y con los cuales se debe de coordinar, a menos que entre ellos se encuentre una impedancia de un valor suficientemente grande (como la debida a transformadores o alimentadores), que permita limitar la corriente de falla. En alimentadores principales, es poco usual su aplicación, debido a las dificultades que se presentan en la coordinación.

Para obtener el ajuste de los relevadores instantáneos, se usan los valores de corto circuito momentáneo que se obtiene de dicho estudio.

4.1.3.6. PROTECCIÓN DE SOBRECORRIENTE CON RETARDO DE TIEMPO (51)

El (51) es un relevador que puede ser de características de tiempo definido o inverso que funciona cuando la corriente en un circuito de corriente alterna excede a un valor predeterminado.

Esta es una de las protecciones más comunes en los motores

eléctricos; el mínimo ajuste de estos relevadores en un alimentador con cargas diversas, que puede incluir motores, debe estar arriba de la carga pico que maneje el circuito y que normalmente es el total de la corriente de arranque del motor mayor, más la suma de la corriente nominal de los demás motores. Esto es válido siempre y cuando los motores no arranquen simultáneamente.

Este tipo de relevadores se usa también para proteger transformadores.

4.1.3.7. PROTECCIÓN INSTANTÁNEA DE FALLA TIERRA (50G)

Esta protección se usa, por lo general, como una opción de la protección de sobrecorriente de falla a tierra (51N, AC time Overcurrent Ground). El relevador 50G se energiza por la corriente de un transformador de corriente tipo ventana, a través del cual pasan los tres conductores de alimentación de un motor, proporcionando de esta manera al motor una protección sensible a corrientes de falla a tierra. Debido a que la corriente en las tres fases es balanceada, en el primario del transformador de corriente, el relevador opera sólo con corrientes de falla a tierra. Este relevador debe tener el ajuste tan bajo como sea posible.

4.1.3.8. PROTECCIÓN DE FALLA A TIERRA

En la misma forma que para la protección de sobrecorriente para las fases, se aplican los relevadores de sobrecorriente instantáneos para la protección de fallas a tierra.

La ventaja de esta protección (50G) es su alta sensibilidad con una buena seguridad, pero está limitada por el tamaño del conductor que puede pasar a través del CT tipo anillo abierto.

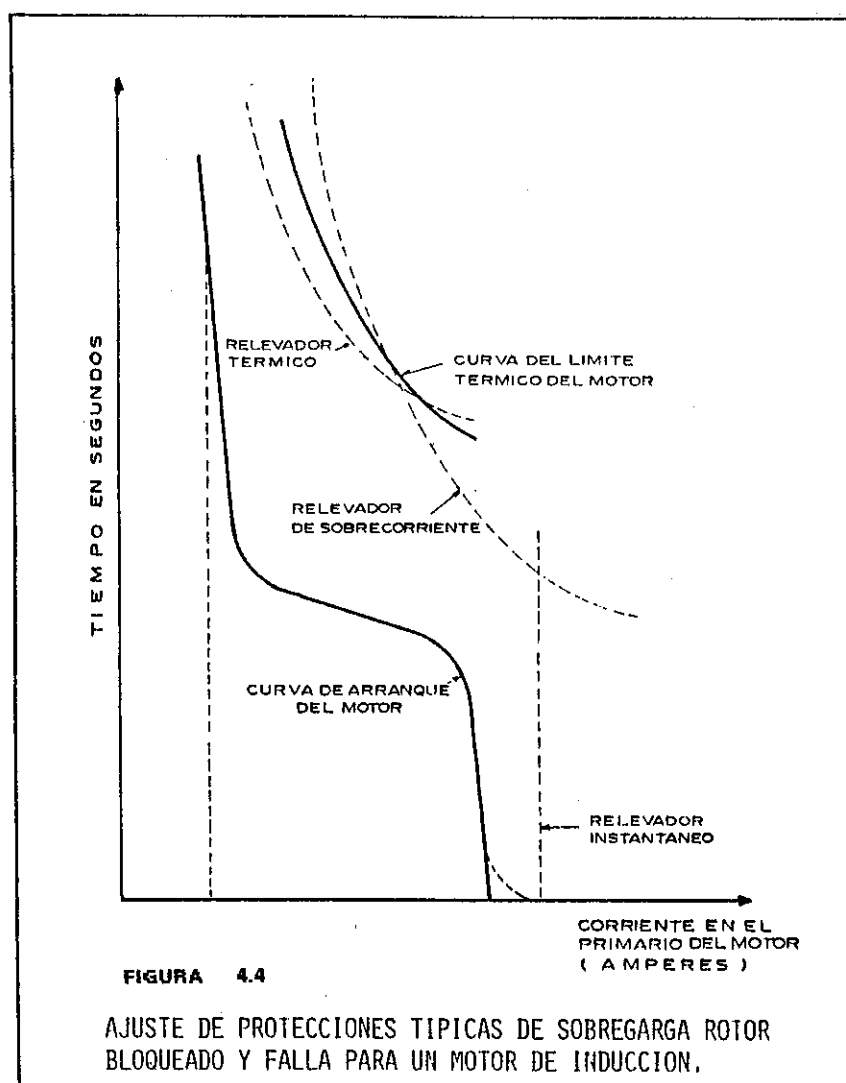
Para motores grandes y calibres de conductores grandes, se usa como alternativa el relevador de falla a tierra en el neutro (50N). Este relevador se debe ajustar sobre cualquier valor anormal de corriente residual que pueda resultar del comporta-

miento diferente de los CT's.

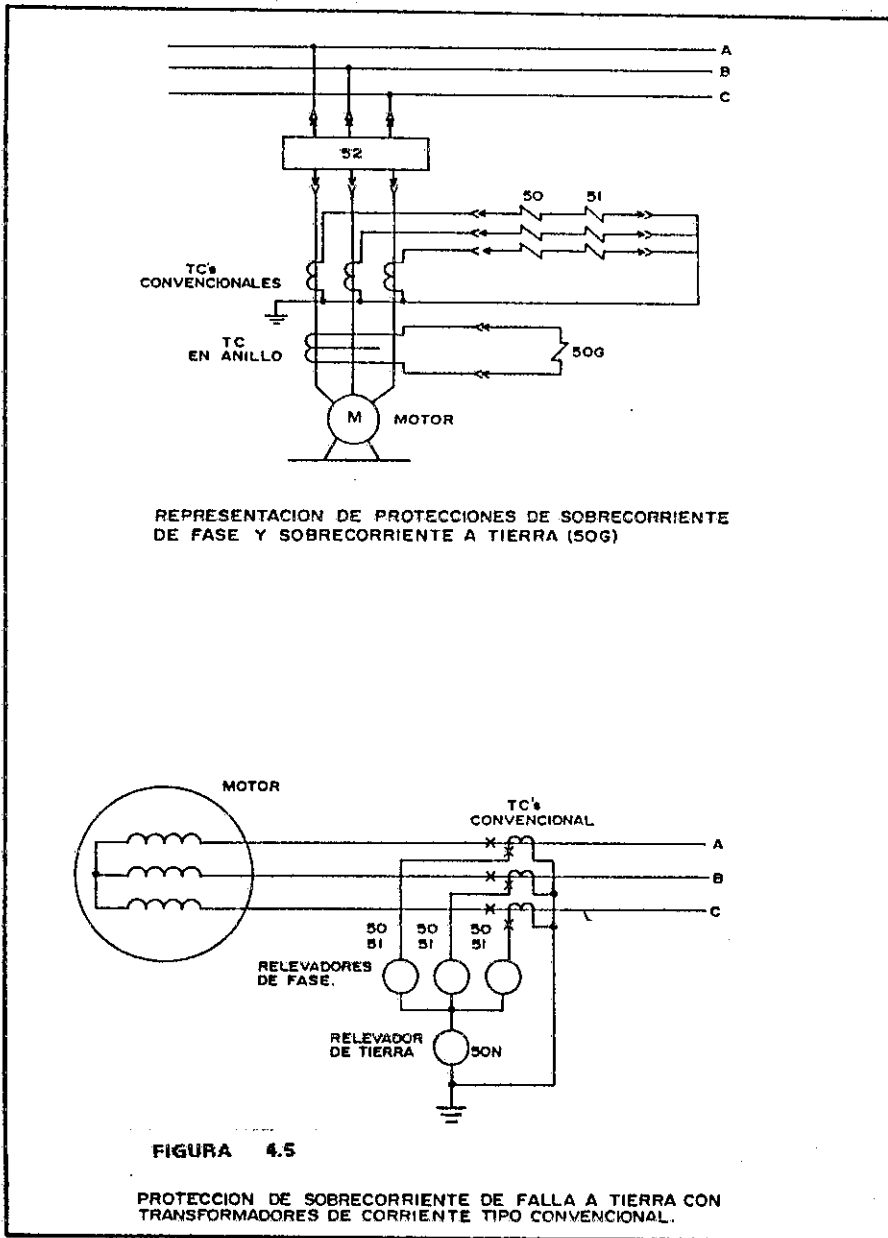
Un ajuste bajo del Tap del relevador 50N y un burden elevado de los CT's, ayudan a reducir la probabilidad de estos errores.

En esta tesis, no se muestran los cálculos complejos de los ajustes de taps, burdens y tiempos, puesto que el enfoque no es de cálculo y ajustes de relevadores (el cual merecería un estudio diferente a este).

Un resumen de las protecciones de efecto térmico y rotor bloqueado se muestran en la figura siguiente:



A continuación, se muestra un ejemplo del empleo del relevador 50G (relevador de tierra).



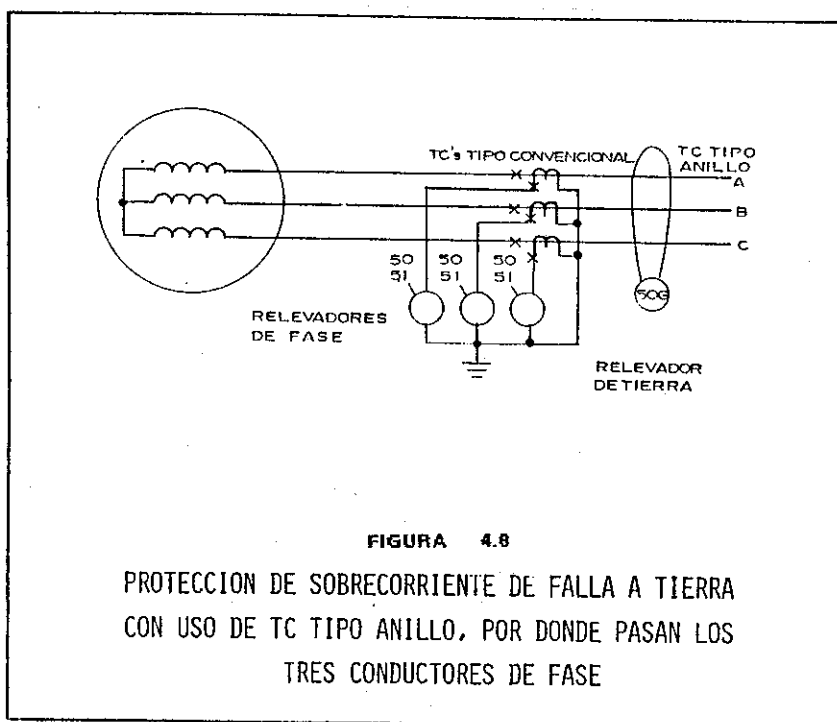


FIGURA 4.8

PROTECCIÓN DE SOBRECORRIENTE DE FALLA A TIERRA
CON USO DE TC TIPO ANILLO, POR DONDE PASAN LOS
TRES CONDUCTORES DE FASE

4.1.3.9. PROTECCIÓN DE BAJO VOLTAJE (27)

El bajo voltaje, en un motor eléctrico, da como resultado una alta corriente, e incluso provoca fallas en el arranque o problemas para alcanzar su velocidad nominal, o bien, puede ocasionar pérdida de velocidad y por lo tanto, salida de servicio. Por esta razón, se recomienda que esta protección acompañe al arrancador del motor. El relevador de bajo voltaje inverso se recomienda para voltajes bajos, prolongados o como protección de respaldo.

Un aspecto importante que se debe considerar, no sólo en la protección de motores eléctricos, sino en todos los tipos de protección, es que, en la práctica, todos los elementos que intervienen en la protección (relevadores, interruptores, transformadores de instrumento etc.) tienen una ubicación física tal, que normalmente se encuentran distantes unos de otros; por esta razón, es necesario interconectarlos.

Considerando, además, que los instrumentos de protección (relevadores) y medición (amperímetros, voltímetros, etc), se encuentran normalmente en tableros, es necesario interconectarlos entre sí. Para esto, se parte del diagrama unifilar del

circuito, luego se realiza el diagrama trifilar en donde se representen todos los componentes, luego se establece un código de identificación de terminales entre los elementos que se van a interconectar, de manera que exista correspondencia entre ellos. La asignación de este código y la manera de interconectarlos obedece a reglas normativas y convencionales.

En la siguiente figura, se muestra un diagrama unifilar y trifilar de un motor trifásico de 600 HP.

El circuito está formado por la acometida con un transformador "estrella-delta" de 7500 kVA, 13,800 V / 2300 V, 3 ϕ , 60 Hz, seguida de un interruptor (52), el cual es un dispositivo que se usa para cerrar e interrumpir un circuito de corriente alterna en condiciones normales o para interrumpir el circuito en condiciones de falla o emergencia (códigos según IEEE). Además, pueden observarse protecciones con relevadores (51), (51N) y un amperímetro (A).

DIAGRAMA UNIFILAR/TRIFILAR

FIGURA 4.7

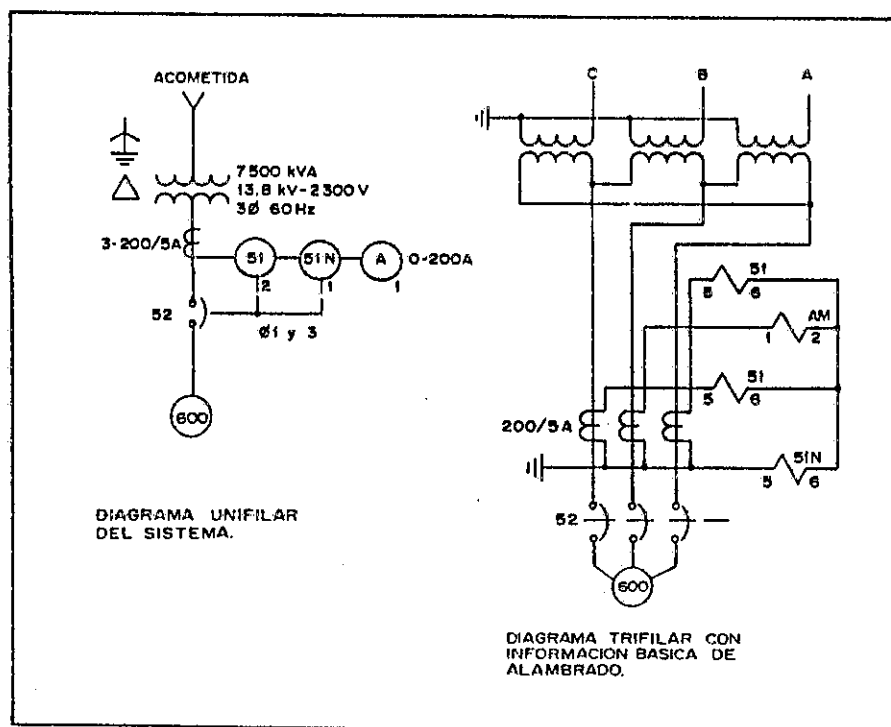
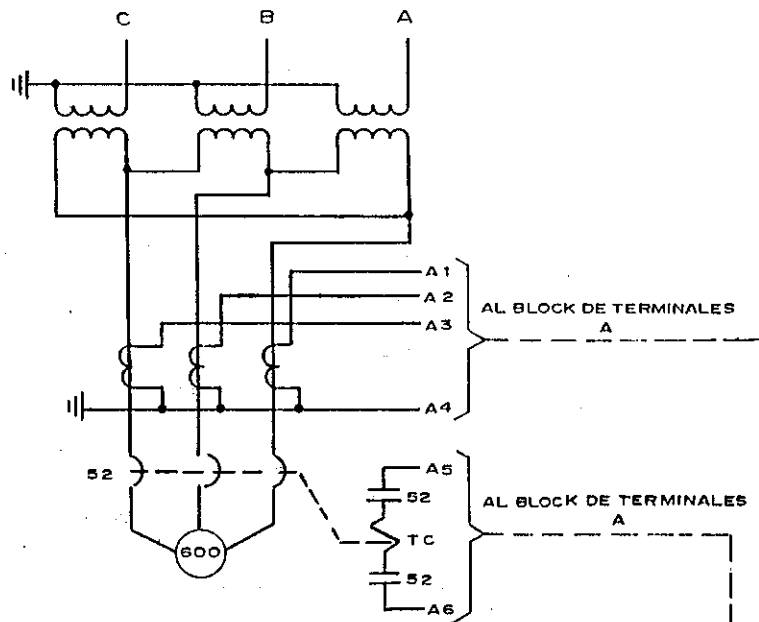


DIAGRAMA DE CONEXIONES USANDO UN CÓDIGO DE DESIGNACIONES



DESIGNACION DE CONEXIONES PARA TRANSFORMADORES DE CORRIENTE Y CONDUCTORES AL INTERRUPTOR (52) HACIA EL BLOQUE DE TERMINALES .

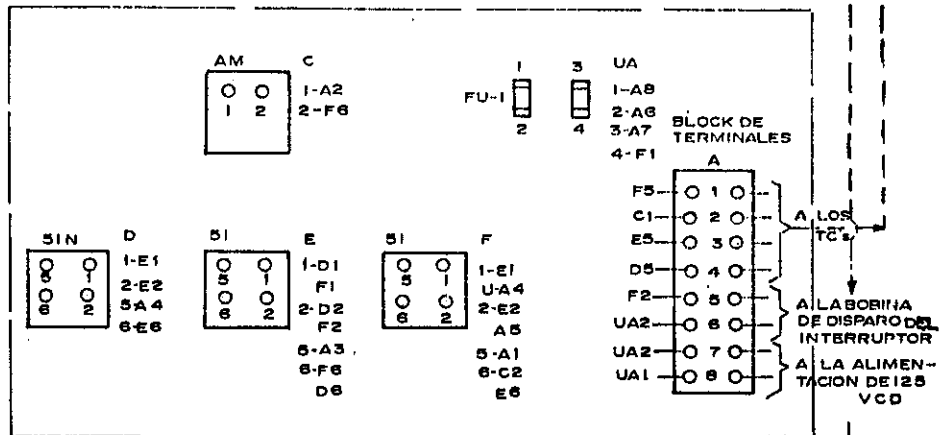
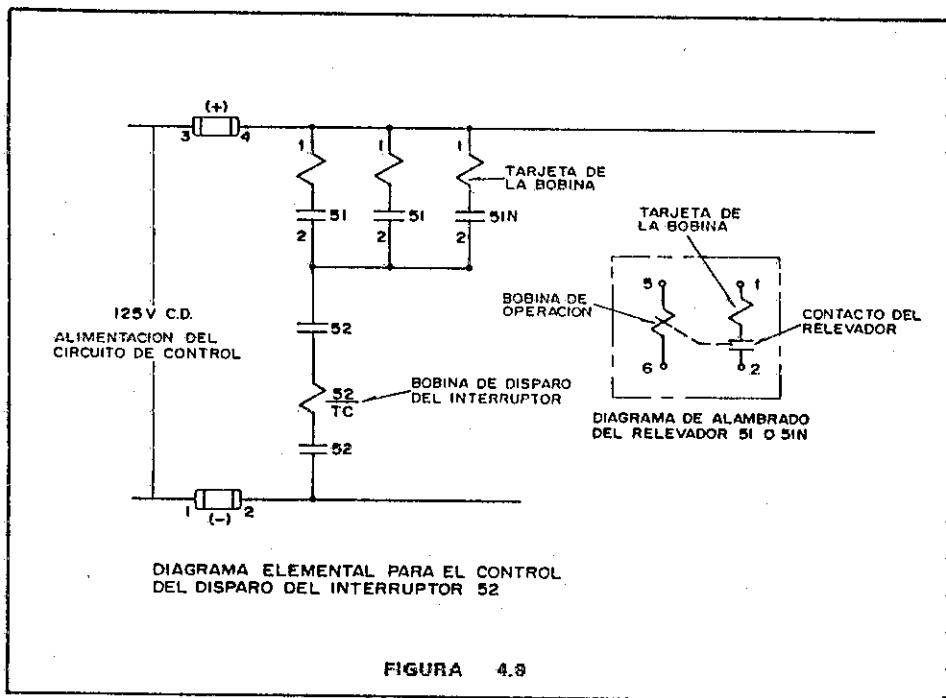


DIAGRAMA DE CONEXIONES USANDO UN CODIGO DE DESIGNACIONES .

FIGURA 4.8



EJEMPLO 1

Determinar los ajustes del relevador para proporcionar protección contra rotor bloqueado, sobrecarga y sobrecorriente para un motor de inducción que tiene los datos siguientes: 6000 HP, 6.6 Kv, 1200 rpm, Factor de Servicio= 1
 $I_{pc} = 568$ A, (corriente de plena carga), $I_{rb} = 3349$ A (corriente a rotor bloqueado). Máximo tiempo de aceleración = 15 seg.

El relevador que se debe usar tiene la característica de tiempo inverso y su curva se indica a continuación.

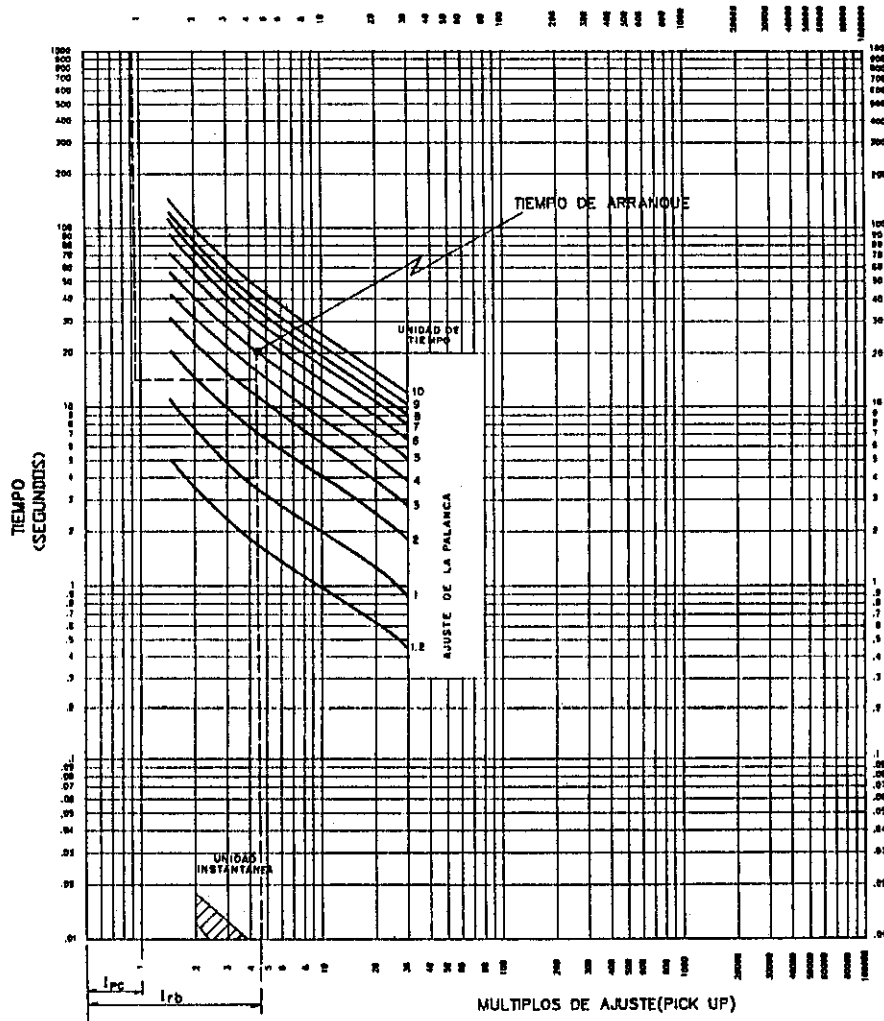


FIGURA 4.10

CURVA CARACTERISTICA DEL RELEVADOR DE SOBRECORRIENTE DE TIEMPO LARGO INVERSO GENERAL ELECTRIC IFC 66

La unidad instantánea se ajusta en forma continua de 6 a 150 amperios y los taps en la unidad de sobrecorriente son: 2.5, 2.8, 3.0, 3.5, 4.5, 5.5, 6.0, 6.5, 7.0. Los ajustes de tiempo y las porciones instantáneas del relevador son independientes. La relación de los TC's es:

$$RTC = 800/5.$$

SOLUCIÓN:

A) Para el ajuste de la unidad de sobrecorriente con retraso de tiempo (51).

Para factor de servicio (FS) = 1.0, el ajuste (pick-up), se puede tomar menor o igual al 15% de la corriente de plena carga.

$$\text{Pick-up} \leq 1.15I_{pc} = 1.15 * 568 = 652.3 \text{ A.}$$

La relación de transformación para los transformadores de corriente que alimentan al relevador, es:

$$RTC = 800/5 = 160$$

Por lo tanto, el ajuste (pick up) es:

$$\text{Pick up} = 653.2/160 = 4.08 \text{ A}$$

Se puede tomar:

$$\text{Ajuste (pick up)} = 4.0\text{A}$$

Para encontrar el ajuste de la palanca de tiempo (TD), se procede como sigue:

$$I_{rb}/RTC = 3349/160 = 20.93$$

$$20.93/\text{ajuste} = 20.93/4 = 5.23 \text{ con TAPS múltiplos de 4 A}$$

Finalmente se trazan juntas las curvas del relevador y la curva de arranque del motor. (ver figura anterior)

$$I_{pc}/(RTC * \text{Tap}) = 568/(160*4) = 0.89$$

Por lo tanto, el ajuste de la palanca de tiempo (unidad de tiempo, ver figura anterior) es $T_d = 5$.

B) Para el ajuste de la unidad de sobrecorriente con disparo instantáneo, se establece el siguiente criterio:

$$2 I_{rb} \leq I (\text{pick up}) \leq 13 I_{pc}$$

$$6698 \leq I (\text{pick up}) \leq 7384$$

Si se selecciona 7000 A, el ajuste será

$$\text{Ajuste} = 7000/\text{RTC} = 7000/160 = 43.75 \text{ A}$$

$$0 \text{ también } 43.75/4 = 10.9 \text{ Múltiplos del TAP 4A}$$

Ahora consideraremos los ajustes de las protecciones de un motor de inducción de una bomba de agua de alimentación. El motor trifásico tiene las siguientes características:

Tensión nominal (V_n) = 6.6 kv.

Corriente nominal (I_n) = 495 A.

Corriente a rotor bloqueado (I_{rb}) = 2525 A.

Potencia nominal (P_n) = 6500 HP.

Tiempo de aceleración del motor = 3seg.

Factor de potencia ($\cos \phi$) = 0.98.

Factor de servicio (FS) = 1.0

Las protecciones recomendadas para este tipo de motores, en estas capacidades, se consideran principalmente las siguientes:

51 Sobrecorriente con retardo de tiempo, con relevadores de sobre corriente de tiempo inverso.

50 Sobrecorriente instantáneo.

50G Sobrecorriente de falla a tierra con operación instantánea.

49 Sobrecarga (térmico).

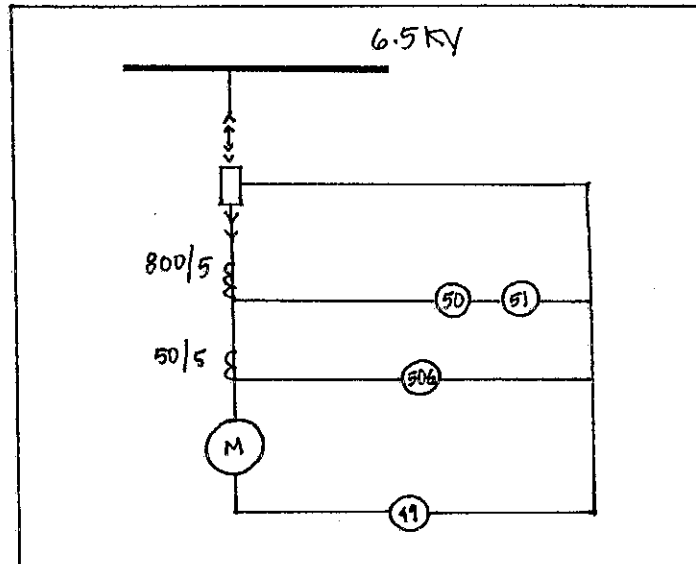


FIGURA 4.11 PROTECCION CARACTERISTICA EN UN MOTOR

Los relevadores seleccionados para el esquema de protección, tiene las siguientes características:

- 50 Sobrecorriente instantáneo, marca Westinghouse, rango 20-80A (tipo SC).
- 51 Sobrecorriente con retardo de tiempo, marca Westinghouse, rango 1-12A (tipo CO-5).
- 50G Sobrecorriente instantáneo de falla a tierra, marca Westinghouse, rango 0.5-1.0 A (tipo 1TH)
- 49A Sobrecarga, marca Westinghouse, rango: 50-90°C (tipo DT 3).

Los ajustes de los relevadores se hacen a partir de los siguientes criterios generales:

SOBRECORRIENTE INSTANTÁNEO (50)

La corriente de arranque $I_a \approx 2 * I_{rb}$.

$$I_a = 2 * 2525 = 5050$$

Considerando que los CT's tienen una relación de transformación de 160:

$$RTC = 800/5 = 160,$$

la corriente de arranque en el secundario será:

$$I_{as} = I_a/RTC = 5050/160 = 31.56 \text{ A},$$

por lo tanto, el ajuste del relevador será de 32A, con tap= 32 A.

SOBRECORRIENTE CON RETARDO DE TIEMPO (51)

La corriente de arranque para este relevador = 1.15 a 1.4 In.

El ajuste del tiempo para este relevador se toma como:

$$\text{tiempo} = 0.4 \text{ Seg} + \text{tiempo de aceleración del motor.}$$

EL MARGEN INFERIOR

$$I_{a_{in}} = 1.15 \text{ In} = 1.15 * 495 = 569.25 \text{ A,}$$

por lo tanto, el valor de esta corriente en el secundario del CT es:

$$I_{as} = I_a / \text{RTC} = 569.25 / 160 = 3.5 \text{ A}$$

EL MARGEN SUPERIOR

$$I_{a_{su}} = 1.41 \text{ In} = 1.4 * 495 = 693 \text{ A.}$$

Por lo tanto, la corriente en el secundario del CT será:

$$I_{as} = I_a / \text{RTC} = 693 / 160 = 4.33 \text{ A}$$

Se puede ajustar el tap a un valor de Tap = 4

Con este valor de tap, el valor de la corriente de arranque del relevador es:

$$I_a / \text{In} = \text{tap} * \text{RTC} / \text{In}$$

$$\begin{aligned} I_a / \text{In} &= I_a / \text{RTC} * \text{RTC} / \text{In} \\ &= 4 * 160 / 495 \end{aligned}$$

$$I_a = 1.3 \text{ In} = 1.3 * 495 = 643.5,$$

y se observa que el relevador se encuentra dentro de los límites fijados.

Para el ajuste del tiempo, el instructivo de este tipo de relevador indica que el múltiplo del Tap se calcula así:

$$M = I_{\text{max}} / \text{Tap} = I_{\text{rb}} / \text{Tap} = (2525 / 160) / 4 = 3.9 = 4$$

(I_{max} : I máximo en el secundario del CT)

El tiempo del relevador es:

$$\text{Tiempo} = \text{tiempo de aceleración} + 0.4$$

$$\text{Tiempo} = 3.0 + 0.4 = 3.4 \text{ seg.}$$

Entrando a la curva característica del relevador CO-5 (51), con $M = 4$ y $T = 3.4$, se encuentra que la palanca DT = 1/2; Tal como se muestra en la gráfica siguiente.

AJUSTE AL RELEVADOR 50G

El ajuste de este relevador se hace considerando un desbalance del 10 % de la corriente nominal del motor:

$I_n = 0.1 * 495 = 49.5A$, lo que implica una corriente, en el lado secundario del transformador de corriente (CT),

$I_{as} = I_a/RTC = 49.5/160 = 0.3 A$, por lo que se toma el Tap mínimo del relevador, que es 0.5.

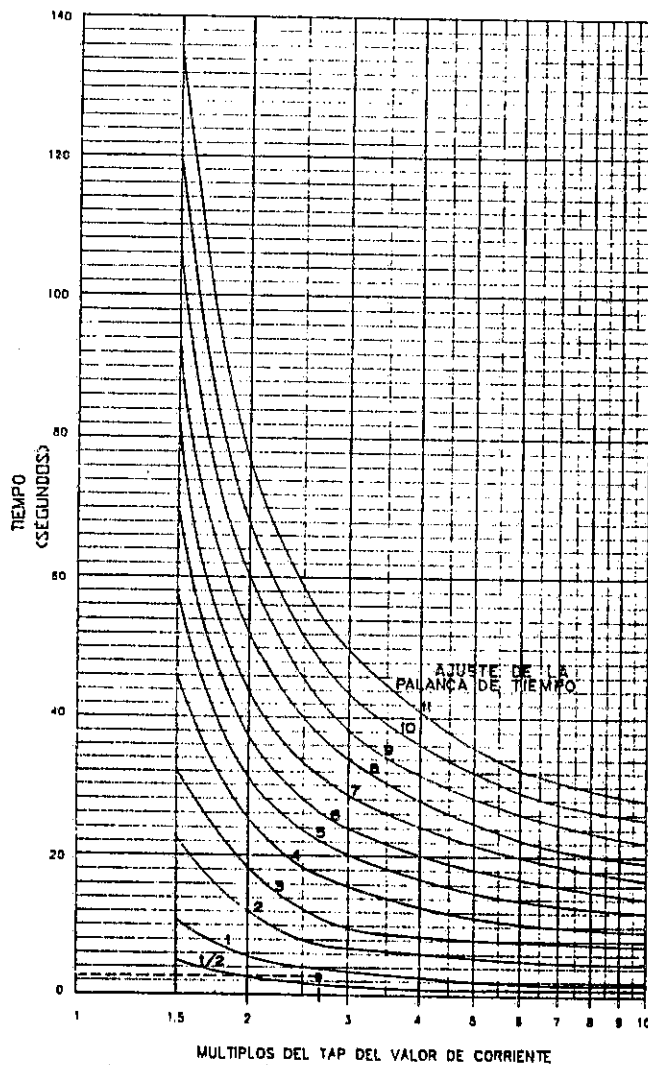


FIGURA 4.12

4.2 PROTECCIÓN DE GENERADORES ELÉCTRICOS

Algunas industrias y centros comerciales pueden incluir, en sus instalaciones, generadores como fuentes locales de energía. Estos generadores pueden proporcionar la energía total requerida o sólo parte de ella, trabajando en paralelo con la red. La aplicación de generadores se puede clasificar como: generador que opera en forma aislada, y grandes generadores industriales.

Los generadores que están operando, en la mayor parte de la industria en nuestro país, son de los que usan potencia mecánica por medio de un motor de combustión interna, acoplados mecánicamente a un generador síncrono. Son fielmente protegidos por medio una serie de circuitos analógicos y digitales: sensores de voltaje y de frecuencia, transductores, temporizadores, detectores de picos, detectores de temperatura, gobernadores electrónicos y mecánicos, etc., que se encuentran incorporados en el tablero de la transferencia o en el panel de control, sin que utilicen los mismos sistemas de protección de los generadores en sistemas eléctricos de potencia.

Las protecciones y alarmas más comunes que presentan este tipo de generadores industriales (MOTOR-GENERADOR) son:

- a) corto circuitos,
- b) ausencia de fase,
- c) bajo o alto nivel de voltaje,
- d) baja o alta frecuencia,
- e) alta temperatura,
- f) over crank o sobre arranque (bloquea el arranque del motorgenerador si falló en sus primeros 2 intentos de arranque),
- g) over speed o sobrevelocidad (controlando la frecuencia),
- h) sobrecarga,
- i) bajo nivel de combustible,
- j) bajo voltaje de batería de arranque,
- k) bajo nivel de aceite,
- l) corte de Banda (faja del radiador).

Lo práctico, lo relativamente económico, lo compacto y la seguridad de estos generadores, hace que la mayor parte de las

industrias utilicen este tipo de energía auxiliar.

Debido a lo anterior, en este trabajo de tesis, no nos extenderemos en la protección de generadores por relevadores en instalaciones industriales, puesto que son de especial aplicación en los sistemas eléctricos de potencia, pero sí se tratarán los aspectos más importantes para fines de este trabajo.

4.2.1 CLASIFICACIÓN DE LA OPERACIÓN DE LOS GENERADORES

4.2.1.1 GENERADOR QUE OPERA EN FORMA AISLADA

Los generadores sencillos que operan en forma aislada, se usan para alimentar servicios de emergencia o para servicios de "STAND BY", ya que normalmente se encuentran fuera de servicio.

Se operan por períodos de tiempo breves cuando las fuentes normales de suministro fallan (Red comercial) o durante los períodos de mantenimiento y pruebas de inspección. Se conectan a la carga del sistema a través de un interruptor de transferencia automático o a través de interruptores con bloqueo y no operan en paralelo con otras fuentes.

Generalmente estos generadores están accionados por motores Diésel o turbinas de gas con capacidades que van desde unos 100 KW hasta algunos miles de KW (20MW por ejemplo). Los voltajes de generación son usualmente aquellos que se conectan directamente a los niveles de utilización, y dependiendo de la potencia van desde 120/208 V. 440 V, 480/277 V en máquinas pequeñas, y en máquinas grandes de 2.4 KV y 4.16 KV.

4.2.1.2 GENERADORES MÚLTIPLES OPERANDO EN FORMA AISLADA

Esta clasificación consiste en varias unidades que operan en paralelo sin conexión con ninguna fuente de suministro eléctrico. Algunos ejemplos de este tipo de instalaciones son los llamados "Sistemas totales de energía" para proyectos industriales o comerciales, en plataformas petroleras de exploración o en sitios remotos en donde el costo de llevar la energía por métodos convencionales con las compañías suministradoras resulta elevado. La potencia de las unidades

generadoras, en forma individual, puede ir desde unos cientos de KW hasta varios miles de KW, y dependen de la demanda del sistema al que se encuentren conectados.

Las turbinas o primotores son por lo general de gas, ciclo combinado o diésel. Estos sistemas, aun cuando se operan en forma manual, pueden tener elementos de automatización, ya que los voltajes de generación van de 4.16 Kv a los niveles de distribución de 13.8 Kv.

4.2.1.3 GRANDES GENERADORES INDUSTRIALES

Estos, por lo general, constituyen bloques importantes de potencia que operan en paralelo con las compañías suministradoras de energía en la modalidad denominada "COGENERACIÓN".

En estos casos, la mayor parte de la generación producida es utilizada por la propia industria, y por lo general, se emplean en industrias cuyos procesos producen vapor para ser usados en turbinas de este tipo. Es el caso de la industria azucarera, Petroquímica y papelera. El tamaño de los generadores se puede encontrar en el rango de 10 MVA a 50 MVA y su operación es prácticamente continua y cercana a su capacidad máxima.

El elemento primotor es una turbina de vapor, o bien turbina de gas, que depende del combustible disponible de acuerdo con el proceso industrial. Los voltajes de generación están típicamente en el rango de 12.4 Kv a 13.8 Kv.

4.2.2. LAS BASES PARA LA PROTECCIÓN DE LOS GENERADORES ELÉCTRICOS

Los generadores de corriente alterna necesitan protección contra un cierto número de condiciones, algunas de las cuales requieren de desconexión inmediata, y algunas otras se les puede permitir continuar por un cierto tiempo. En términos generales, las fallas del generador están relacionadas principalmente con fallas en los aislamientos, y éstas requieren de desconexión rápida, en tanto que las que no lo requieren, se asocian a condiciones de operación anormales.

En la protección de los generadores eléctricos, se debe considerar que las fallas de aislamiento que pueden requerir de

desconexión rápida, pueden ocurrir en el estator o en rotor.

Por otra parte, existen otras fallas externas a los devanados del generador, que están asociadas con la forma de conexión del neutro a tierra en los mismos, como es el caso de las fallas a tierra.

Es conveniente hacer notar que el tipo de relevadores y esquemas de protección usados en los generadores para instalaciones industriales, es similar al usado para los grandes motores eléctricos, y ésta es una de las razones por las que se trata después de la protección de motores.

4.2.3. ESQUEMAS DE PROTECCIÓN RECOMENDADOS

Una forma de establecer estos esquemas es por tamaño de máquina, y para dar una idea de orden de magnitud, éstas se pueden agrupar como sigue:

- 1) Pequeños-generadores hasta 1000 KVA máximo y tensión hasta 600 voltios, o bien, con potencia máxima de 500KVA y sobre los 600V.
- 2) Medianos-generadores desde tamaños pequeños, hasta 12500KVA, sin importar el voltaje.
- 3) Grandes-generadores, desde tamaños medios, hasta aproximadamente 50MVA.

Esta clasificación es para dar una idea de donde ubicar el esquema de protección para un generador determinado, pero desde luego, la decisión final corresponde a cada proyecto en particular, y dependen de la importancia de la máquina dentro del sistema y de la confiabilidad deseada.

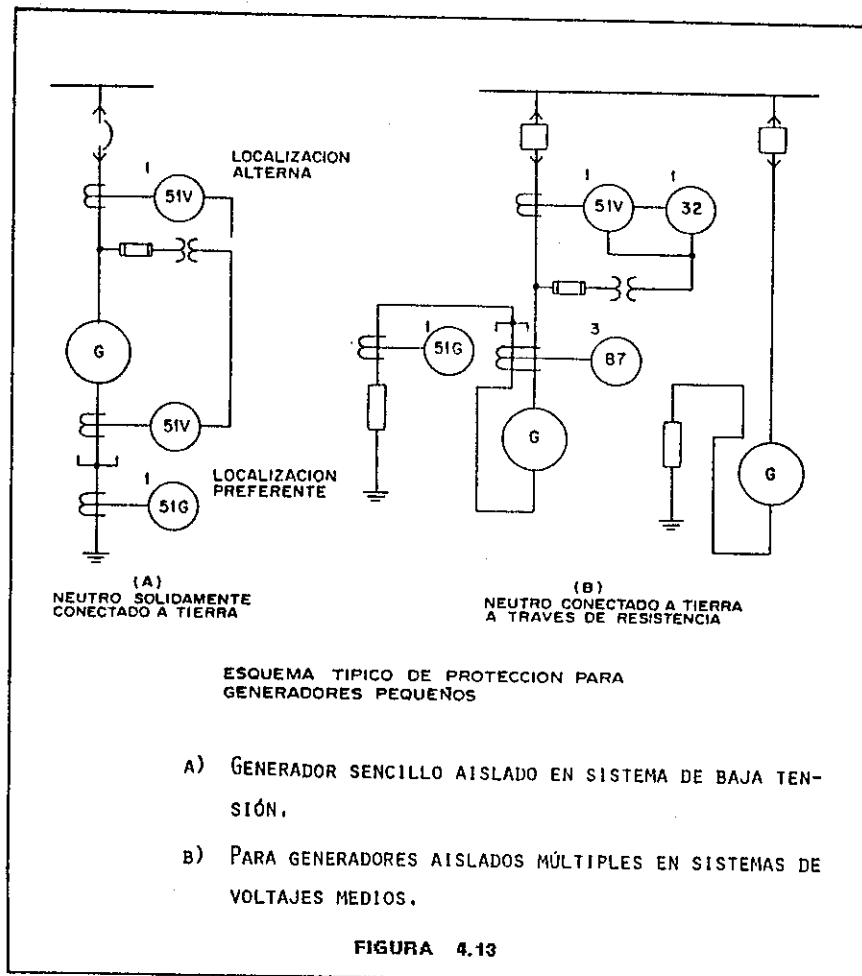
4.2.3.1. GENERADORES PEQUEÑOS

El esquema básico para la protección de generadores pequeños que operan como una máquina sencilla aislada, es el que se muestra en la figura siguiente y consiste de:

1. El dispositivo 51G, que es un relevador de tiempo para

sobrecorriente (de respaldo).

2. El dispositivo 32 que es un relevador de potencia inversa para protección contra la motorización.
3. El dispositivo 87 es un relevador de sobrecorriente instantáneo que proporciona una protección diferencial de autoequilibrio.

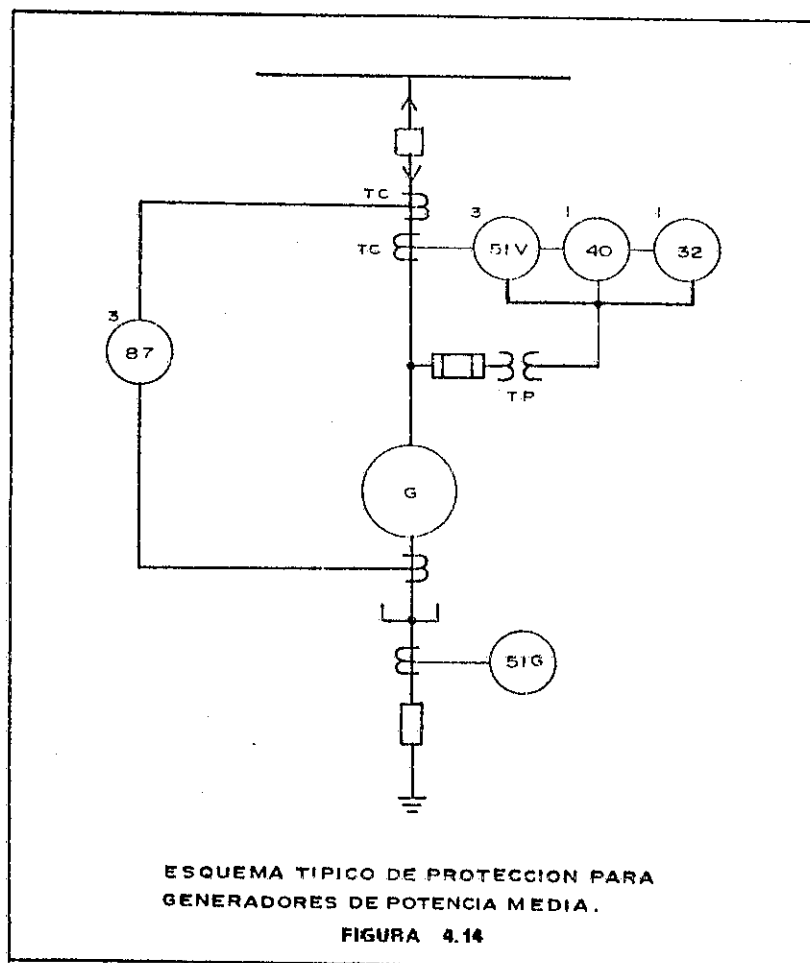


4.2.3.2. GENERADORES DE TAMAÑO MEDIANO

Al esquema básico de protección para este tipo de generadores, se muestra en la figura siguiente, y consiste de:

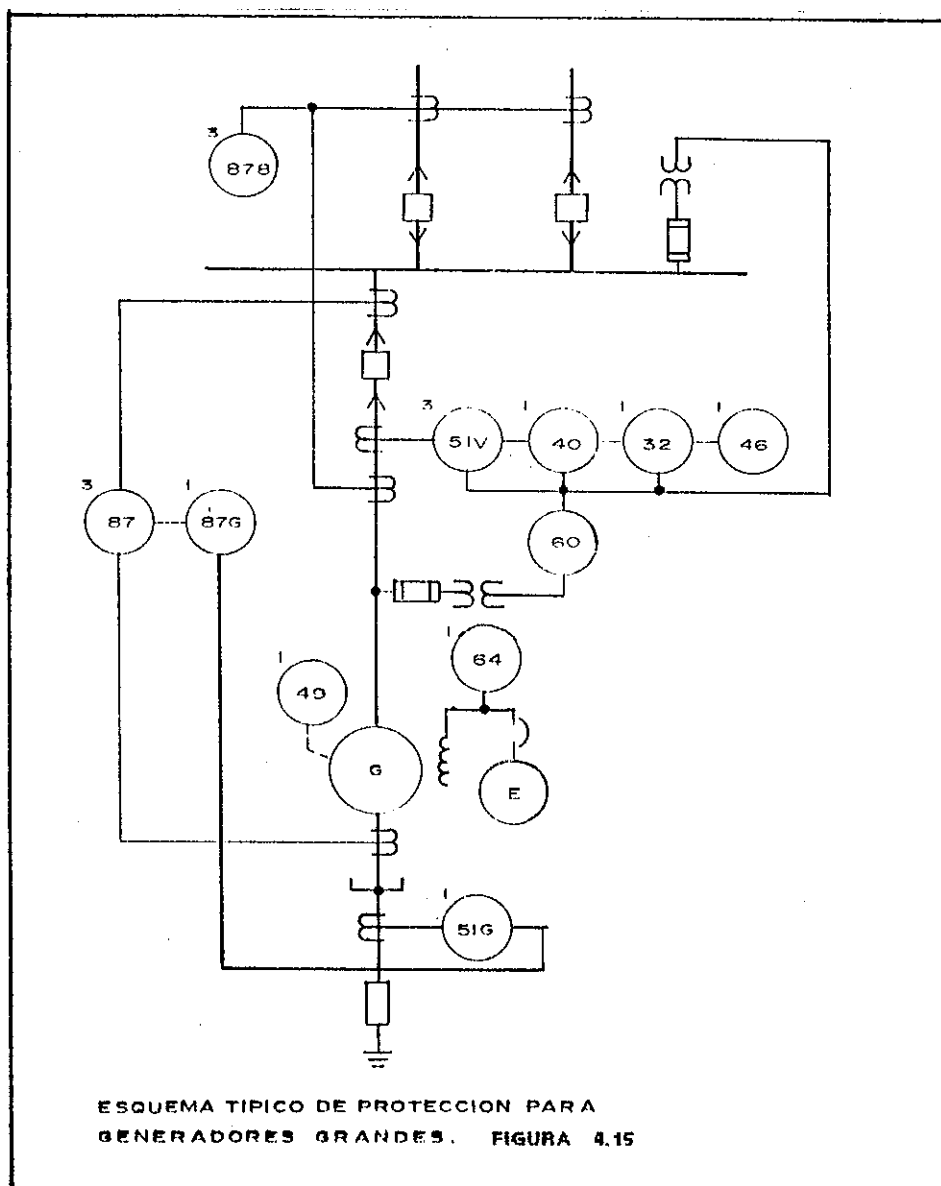
1. Dispositivo 51V, que es un relevador de sobrecorriente de respaldo, con restricción de voltaje o del tipo de voltaje controlado.

2. Dispositivo 51G, que es un relevador de sobrecorriente de tiempo.
3. Dispositivo 40, que es un relevador de impedancia tipo MHO para protección contra pérdida de campo.
4. Dispositivo 46, que es un relevador de sobrecorriente de secuencia negativa para protección contra condición de desbalance. (El desbalance de corrientes en las fases del generador, produce corrientes de secuencia negativa; estas corrientes giran en una secuencia de fase opuestas a la dirección de la corriente normal o de secuencia positiva).
5. Dispositivo 87, que es un relevador diferencial del tipo porcentaje fijo o variable, de alta velocidad o tipo estándar.



4.2.3.3. GENERADORES GRANDES

En las aplicaciones industriales, es decir, no formando parte de un sistema eléctrico de potencia, un generador denominado de tamaño "grande"; en este campo de aplicación específico, debe llevar la siguiente protección básica recomendada.



1. Dispositivo 51V, que es un relevador de sobrecorriente de respaldo tipo voltaje restringido o voltaje controlado.
2. Dispositivo 51G, que es un relevador de protección de falla a tierra con retardo de tiempo.
3. Dispositivo 87, que es un relevador diferencial porcentual del tipo de alta velocidad.
4. Dispositivo 87G, que es un relevador diferencial a tierra tipo direccional.
5. Dispositivo 40, que es un relevador MHO para protección contra pérdida de campo.
6. Dispositivo 46, que es un relevador contra sobrecorriente de secuencia negativa producida por corrientes de desbalance.
7. Dispositivo 49, que es un relevador de temperatura para monitorear la temperatura del devanado del estator.

CAPITULO V

COORDINACION DE PROTECCIONES EN INSTALACIONES INDUSTRIALES

5.1 GENERALIDADES PARA LA COORDINACION EN MEDIANA Y BAJA TENSIÓN

Como se ha mencionado antes, la función de los dispositivos de protección es la detección de las condiciones de falla y el aislamiento del problema tan rápido como sea posible.

La aplicación correcta de estos dispositivos de protección depende de varios factores que involucran estudios y experiencias en la protección.

El estudio de la COORDINACION de protecciones es bastante extensa y requiere de un estudio detallado y minucioso. En este trabajo de tesis, se tratará este tema en una forma general; se abarcarán los puntos más importantes para el enfoque de esta investigación.

Recordemos que los relevadores son elementos que indican en qué momento debe realizarse una función protectora, y para esto, trabajan conjuntamente con interruptores de potencia, los cuales son los encargados de llevar a cabo la desconexión eléctrica.

Un sistema eléctrico de potencia industrial ideal debe ser un sistema "selectivo"; para cumplir con el requisito de ser selectivo, los dispositivos de protección deben ser dimensionados y coordinados con otros, de manera que opera primero sólo el dispositivo de protección que se encuentre más cercano a la falla. Si por alguna razón falla esa protección, entonces debe operar la siguiente, y ver el arreglo de fuente hacia la falla, y así sucesivamente.

Para lograr una operación selectiva, se deben tener cuidado de seleccionar los dispositivos de protección con las características interruptivas apropiadas y el conocimiento de sus

curvas tiempo-corriente.

El proceso de coordinación de protecciones se inicia con la elaboración de un diagrama unifilar del sistema que se va a coordinar. En este diagrama, se deben indicar los datos principales de los equipos, como son: niveles de voltaje en cada barra, potencia e impedancia de los transformadores de potencia, longitud y calibre de los conductores, potencia y voltaje de motores, localización y potencia en centros de control de motores, datos generales de transformadores de corriente y transformadores de potencial.

5.2 PROCESO DE COORDINACION DE LOS DISPOSITIVOS DE PROTECCIÓN

En la actualidad, se puede realizar todo el proceso de coordinación de protecciones a base de programas digitales desarrollados, en la mayoría de los casos, para computadoras.

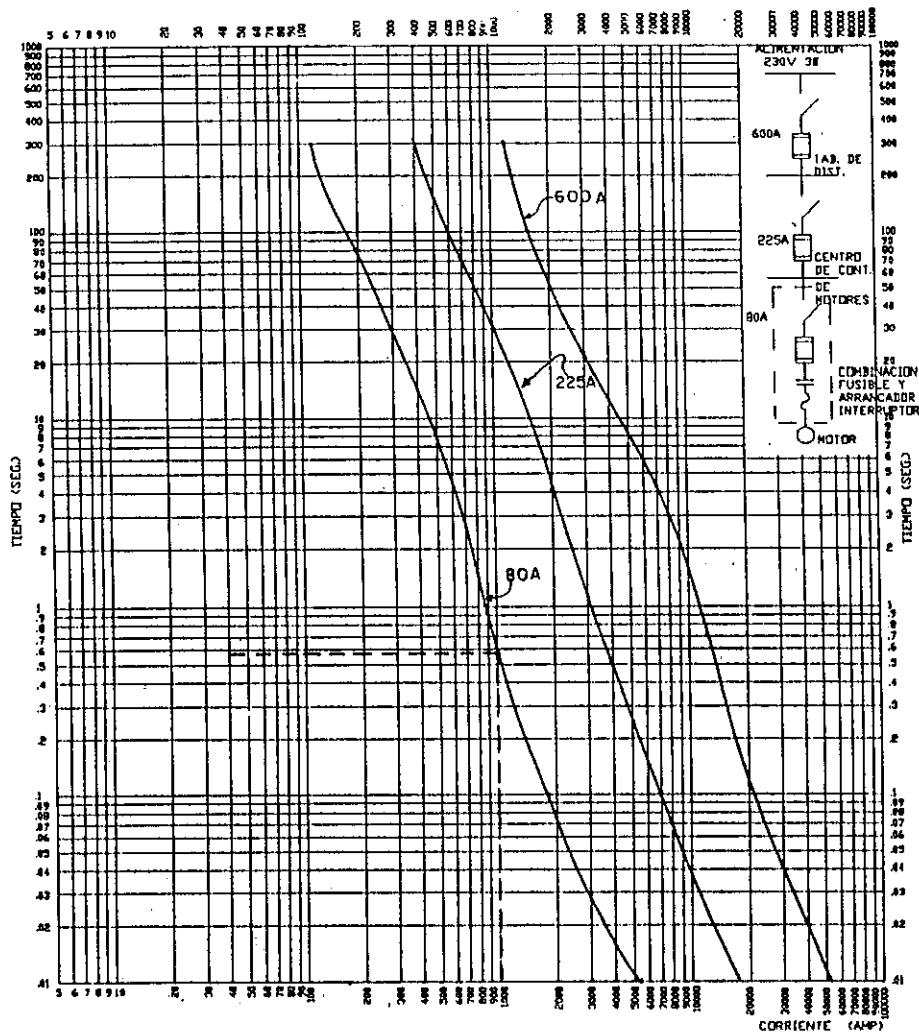
El procedimiento de coordinación de protecciones es prácticamente el mismo; se utiliza en instalaciones industriales de baja tensión o en mediana tensión, y consiste en el "análisis gráfico". Este método involucra el graficado de las curvas características de los dispositivos de sobrecorriente que se encuentren en serie entre si, para verificar si alguna de las gráficas se traslapa, lo que podría indicar que el proceso no es selectivo.

Como un ejemplo, se muestra el caso de la alimentación a un motor en baja tensión y en cuyo circuito se encuentran tres fusibles (de 80, 225 y 600 amperios), todos con características con retardo de tiempo.

El proceso se inicia, en este ejemplo, dibujando las curvas "promedio" de función de cada uno de los fusibles en papel Log-Log, indicando sobre el eje "x" la corriente en "amperios" y sobre el eje "y", el tiempo en segundos. Las gráficas de cada fusible son proporcionadas por el fabricante.

Después de dibujar las curvas, se muestra que si ocurre una falla cuyo valor es 1000 A en las terminales del motor, el fusible de 80A, de la combinación fusible-desconectador y arrancador para el motor, se debe fundir en aproximadamente 0.55 segundos y de esta manera interrumpe la falla, antes de que se

fundan los fusibles de 225 o 600 amperios, con lo cual se retira de servicio sólo el motor en condiciones de falla obteniéndose la selectividad.



CURVAS DE COORDINACION DE FUSIBLES

FIGURA 5.1

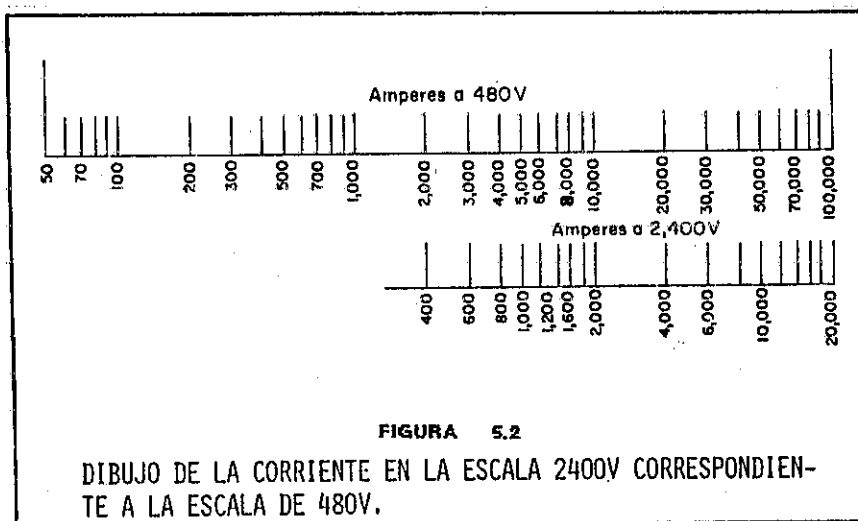
NOTA: LOS FUSIBLES SON DE TIEMPO RETARDADO.

Para dibujar las curvas de coordinación, éstas se deben obtener de los fabricantes y la técnica que se describe a continuación se repite para cada caso. La forma más conveniente de dibujar las curvas, es trazarlas preparadas sobre hojas blancas de papel estándar, tipo LOG-LOG. En el proceso de trazo, puede ser muy útil el uso de una mesa con fondo iluminado, o bien, colocar el papel en una ventana contra la luz; esto es para lograr la máxima transparencia y poder copiar las gráficas.

Las curvas deben ser dibujadas en forma apropiada, una contra otra, basándose en la corriente que cada una puede "ver". Se debe poner particular atención en los dispositivos que se aplican con niveles distintos de voltaje. Cuando esto ocurre, se adopta el establecimiento de diferentes escalas de corriente sobre la misma hoja de gráficas.

Por ejemplo, si aparece un transformador en el diagrama unifilar de los elementos a ser coordinados, y este transformador tiene un voltaje primario de 2400V y un voltaje secundario de 480V, entonces $2400/480 = 5$, es decir, tiene una relación de 5 a 1; si la escala de corriente se dibuja a 480V (para estar de acuerdo con la mayoría de equipo), un valor de corriente de 2000A en el lado de 480V corresponde a una corriente de $2000/5 = 400A$ en el lado de 2400V, es decir, en la escala correspondiente a 2400 V, y se mantiene así la misma relación de escala con la que se trabajará.

A continuación, se muestra el dibujo de la corriente de la escala de 2400V correspondiente a la escala de 480V.



Una vez que el papel que se usa para el trazado se ha preparado con escalas adicionales de corriente, si es necesario, y las curvas a ser usadas se han dibujado todas, la curva del dispositivo que está más distante de la fuente, se debe dibujar

primero, y después se dibuja la curva del siguiente dispositivo para determinar si existe algún traslape; si no ocurre, entonces se dibuja la curva del siguiente dispositivo, y así sucesivamente.

Un ejemplo típico se muestra en la figura siguiente, en donde se incluye la curva de un relevador de la compañía suministradora de energía eléctrica.

Durante la operación de trazado de las curvas, la escala de tiempo sobre las escalas de corriente de las curvas que están siendo dibujadas, deben estar de acuerdo con las escalas de corriente y tiempo de la hoja de papel Log-Log usadas para este fin.

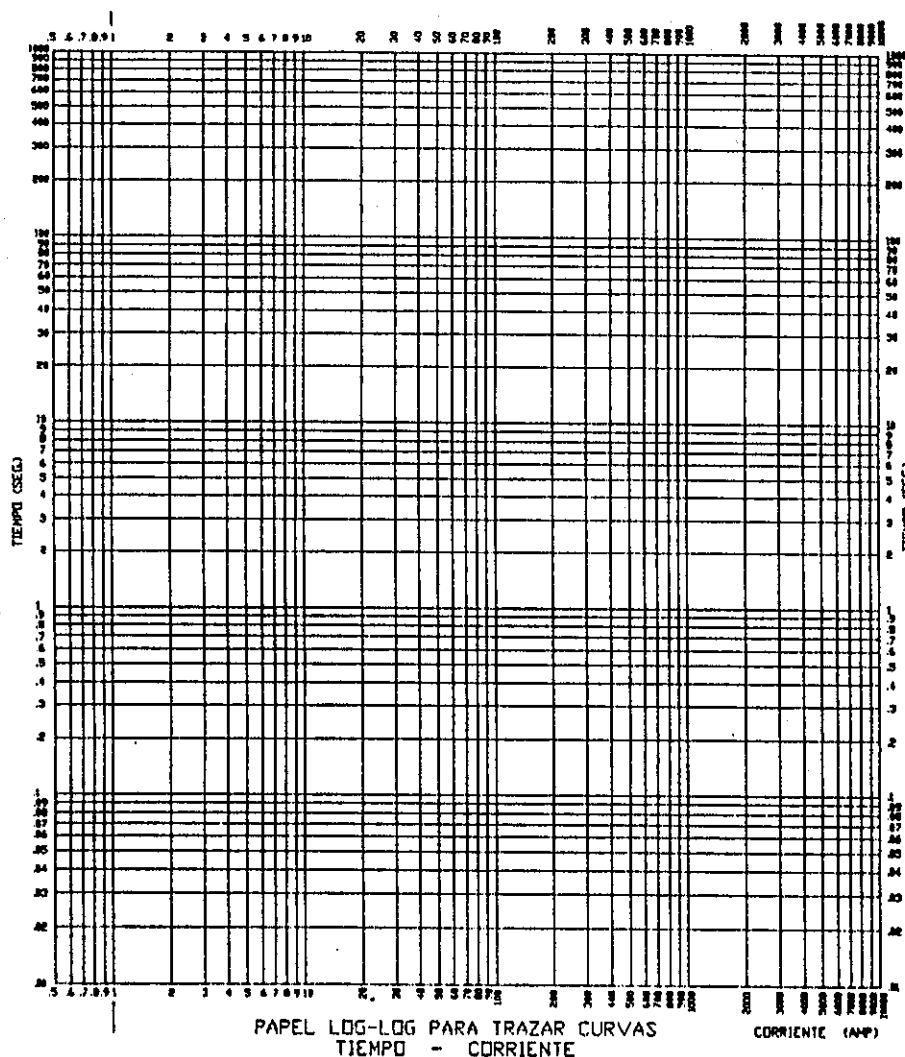
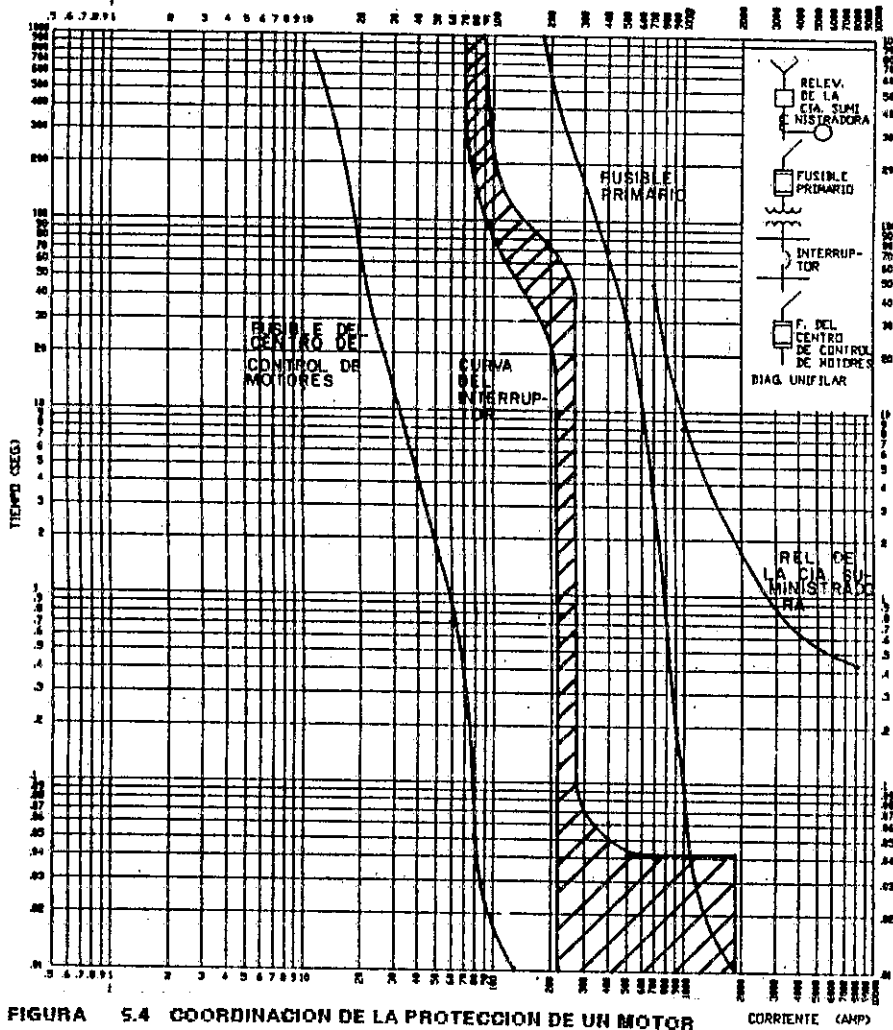


FIGURA 5.3

Las curvas para los interruptores se dibujan por lo general en forma diferente a las escalas indicadas, usando el valor de "porcentaje de la corriente nominal" en lugar de amperios. Por ejemplo, si el interruptor que va a ser usado tuviera una capacidad continua de 800 A, entonces la línea de 100%, sobre la curva del interruptor a su escala, se debe construir con la línea de 800A, sobre el trazo de la escala, antes de trazar la curva.



Si durante el estudio de coordinación, las curvas se sobreponeen o cruzan, o si no hay suficiente espacio entre las

curvas, entonces se deben ensayar con distintos dispositivos o distintos ajustes entre los dispositivos para asegurar la selectividad. De hecho, el proceso de coordinación de protecciones se puede interpretar como un trabajo repetido de "prueba y error", mediante el cual varias curvas características tiempo-corriente, de los elementos en serie del sistema, se acomodan unas respecto a otras en la curva total; de esta manera, se satisfacen las limitaciones que los dispositivos de protección imponen unos a otros.

Otras limitantes en el proceso de coordinación de protección son:

1. las corrientes de arranque de los motores eléctricos,
2. las corrientes de carga,
3. los límites térmicos de los equipos,
4. las curvas de daño de transformadores.

El objetivo que se persigue es que los relevadores, fusibles, interruptores y dispositivos de protección, puedan operar dentro de estas limitaciones y proporcionen la coordinación selectiva.

Las curvas deben mostrar un espacio claro entre las características de los dispositivos de protección que operen en serie, para obtener una operación selectiva. No se deben cruzar las curvas. Para variar el ajuste de la corriente de operación, se desplaza la curva en el sentido horizontal y para modificar el ajuste del tiempo se desplaza en el sentido vertical.

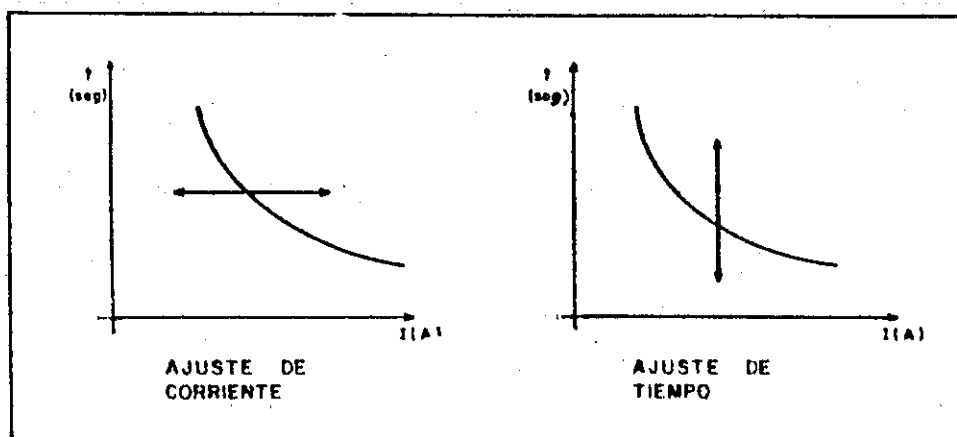
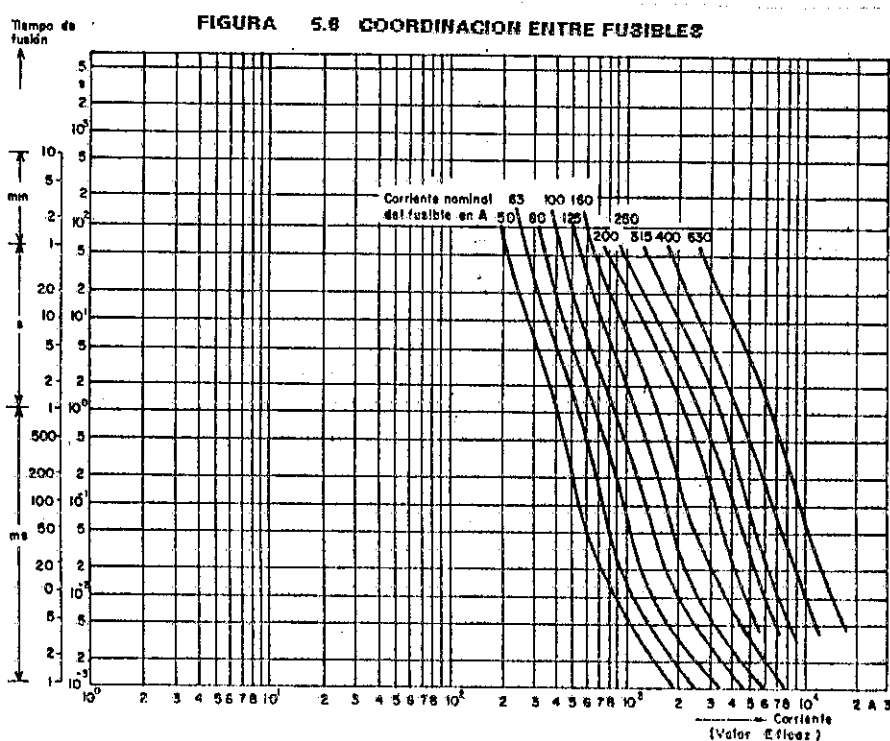


FIGURA 5.5 FORMAS DE AJUSTE DE CORRIENTE Y TIEMPO

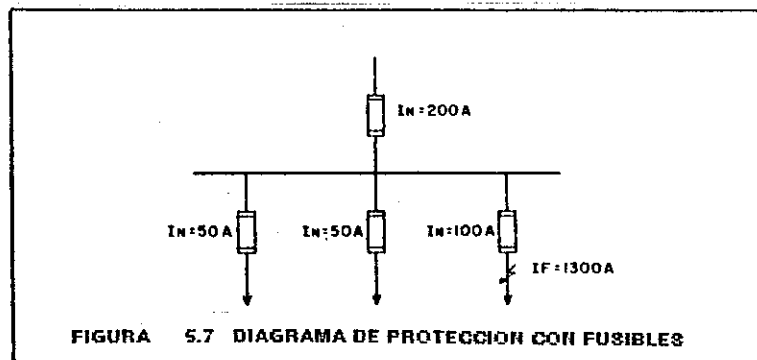
5.3 SELECTIVIDAD ENTRE FUSIBLES CONECTADOS EN SERIE

En sistemas radiales simples, en una barra colectora considerada como un nodo del sistema, las líneas de alimentación y las derivaciones salientes llevan corrientes de distinto valor, y pueden tener también distintos calibres de conductores, por lo que los fusibles de protección tienen diferentes valores de corriente nominal. En caso de falla, se puede presentar la situación de que circule por dos fusibles la misma corriente, por lo que la regla básica de selectividad entre fusibles, se puede establecer en los siguientes términos.

Dos fusibles conectados en serie se comportan en forma selectiva cuando sus curvas característica de fusión no se tocan y se desplazan una distancia suficiente una de otra. Cuando las corrientes de corto circuito son de un valor elevado, esta regla pierde validez, ya que en este caso, sólo se tiene selectividad cuando el valor $I^2 t$ (valor calorífico de la corriente) durante el tiempo de fusión y de extinción, del fusible más próximo a la falla, es menor que el valor calorífico de la corriente $I^2 t$ del tiempo de fusión del fusible más distante del la falla.



En la figura anterior, se muestra un caso hipotético de coordinación entre fusibles conectados en serie, con valores de corrientes nominales en cada caso y un valor de corriente de corto circuito de 1300A en uno de los circuitos derivados de la barra.



Las curvas tiempo-corriente para los fusibles de 100A (en el ramal de la falla) y 200 A (alimentador principal) se dan a continuación (recuérdese que se trazan en papel Log-Log).

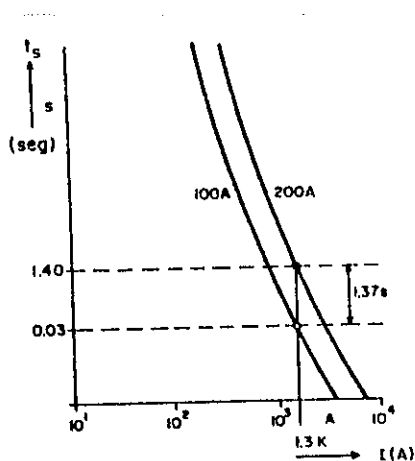


FIGURA 5.8 CURVAS TIEMPO CORRIENTE

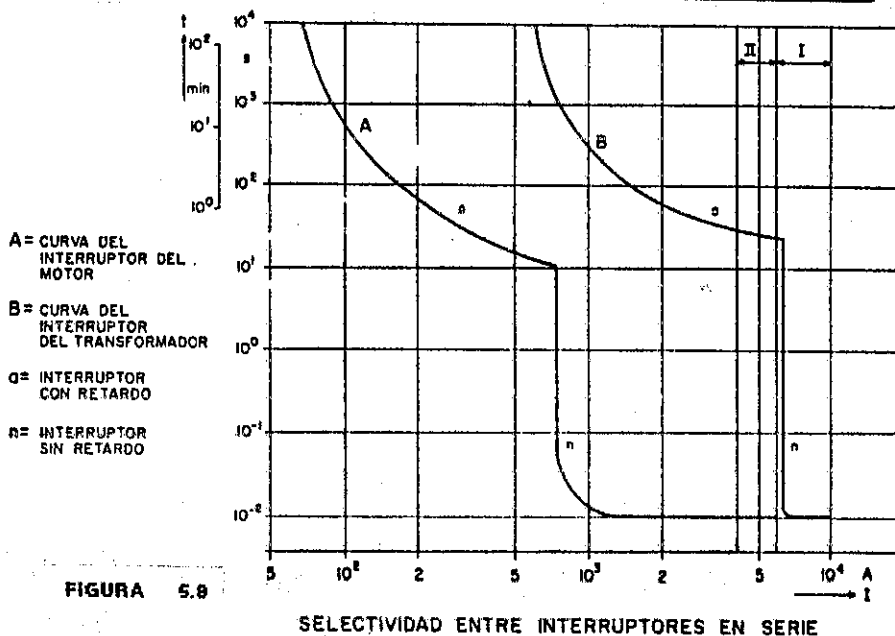
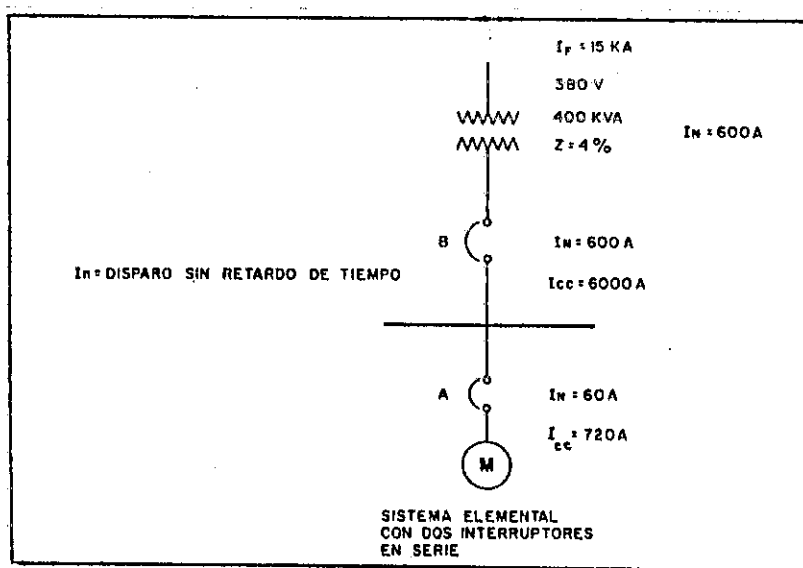
El proceso de coordinación selectiva establece que debe operar primero el fusible de 100 A. para la corriente de falla de 1.3KA, de acuerdo con las curvas anteriores. Esto lo hace en 0.3 seg., mientras que el fusible de 200A opera en 1.40 seg., es decir 1.37 seg. después que es el tiempo de coordinación, que da la selectividad.

5.4 SELECTIVIDAD ENTRE INTERRUPTORES EN SERIE

Esto se refiere principalmente a los interruptores de baja y

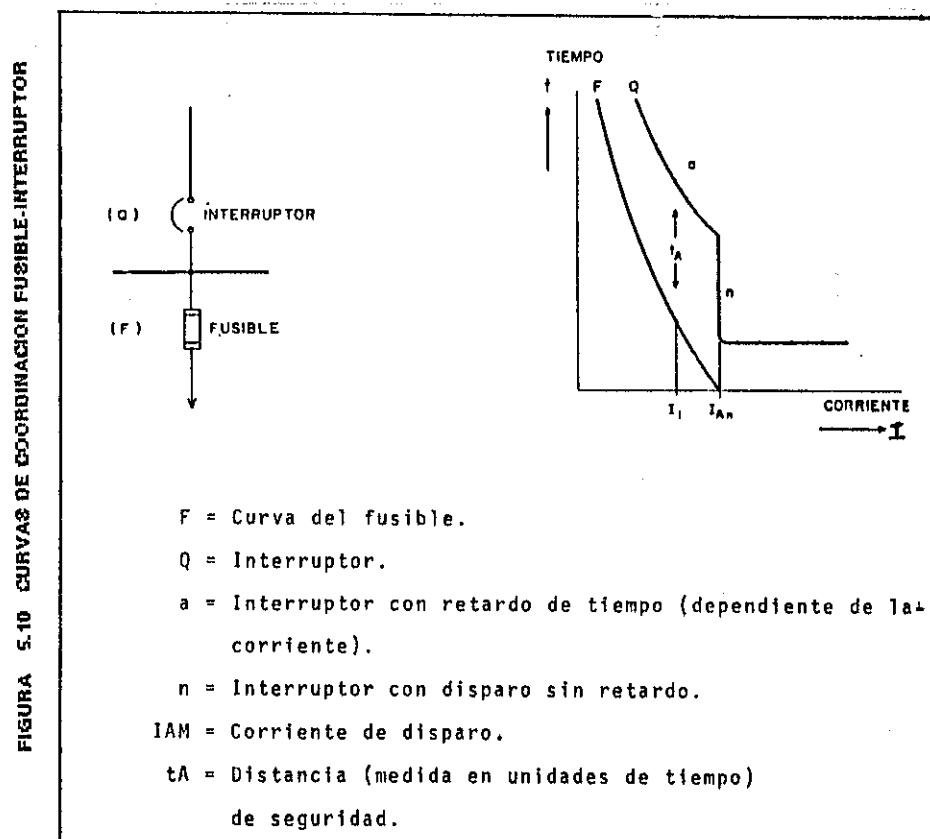
mediana tensión del tipo termomagnético, los cuales se usan para obtener la selectividad mediante el escalonamiento de las corrientes de disparo de los interruptores sin retardo contra sobrecorrientes.

La selectividad por medio del escalonamiento de las corrientes de disparo sin retardo de tiempo contra sobrecorrientes, sólo se puede llevar a cabo cuando las corrientes de corto circuito calculadas en los puntos de la instalación difieren lo suficiente. En la figura siguiente, se ilustran los conceptos generales de coordinación para un sistema con interruptores termomagnéticos en serie.



5.5 SELECTIVIDAD ENTRE UN INTERRUPTOR Y UN FUSIBLE

La selectividad en este caso, cuando se conectan en serie un interruptor y un fusible, se obtiene si la curva característica del fusible no toca la curva de disparo del interruptor, en el rango de las sobrecargas, hasta aproximarse a la zona de disparo.



El ajuste de la sensibilidad de los límites dentro de los cuales debe operar el dispositivo de protección, se ubica entre las corrientes máximas de carga y las corrientes máximas de falla.

Es necesario conocer los requerimientos especiales para algunas condiciones de operación del sistema que pueda afectar la coordinación de las protecciones, tales como:

1. El efecto de las corrientes de magnetización en los transformadores (INRUSH-CURRENT)
2. En motores eléctricos grandes, la corriente a rotor bloqueado y el tiempo de aceleración.
3. Las curvas de daño del transformador.

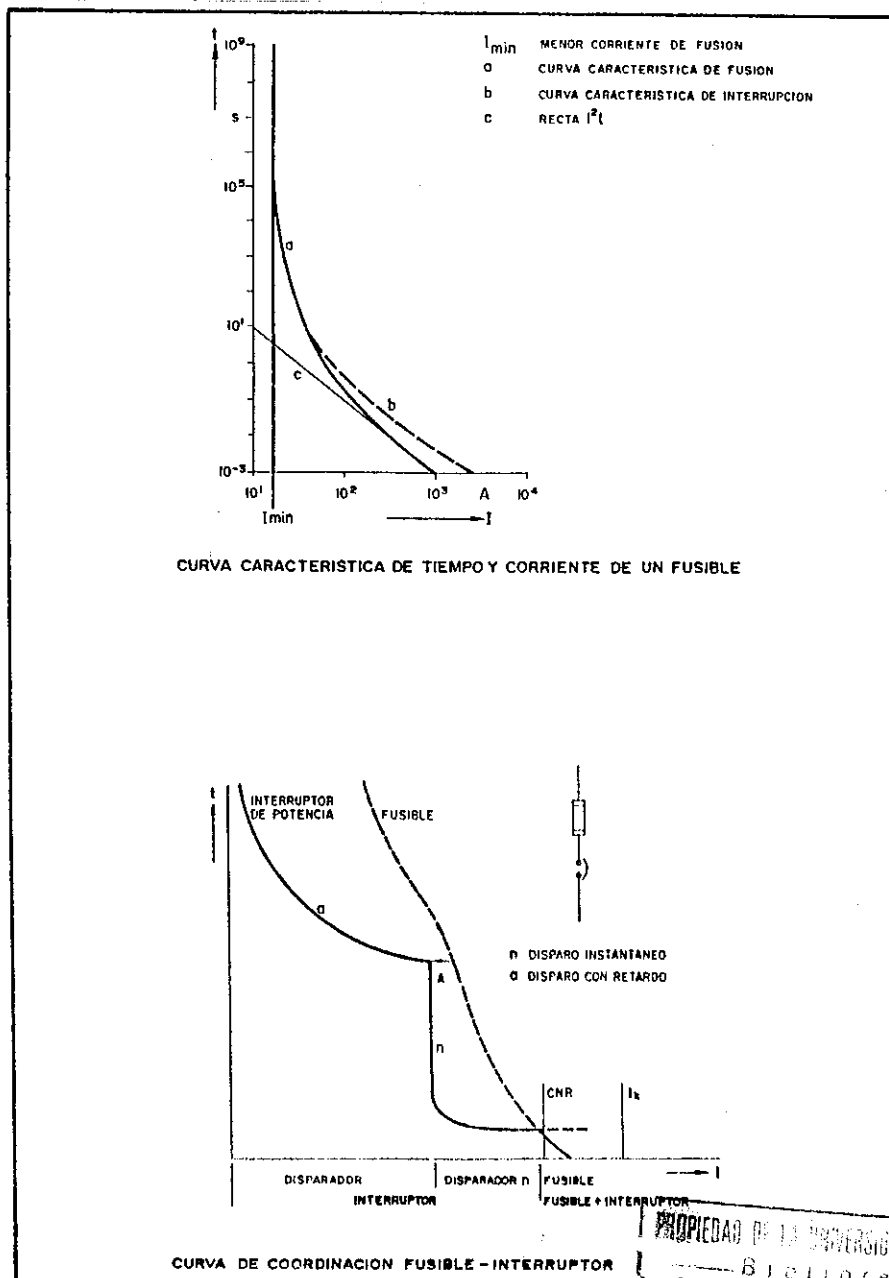
5.6 AJUSTES DE CORRIENTE SUGERIDOS PARA RELEVADORES DE SOBRECORRIENTE

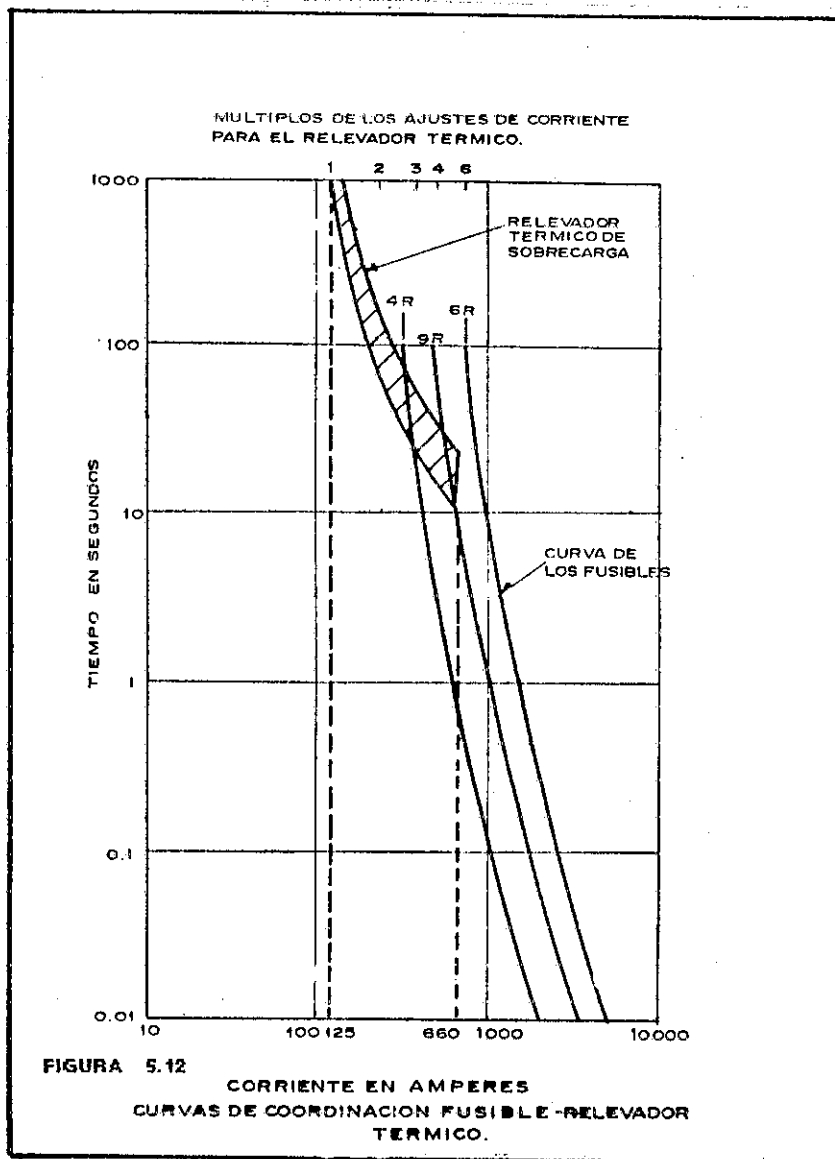
DISPOSITIVOS DE ACCIÓN RETARDADA EN:	EL AJUSTE SUGERIDO DE CORRIENTE ES:
1. Líneas de entrada y alimentadores diversos.	Justo por encima de la máxima corriente admisible que permita el arranque de motores grandes.
2. Alimentadores individuales de motores.	Justo por encima de la corriente de arranque.
3. Alimentadores de transformadores que deben cumplir con los requisitos: a) Si no hay interruptor en el secundario del transformador. b) Si hay interruptor en el secundario del transformador. c) Si hay interruptor en el secundario del transformador y la reactancia es mayor de 0.06 P.U.	2.5 por unidad de la capacidad nominal del transformador. 4.0 por unidad de la capacidad nominal del transformador. 6.0 por unidad de la capacidad nominal del transformador.
4. Relación de sobrecorriente del generador con restricción de voltaje: a) Generadores con reguladores de tensión. b) Generadores sin reguladores de tensión.	2.0 - 2.5 por unidad de la capacidad nominal del generador. 1.5 - 2.0 por unidad de la capacidad nominal del generador.
5. Relevador de inducción de tiempo largo para protección en el arranque del motor.	Ligeramente arriba de la corriente máxima de sobrecarga.
PARA DISPOSITIVOS DE ACCIÓN INSTANTÁNEA. RELEVADORES E INTERRUPTORES DE ACCIONAMIENTO DIRECTO EN:	EL AJUSTE SUGERIDO ES:
1. Alimentadores de transformadores.	Justo por encima de la I del primario correspondiente a la I_{max} inicial asim. para una falla en el secundario. Usar un multiplicador de 1.6 para la componente de CC en 5 Kv y mas. 1.5 para menos de 5 KV. Este ajuste debe permanecer haciendo caso omiso de la I de magnetización del transformador.

2. Alimentadores de motores.

Justo por encima de la corriente inicial asimétrica con la que los motores pueden contribuir a la una falla que depende de otra corriente como lo determina la reactancia subtransitoria del motor y un multiplicador de 1.6 para un motor de 2300V o mas, y de 1.5 para 600 V o menos. Si esto es posible, se debe usar la corriente del rotor en reposo mas 1.0 PU de la corriente nominal del motor en cuestión.

FIGURA 5.11





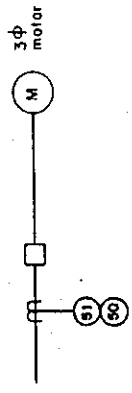
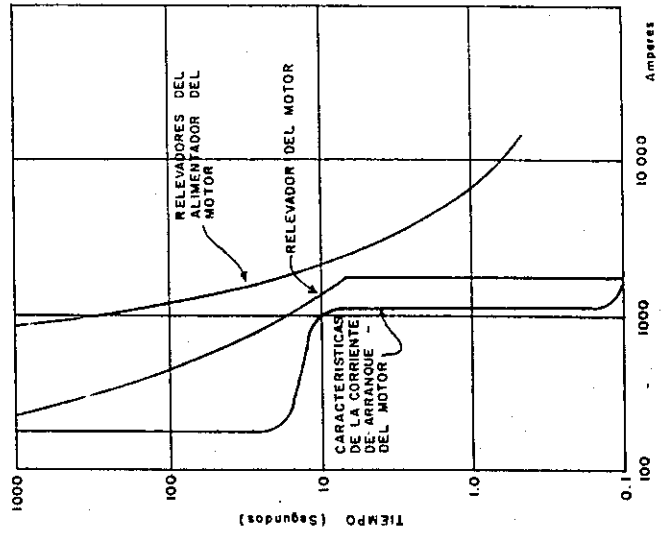
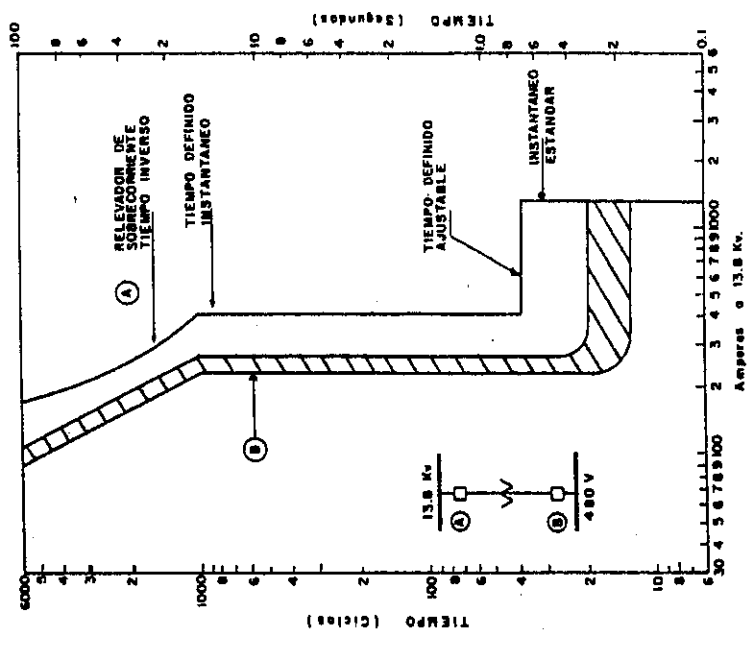


DIAGRAMA UNIFILAR SIMPLIFICADO DE LA PROTECCION DE SOBRECORRIENTE PARA MOTORES GRANDES.



GRAFICA DE LAS CARACTERISTICAS DEL RELEVADOR DEL SISTEMA



CURVA DE COORDINACION TIEMPO - CORRIENTE ENTRE UN RELEVADOR DE SOBRECORRIENTE DE TIEMPO DEFINIDO E INSTANTANEO Y UN DISPOSITIVO DE DISPARO ESTATICO.

FIGURA 5.13

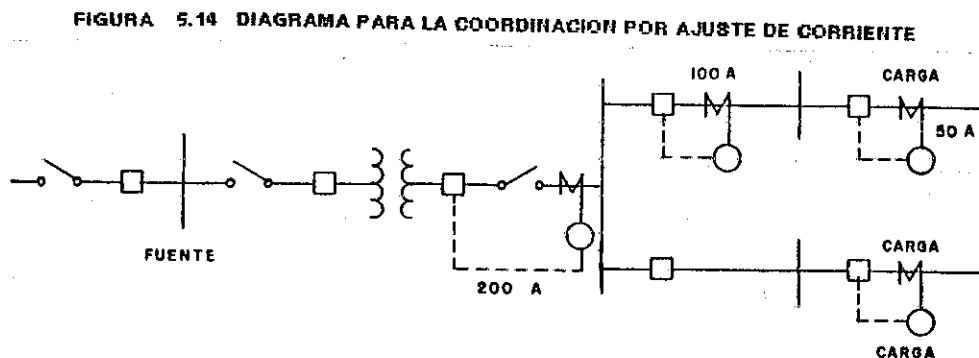
La coordinación se logra, entonces, combinando los distintos métodos de protección: fusibles, interruptores y relevadores. Para ello, nos valemos de las curvas características, procediendo como se explicó anteriormente.

Es necesario mencionar algunos detalles específicos de las curvas de los relevadores, usados para la coordinación.

5.6.1 COORDINACION POR AJUSTE DE CORRIENTE

El concepto más simple en la coordinación de relevadores es el gradiente de corriente, de tal forma que los relevadores tienen diferente tiempo de disparo.

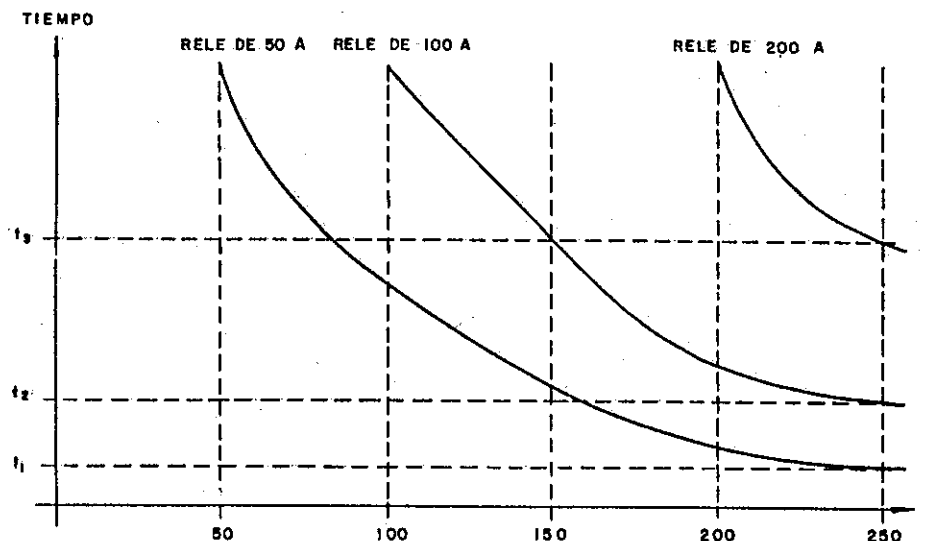
Supóngase que se tiene un sistema elemental como el mostrado en la figura.



En el sistema anterior, los relevadores ajustados trabajan mejor cuando la impedancia de la fuente Z_f es mucho menor que la impedancia de la línea Z_L , ya que entonces la corriente de falla para una terminación remota es considerablemente menor que para una falla en el extremo de la fuente.

Suponiendo que ocurre una falla de 80A. en el lado de la carga, siguiendo el principio de ajuste de corriente, sólo los relevadores de 50A. harían operar a sus correspondientes interruptores, ya que los interruptores ajustados para 100 y 200A tienen el ajuste de sus relevadores arriba del valor de la corriente de falla, sin embargo, éste no es el caso general de ajuste de relevadores de sobrecorriente, ya que puede ocurrir en el lado de la carga una falla que demande una corriente mayor,

por ejemplo, 250 A. y entonces los tres interruptores operarían. Para comprender en qué consiste el ajuste por corriente y por qué sólo el interruptor de la carga debería de operar en lugar de los tres, basta con examinar la siguiente curva característica tiempo-corriente de los relevadores.



CARACTERÍSTICAS TIEMPO CORRIENTE DE RELEVADORES

FIGURA 5.15

Las curvas características mostradas en la figura anterior corresponden a relevadores que operan más rápido mientras más grande son los valores de la corriente de falla, conocidas como **RELACIÓN INVERSA tiempo-corriente**, y es una característica típica de los relevadores de inducción.

Nótese en la figura que el tiempo t_1 , del relevador que controla el interruptor de 50A, es menor que t_2 y t_3 , por lo que el interruptor de 50A actuará antes de que operen los relevadores de los interruptores de 100 y 200 A. En caso de que por alguna razón no interrumpiera el interruptor de 50A, lo haría el de 100 A en un tiempo t_2 , y si esto no ocurriera así, lo haría el de 200 A en un tiempo t_3 .

No todas las situaciones permitirán usar relevadores de ajuste inverso, ya que por ejemplo, cuando la impedancia de la fuente Z_f es grande respecto a la impedancia de línea, la corriente de falla no es mayor cerca de la fuente que para una falla en el extremo del alimentador de la carga, lo que implica la necesidad de revisar para diferentes localizaciones de falla.

5.6.2 COORDINACION POR AJUSTE DE TIEMPO

Los relevadores empleados en este esquema se denominan **definidos**, en lugar de inversos de sobrecorriente; esto significa que los relevadores definidos tienen un valor específico de disparo por corriente, una vez que se ha alcanzado ese valor de corriente. El valor real de tiempo de operación es independiente de la corriente. En la siguiente figura, se ilustra y comparan las relaciones tiempo-corriente de varios elementos de sobrecorriente.

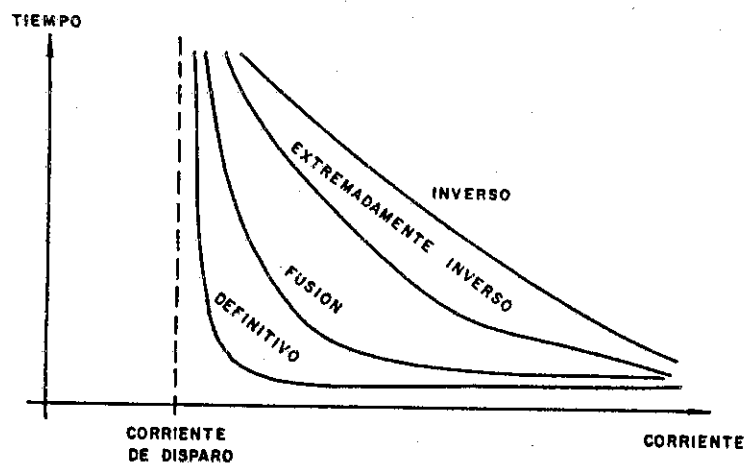


FIGURA 5.18 COORDINACION POR AJUSTE DE TIEMPO

Para explicar el proceso de la coordinación de los relevadores por tiempos (definidos), consideraremos un sencillo sistema como el mostrado a continuación.

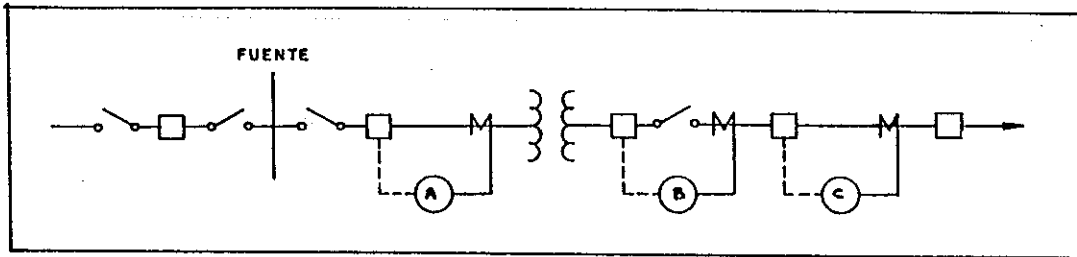


FIGURA 5.17 DIAGRAMA PARA LA COORDINACION POR AJUSTE DE TIEMPO

Considérese que los tres relevadores están ajustados para operar al mismo valor de corriente, sin embargo, los relevadores más cercanos a la fuente darían un mayor tiempo de retraso para proporcionar el respaldo y la selectividad necesaria.

El relevador A respalda a los relevadores B y C, en tanto que el relevador B respalda al C, pero si ocurre una falla entre los interruptores A y B, habrá un largo tiempo de retraso antes de que sea liberada por el interruptor A; esta es la principal desventaja de usar la coordinación con relevadores de tiempo definido.

5.7 COMPARACIÓN DE LOS EQUIPOS DE PROTECCIÓN

Hasta este momento, se ha mencionado la filosofía de la protección y de los diferentes equipos utilizados para la realización de la misma. Pero esto no tendría importancia, si no se pasa a la discusión de las ventajas y desventajas de utilizar un sistema u otro.

Antes de realizar dicha discusión, se debe mencionar, que en materia de protección, no se puede decir que un sistema es mejor que otro en términos absolutos, ya que no sólo se debe hacer una comparación en función de parámetros técnicos, sino que además en función de ciertos factores de orden económico y funcional. Es decir, lo que para un transformador de 10,000 KVA podría ser una protección idónea (protección diferencial, relevadores de presión relevadores de temperatura), para uno de 2500KVA podría resultar excesivamente onerosa y poco práctica, considerando que podría utilizarse, en este caso, únicamente protección con fusible, por ejemplo.

Ya se mencionó que para protección contra sobrecorrientes, se tienen dos posibilidades: protección con fusibles o protección con relevadores e interruptores.

Los fusibles como protección contra sobrecorrientes tienen las siguientes ventajas:

- a) ser de relativo bajo costo,
- b) fácil manipulación e instalación,
- c) gran capacidad interruptiva.

Los fusibles, en oposición a las ventajas mencionadas, tienen las siguientes desventajas:

- a) Sólo sirven para abrir los circuitos, no para cerrarlos, por lo cual se instala un seccionador en serie.
- b) Operan sólo por una vez y hay que cambiar algunas de sus partes después de cada operación, pues se destruyen.
- c) Solamente operan por sobreintensidades ocasionadas por sobrecarga o cortocircuitos.
- d) Los fusibles operan individualmente, lo que en un sistema trifásico puede ocasionar problemas al dejar trabajando dos fases, además del problema que se ocasionaría a los motores que se encuentren conectados a la subestación. Se debe considerar también que para nuestro grupo de conexión usual, delta-estrella, si sólo un fusible se abre debido a una falla de línea a tierra, se podrá dañar el banco de transformadores debido a la sobrecarga que sufrirá al quedarse solamente con la capacidad de un banco delta abierta.
- e) El fusible no tiene la flexibilidad del relevador de ajustarse a las necesidades de coordinación.
- f) Sufren mayores daños de degeneración al correr del tiempo.

En contraposición, se mencionarán las ventajas de utilizar una protección contra sobrecorrientes con relevador e interruptor.

- a) Realizan una protección más eficiente, ya que pueden ser

construidos los relés, para tener una mayor exactitud y sensibilidad que los fusibles.

- b) Los relés pueden ser ajustados a distintos valores de características tiempo-corriente, por lo que dan más flexibilidad en la coordinación de protección.
- c) Después de que ocurra una falla, y que ésta sea solventada, los interruptores pueden volver a cerrar el circuito sin tener que cambiar nada en los mismos.
- d) Los interruptores pueden además servir para aislar el circuito al ocurrir fallas distintas a las de sobrecorriente, tales como protección diferencial, sobrevoltaje, sobretensión, etc. Además, pueden operar en forma remota.

Al mismo tiempo, este último sistema presenta las siguientes desventajas:

- a) Elevado costo inicial.
- b) Manejo más delicado, que necesita más supervisión.
- c) Requiere de un mayor mantenimiento.

En el momento de decidir cuál será el equipo más apropiado para instalar, se deben sin excepción, tomar en consideración todos los conceptos estudiados anteriormente y contraponerlo con el costo económico de estos equipos. Al realizar el anterior análisis, se puede caer en la cuenta de que el sistema de protección puede tornarse, en ocasiones, tanto o más caro que el costo del equipo que se va a proteger. Es por esto, que se debe evaluar con mucho criterio cuál será el sistema idóneo, además, el grado de protección que la empresa industrial desea para su equipo en función del costo, que representa un paro excesivo en sus labores por efectos de falta de suministro de energía o falta de funcionamiento de su maquinaria.

Se puede agregar, como ejemplo, que en Guatemala hoy en día se considera que para subestaciones de 13.2 KV para abajo, es suficiente una protección con fusibles para solventar el problema de fallas por sobrecorrientes.

Se puede concluir apuntando que en el medio guatemalteco, varias de las industrias con subestaciones con niveles de voltaje

primario en 69KV y transformadores entre 3000 a 5000 KVA, han optado por colocar un sistema de protección contra sobrecorrientes usando el interruptor. Se evidencia su interés en colocar una completa protección a sus equipos, los cuales poseen un valor económico y estratégico muy elevado.

CONCLUSIONES

1. Los esquemas de protección de sistemas industriales están básicamente dirigidos a proteger las instalaciones, y atenuar los efectos de las fallas, minimizando el daño en equipos. Sin embargo, podría pensarse que el objetivo ideal de una protección debería ser el de proporcionar una total prevención de las fallas, aunque en la práctica esto no es posible, ya que para lograrlo sería necesario que todas las componentes del circuito tuvieran características de diseño dirigidas a evitar las fallas, lo cual no resultaría económicamente justificable ni práctico, puesto que aun con el mejor diseño, los materiales tienden a perder sus características dieléctricas con el tiempo.
2. En términos generales, los objetivos principales de un esquema de protección al ocurrir una falla, son:
 - a) Limitar las tensiones a las cuales queda sujeto el equipo durante la falla, como son los esfuerzos dieléctricos en los aislamientos, esfuerzos térmicos o calentamiento y esfuerzos electromecánicos.
 - b) Proteger al personal contra riesgos eléctricos.
 - c) Asegurar la continuidad del servicio.
3. Un sistema de protección es selectivo, cuando al ocurrir una falla, una cantidad mínima de equipo es removida del sistema a fin de aislar la falla, con lo cual se mantiene la continuidad de servicio en la mayor parte de la instalación.
4. Los ajustes y calibraciones de los relevadores, se hacen tomando en cuenta los límites de capacidad de los transformadores y motores, tales como: el efecto de las

corrientes de magnetización (INRUCH-CURRENT), la corriente a rotor bloqueado, el tiempo de aceleración, las curvas de daño en transformadores y el factor de servicio.

5. La protección por relevadores es más eficiente, ya que pueden ser construidos para tener una mayor exactitud y sensibilidad. Los relevadores pueden ser ajustados a distintos valores de características tiempo-corriente, por lo que dan más flexibilidad en la coordinación de protección.
6. La protección por relevadores permite aislar los circuitos de una instalación al ocurrir fallas diferentes a las de sobrecorriente, tales como protección diferencial, sobrevoltaje, sobretensión, bajo voltaje, falla a tierra, pérdida de campo, etc.

RECOMENDACIONES

1. Dado que los motores, generadores y transformadores son parte vital y de un alto valor monetario en la industria, se sugiere realizar una evaluación profunda, desde un punto de vista técnico-económico, de los equipos de protección que se van utilizar, para garantizar su confiabilidad. Debe considerarse, para ello, el costo que representa, para la planta industrial, la pérdida de estos equipos en el proceso de producción.
2. Se deben realizar estudios profundos en relación con la corriente de inserción (inrush-current), pues al existir un transitorio de la corriente de excitación, puede parecer como una falla interna para los relevadores diferenciales.
3. Para transformadores hasta 2500 KVA, se recomienda proteger, en la mayoría de los casos, sólo con fusibles. Para los transformadores de 2500 a 5000 KVA, se pueden usar, eventualmente, fusibles para la protección contra sobrecorrientes. Para transformadores de 5000 a 10000 KVA, se recomienda la protección diferencial. Para transformadores de 10000 KVA y potencias superiores, se recomienda la protección diferencial, con relevadores de presión y/o temperatura y una adecuada coordinación con el resto de los elementos de protección del sistema.
4. Antes de seleccionar un sistema de protección, se debe realizar una comparación en función de ciertos factores de orden económico, técnico, y funcional. Esto es para evitar que el costo del equipo de protección resulte mucho más elevado que el mismo equipo que se va a proteger.



BIBLIOGRAFÍA

1. ALMAZAN BERTHET, Jorge Mario. Criterios de selección de los sistemas de conexión y protección para una subestación de tipo industrial. (Tesis: Facultad de Ingeniería, Universidad de San Carlos de Guatemala), Guatemala 1996.
2. CHAPMAN, Stephen J. Máquinas Eléctricas. segunda edición. Mexico: Edit. McGRAW-HILL, 1988.
3. ENRIQUEZ HARPER, Gilberto. Curso de Transformadores y motores eléctricos de Inducción. Escuela Superior de Ingeniería Mecánica Eléctrica. México: Edit. Limusa, 1984.
4. ENRIQUEZ HARPER, Gilberto. Fundamentos de protección de sistemas eléctricos por relevadores. Escuela Superior de Ingeniería Mecánica Eléctrica. México: Edit. Limusa, 1993.
5. ENRIQUEZ HARPER, Gilberto. Protección de instalaciones eléctricas industriales y comerciales. Escuela Superior de Ingeniería Mecánica Eléctrica. México: Edit. Limusa, 1994.
6. FITZGERALD, A.E. Teoría y análisis de las máquinas eléctricas. segunda edición. España; Edit. Hispano Europea, 1987.
7. KOSOW, Irving L. Control de máquinas eléctricas. 3a. edición. México: Editorial Reverté, 1977.

8. NAJERA SAGASTUME, Rudy Haroldo. análisis de conexiones a tierra en sistemas de distribución. (Tesis: Facultad de Ingeniería, Universidad de San Carlos de Guatemala), Guatemala 1995.
9. RUSSELL MASON. El arte y la ciencia de la protección por relevadores. décima edición. México: Edit. Continental, S.A de C.V., 1982.
10. STEVENSON, William. Sistemas Eléctricos de potencia. Jairo Suárez. segunda edición. Estados Unidos: Edit. McGRAW-HILL, 1975.