



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA
DE MÉXICO

**PROTECCIÓN DE LA INSTALACIÓN ELÉCTRICA DE
UNA PLANTA DE ASFALTO**

T E S I S

**QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE INGENIERO
ELÉCTRICO Y ELECTRÓNICO**

P R E S E N T A

ALEJANDRO BASTIDAS FLORES



DIRECTOR DE TESIS: ING. JOSÉ ARMANDO PLUMA ROSALES

CIUDAD UNIVERSITARIA, MÉXICO, DF. AGOSTO 2014



Índice



Introducción.....	4
Objetivo general.....	9
Capítulo 1 Conceptos básicos.....	10
1.1 Corriente alterna.....	10
1.2 Potencia real, reactiva y aparente en un circuito monofásico.....	10
1.3 Valor eficaz o RMS.....	12
1.4 Potencia trifásica.....	14
1.5 Factor de potencia.....	16
1.6 Impedancia.....	16
1.7 Conexiones básicas en circuitos trifásicos.....	17
1.7.1 Conexión estrella.....	17
1.7.2 Conexión delta.....	19
1.8 Transformador.....	20
1.8.1 Relación de voltajes en el transformador.....	22
1.8.2 Corriente de excitación o de vacío.....	25
1.8.3 Relación de corrientes en el transformador.....	27
1.8.4 Circuito equivalente de un transformador.....	28
1.9 Motor de inducción.....	29
1.9.1 Campo magnético rotatorio.....	29
1.9.2 Desarrollo del par inducido.....	29
1.9.3 Deslizamiento de la máquina de inducción.....	30
1.9.4 Circuito modelo del rotor.....	31
1.9.5 Circuito equivalente final de una máquina de inducción.....	34



Índice



1.9.6 Clases de diseño de motores de inducción.....	35
Capítulo 2 Instalación eléctrica de planta de asfalto.....	37
2 Consideraciones generales.....	37
2.1 Fusibles.....	37
2.1.1 Clases de fusibles.....	37
2.2 Láminas de fusibles.....	39
2.3 Fusibles de potencia.....	40
2.4 Transformadores de instrumentos.....	41
2.5 Carga o burden en los transformadores de corriente.....	42
2.6 Transformadores de potencial.....	42
2.7 Carga o burden de un TP.....	42
2.8 Concepto de relevador.....	42
2.8.1 Consideraciones teóricas.....	42
2.8.2 Relevador instantáneo 50.....	43
2.8.3 Relevador electromecánico de tiempo inverso 51.....	45
2.8.4 Relevador diferencial 87.....	48
2.8.5 Relevador de estado sólido.....	50
2.8.6 Relevador microprocesado.....	50
2.8.7 Ventajas de los relevadores microprocesados.....	52
2.9 Transformador, motor, conductores.....	53
2.10 Cantidades por unidad.....	60
2.11 Cambio de base.....	61
2.12 Procedimiento general para cálculo de fallos.....	63
2.13 Datos de los elementos de la instalación eléctrica.....	63



Índice



Capítulo 3 Cálculo de corto circuito	64
3.1 Componentes simétricas.....	64
3.2 Cálculo en PU de líneas.....	66
3.3 Cálculo en PU de transformadores.....	67
3.4 Cálculo en PU de motores a 4.16 <i>kV</i>	67
3.5 Cálculo en PU de motores a 2.4 <i>kV</i>	68
3.6 Fallas de corto circuito en los buses.....	72
Capítulo 4 Protecciones	79
4.1 Protección de elementos de una instalación eléctrica.....	79
4.2 Puntos ANSI de un transformador y protección con relevador diferencial 87.....	81
4.3 Consideraciones generales para la protección de un motor.....	90
4.4 Protección de conductores eléctricos.....	102
4.5 Protección de los Bus.....	106
4.6 Coordinación de protecciones.....	108
4.7 Criterio fusible-relevador.....	109
4.8 Criterio fusible-fusible.....	110
4.9 Protecciones primarias con relevadores.....	112
4.10 Protección de respaldo con relevadores.....	114
Conclusiones.....	118
Índice de Figuras.....	119
Índice de Tablas.....	121
Bibliografía.....	122



Introducción



Los caminos asfaltados de las ciudades, y principalmente, de las carreteras interestatales tienen relevante importancia en el cumplimiento de su función. Un asfalto de buena calidad presenta durabilidad que depende principalmente de sus materiales que lo conforman y el proceso controlado de su fabricación así como de la aplicación del asfalto como acción final. Planta de asfalto es el conjunto de elementos mecánicos dispuestos de manera que produzcan concreto asfáltico con todas las especificaciones requeridas, es decir que contenga los sistemas que permitan calibrar la dosificación de agregados, cemento asfáltico y la temperatura necesaria para su mezclado. Por la diversidad de las capacidades de producciones pueden ser chicas de 45 toneladas por hora (TPH), hasta 500 toneladas por hora (TPH), además, otra característica que define una planta es la facilidad para transportarse e instalarse, y pueden ser portátiles o estacionarias, sin embargo la variante más importante para su clasificación es el sistema de producción que se define como planta de producción continua y planta de producción discontinua o dosificada.

Planta de producción continua.

El proceso consiste en los siguientes pasos: Dosificación de agregados, homogeneización, secado, inyección de asfalto, mezclado, elevación, almacenamiento y carga al camión. De lo descrito en este proceso todo es continuo hasta antes de la carga al camión que depende de condiciones especiales del tendido de carpeta como puede ser: temperatura ambiente, distancia de acarreo, facilidad de colocación, número de camiones disponibles, etc. La dosificación y el asfalto son básicos dado que no hay manera de dosificarlo por unidad de peso directamente, sino por flujo de material.

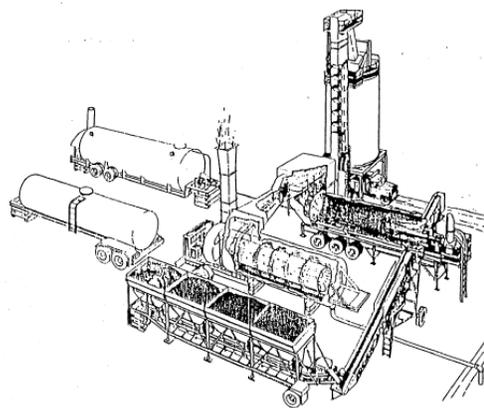


Figura A. Planta mezcladora de tambor tipo continua.

Planta de producción discontinua o de dosificación. En este proceso los agregados son combinados, calentados, secados, proporcionados y mezclados con el cemento asfáltico para



Introducción



producir una mezcla asfáltica en caliente. Mezcla asfáltica, definición: es una mezcla sólida de color negro de asfalto obtenido como un subproducto del petróleo, con agregados minerales secos, duros de buena calidad y bien gradados, para ser usada en pavimentación. Una planta puede ser pequeña o grande dependiendo de la mezcla asfáltica que esté produciendo. También puede ser estacionaria o portátil. Ciertas operaciones básicas son comunes en todas las plantas de dosificación:

- Almacenamiento y alimentación del frío del agregado.
- Secado y calentamiento del agregado.
- Cribado y almacenamiento del agregado caliente.
- Almacenamiento y calentamiento de asfalto.
- Medición y mezclado de asfalto y agregado.
- Carga de la mezcla final caliente.

Los agregados son alimentados en cantidades controladas, seguidamente pasados por un tambor en donde son secados y calentados, después los agregados pasan por una unidad de cribado, la cual separa el material en diferentes tamaños y lo deposita en tolvas para su almacenaje caliente. Luego, los agregados y el relleno mineral son pesados, en cantidades controladas, combinados con el asfalto y mezclados en su totalidad para formar una carga. La mezcla es luego cargada en los camiones y transportada al lugar de pavimentación.



Introducción



Figura B. Flujo de operación básica de una planta de dosificación.

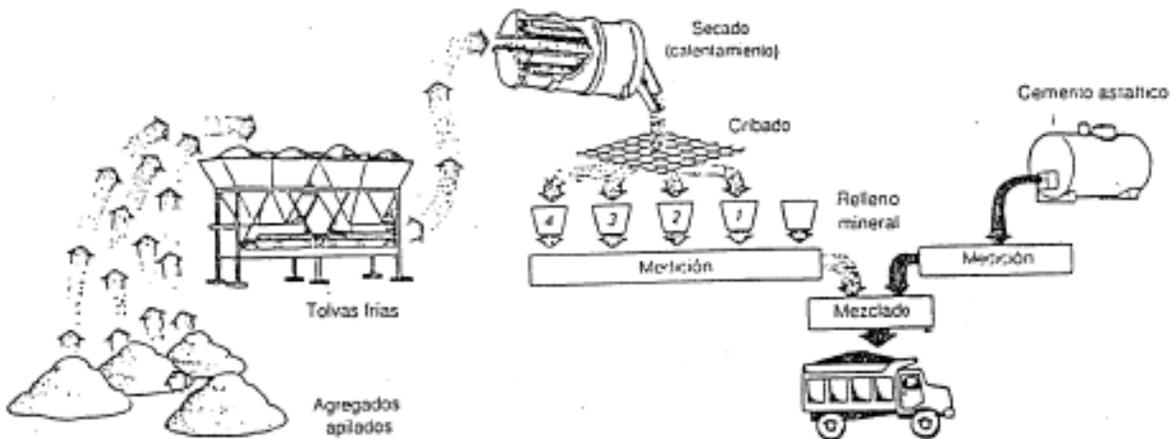


Figura C. Presentación esquemática de una planta de asfalto.



Introducción



Es importante contar con agregados y asfalto que cumplan con todas las especificaciones, así como una planta calibrada según la mezcla asfáltica, esto es un requisito indispensable para elaborar concretos asfálticos en lo que respecta a la producción, pero no hay que perder de vista que la colocación es determinante para conseguir un comportamiento adecuado de la mezcla aplicada, es decir, todo el trabajo realizado hasta la producción se puede perder por una inadecuada colocación.

El propósito es el mismo en todos los tipos de planta: producir una mezcla en caliente que posea las proporciones deseadas de agregado y asfalto. Ambos tipos de plantas están diseñadas para éste propósito, la diferencia estriba en que en la planta de dosificación secan y calientan el agregado y después, en un mezclador separado, lo combinan en dosis individuales, mientras que las plantas de tambor secan el agregado y lo combinan con el asfalto en un proceso continuo y en la misma sección del equipo.

Planta de asfalto con capacidad de producción de 60 Ton/Hr.

La planta de asfalto en nuestro caso tiene una capacidad de producción de 60 ton/hora. Con despacho de producto terminado de 6 toneladas cada 6 minutos por camión. Consideramos la planta del tipo mezcla caliente y del tipo discontinuo.

Mezcla de materiales.

El asfalto es una mezcla de arena + gravilla + grava + chapopote y estimando de cada componente 1500 kg, para un total de 60000 kg.

Tabla de Materiales

	1	2	3	4	M	T
ARENA				OK	OK	15,000
GRAVILLA			OK		OK	15,000
GRAVA		OK			OK	15,000
CHAPOPOTE	OK				OK	15,000



Introducción



Para el proceso la maquinaria a utilizar es:

- Extruder de secado
- Ventiladores
- Quemador
- Cangilones
- Báscula
- Motocompresor
- Bombas
- Bandas Transportadoras

Instrumentos de medición

- Manómetro
- Termómetro
- Báscula
- Reloj
- Voltímetros
- Amperímetros

Parte funcional de la planta de asfalto

Ready to run

En esta etapa se hacen los previos para iniciar la secuencia de encendido de motores y puesta en marcha de la maquinaria. Todos los motores deben estar apagados y las persianas deben estar cerradas.

Start

Organización de los eventos donde las máquinas van a arrancar según su jerarquía de su lógica secuencial.



Introducción



Operación normal

En esta condición se deben encender primeramente los motores de las bandas transportadoras que abastecen a las tolvas. En el diseño del sistema se puede incluir instrumentación de medición que indique el instante en que las tolvas se encuentren a un nivel de su capacidad adecuado para que las bandas transportadoras mencionadas dejen de estar en operación. A la vez se debe activar las bandas transportadoras que trasladan los materiales a la secadora. El motor de la secadora y del ventilador debe encenderse una vez que comienza a entrar el material. Secuencialmente el motor de los cangilones debe encenderse para elevar los pétreos a la charola vibratoria que va a separar los materiales mediante mallas de menor a mayor tamaño en su cuadrícula. Una vez separados los materiales se dosifican mediante apertura y cierre de persianas abasteciendo una pesadora de tal manera que se tenga un control adecuado en las proporciones que lleva la mezcla de pétreos. De ahí se abre la persiana del silo de la pesadora, dejando caer a una mezcladora, cuyo motor debe estar previamente funcionando.

Concluido lo anterior está listo todo para abrir la persiana de la mezcladora para liberar el producto a camiones que transportaran la mezcla hasta el sitio donde se aplicará la capa de asfalto.

Stop

El estado de operación de stop debe ser igualmente secuencial. Una vez que se llenan las tolvas se desactivan los motores de las bandas transportadoras, y una vez vacíos estos se desactivan las dos bandas transportadoras que llevan el material a la secadora. Una vez vacía la secadora se debe apagar los motores del secador y del ventilador. A la vez, al momento en que los cangilones se encuentran sin carga se debe apagar su motor. Al igual que la mesa vibratoria la mezcladora. Finalmente debe quedar en posición de cerrado la persiana de la mezcladora.

Emergency stop

En caso de una emergencia el sistema debe interrumpirse en su totalidad o en ciertos sectores del sistema.

Objetivo General

Proteger la instalación eléctrica de la planta de asfalto.

Objetivos particulares

- a) Evitar disparos en falso de las protecciones eléctricas.
- b) Continuidad en el suministro de energía eléctrica
- c) Seguridad en la instalación eléctrica.



Capítulo 1 Conceptos básicos



1.1 Corriente alterna

Corriente alterna. Se denomina corriente alterna a la corriente que cambia repetidamente de polaridad, esto significa que toma valores desde cero hasta un valor máximo positivo, vuelve a cero y alcanza un máximo negativo. En los sistemas de corriente alterna que trabajan en régimen permanente, las corrientes y los voltajes son función senoidal del tiempo.

1.2 Potencia real, reactiva y aparente en un circuito monofásico.

Si el voltaje y la corriente son:

$$V = V_{m\acute{a}x} \text{sen } \omega t \quad \text{Ec (1.10)}$$

$$I = I_{m\acute{a}x} \text{sen}(\omega t + \phi) \quad \text{Ec (1.11)}$$

La potencia instantánea es igual a

$$P_{instant\acute{a}nea} = V_{m\acute{a}x} \text{sen } \omega t [I_{m\acute{a}x} \text{sen}(\omega t + \phi)] \quad \text{Ec (1.12)}$$

Usando la identidad trigonométrica

$$\text{sen}(\omega t + \phi) = (\text{sen } \omega t \cos \phi + \cos \omega t \text{sen } \phi) \quad \text{Sustituir en Ec (1.12)}$$

Tenemos

$$P_{instant\acute{a}nea} = V_{m\acute{a}x} I_{m\acute{a}x} (\text{sen}^2 \omega t \cos \phi + \text{sen } \omega t \cos \omega t \text{sen } \phi)$$

Como

$$\text{sen } \omega t \cos \omega t = \frac{1}{2} \text{sen } 2\omega t \quad \text{Ec (1.13)}$$

$$\text{sen}^2 \omega t = \frac{1 - \cos 2\omega t}{2} \quad \text{Ec (1.14)}$$

Desarrollando y simplificando tenemos

$$P = \frac{V_{m\acute{a}x} I_{m\acute{a}x}}{2} \cos \phi (1 - \cos 2\omega t) + \frac{V_{m\acute{a}x} I_{m\acute{a}x}}{2} \text{sen } \phi \text{sen } 2\omega t$$



Capítulo 1 Conceptos básicos



El primer término de la ecuación anterior representa una potencia instantánea que tiene valores desde cero hasta un máximo $\frac{V_{m\acute{a}x} I_{m\acute{a}x}}{2} \cos \phi$, donde su valor medio durante un período es

$$P_{real\ o\ activa} = \frac{V_{m\acute{a}x} I_{m\acute{a}x}}{2} \cos \phi \text{ Sustituyendo y simplificando}$$

$$P_{real} = V_{rms} I_{rms} \cos \phi \text{ Está dada en watts.}$$

El segundo término de la ecuación representa una potencia instantánea que varía desde $-\frac{V_{m\acute{a}x} I_{m\acute{a}x}}{2} \sin \phi$ hasta un máximo de $\frac{V_{m\acute{a}x} I_{m\acute{a}x}}{2} \sin \phi$. Su valor medio en el período es cero.

Al sustituir y simplificar obtenemos la expresión de la potencia reactiva

$$P_{reactiva} = V_{rms} I_{rms} \sin \phi \text{ Está dada en volts amperes reactivos}$$

La potencia reactiva representa la energía producida por inductancias y capacitancias que almacenan en el campo magnético y en el campo eléctrico respectivamente, cargándose en la primera mitad del período y descargándose en la segunda mitad del período.

La potencia aparente de un circuito monofásico es el producto del valor eficaz de voltaje y del valor eficaz de corriente. Su expresión es

$$P_{aparente} = VI \text{ Está dada en volts amperes}$$

Designaremos para las diferentes potencias diferentes letras

$$P = P_{real}$$

$$Q = P_{reactiva}$$

$$S = P_{aparente}$$

Como usamos valores de voltaje eficaz y corriente eficaz y tomando en cuenta el ángulo entre estas cantidades la potencia real se representa

$$P = VI \cos \phi \text{ Ec (1.15)}$$

Donde

$\cos \phi$ Es el factor de potencia.

La representación de la potencia reactiva es



Capítulo 1 Conceptos básicos



$$Q = VI \operatorname{sen} \phi \text{ Ec (1.16)}$$

Combinando las ecuaciones Ec (1.15) y Ec (1.16) obtenemos la potencia aparente

$$\sqrt{P^2 + Q^2} = \sqrt{(VI \cos \phi)^2 + (VI \operatorname{sen} \phi)^2} = \sqrt{V^2 I^2 (\cos^2 \phi + \operatorname{sen}^2 \phi)}$$

Como

$$\operatorname{sen}^2 \phi + \cos^2 \phi = 1$$

Tenemos

$$= \sqrt{V^2 I^2 (1)} = \sqrt{V^2 I^2}$$

Y así llegamos a la expresión que representa la potencia aparente

$$S = VI \text{ Ec (1.17)}$$

1.3 Valor eficaz RMS

El valor del término raíz cuadrática media se obtiene a través del cuadrado de la desviación estándar la cual representa la medida de la distribución de los valores instantáneos en función de su amplitud en un intervalo de tiempo.

La media cuadrática para una cantidad N de valores está dada por la expresión:

$$\text{Amplitud}_{rms} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i^2} = \sqrt{\frac{x_1^2 + x_2^2 + \dots + x_N^2}{N}} \text{ Ec (1.18)}$$

Para una función variable continua $f(t)$ definida en el intervalo $0 \leq t \leq T$ se expresa por:

$$x_{rms} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T [f(t)]^2 dx} \text{ Ec (1.19)}$$

La expresión anterior se puede aplicar a una señal senoidal.

La función de voltaje para una señal senoidal es:

$$V = V_{m\acute{a}x} \operatorname{sen} \omega t \text{ Ec (1.20)}$$



Capítulo 1 Conceptos básicos



Y considerando el intervalo $T[0,2\pi]$

$$V_{rms} = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} [V_{m\acute{a}x} \text{sen}(\omega t)]^2 d\omega t}$$

$$V_{rms} = \sqrt{\frac{V_{m\acute{a}x}^2}{2\pi} \int_0^{2\pi} (\text{sen}(\omega t))^2 d\omega t}$$

Usamos la identidad trigonométrica

$$\text{sen}^2 \omega t = \frac{1 - \cos 2\omega t}{2} \quad \text{Ec (1.13)}$$

Tenemos:

$$V_{rms} = \sqrt{\frac{V_{m\acute{a}x}^2}{2\pi} \left(\int_0^{2\pi} \left(\frac{1}{2} - \frac{\cos(2\omega t)}{2} \right) d\omega t \right)}$$

$$V_{rms} = \sqrt{\frac{V_{m\acute{a}x}^2}{2\pi} \left(\int_0^{2\pi} \frac{1}{2} d\omega t - \frac{1}{2} \int_0^{2\pi} \cos(2\omega t) d\omega t \right)}$$

$$V_{rms} = \sqrt{\frac{V_{m\acute{a}x}^2}{2\pi} \left(\frac{1}{2} [\omega t]_0^{2\pi} - \frac{1}{2} \left[\frac{\text{sen}(2\omega t)}{2} \right]_0^{2\pi} \right)}$$

$$V_{rms} = \sqrt{\frac{V_{m\acute{a}x}^2}{2\pi} \left(\frac{1}{2} [2\pi] - \frac{1}{4} [\text{sen}(4\pi)] \right)}$$

$$V_{rms} = \sqrt{\frac{V_{m\acute{a}x}^2}{2\pi} \left(\frac{1}{2} [2\pi] - \frac{1}{4} [0] \right)}$$

$$V_{rms} = \sqrt{\frac{V_{m\acute{a}x}^2}{2\pi} \pi}$$

$$V_{rms} = \sqrt{\frac{V_{m\acute{a}x}^2}{2}}$$

Expresión que determina el valor eficaz del voltaje senoidal:

$$V_{rms} = \frac{V_{m\acute{a}x}}{\sqrt{2}} \quad \text{Ec (1.21)}$$



Capítulo 1 Conceptos básicos



De manera similar se puede obtener la expresión del valor eficaz de la corriente:

$$I_{rms} = \frac{I_{m\acute{a}x}}{\sqrt{2}} \text{ Ec (1.22)}$$

1.4 Potencia trifásica

Por definición la potencia real trifásica es la suma de las potencias reales de las tres fases. Voltajes defasados 120° respectivamente. ($\frac{2\pi}{3} = 120^\circ$, $-\frac{2\pi}{3} = -120^\circ$).

Los generadores trifásicos entregan voltajes de la misma magnitud pero con diferente ángulo. Suponemos la secuencia positiva ABC. En los sistemas trifásicos hay un operador y su expresión es

$$a = 1 \angle 120^\circ$$

Los voltajes se pueden expresar así

$$V_a = \text{Voltaje} \times 1 \angle 0^\circ$$

$$V_b = \text{Voltaje} \times 1 \angle -120^\circ$$

$$V_c = \text{Voltaje} \times 1 \angle 120^\circ$$

Se puede escribir también como

$$V_a = 1 \angle 0^\circ = 1 + 0j$$

$$V_b = 1 \angle -120^\circ = -\frac{1}{2} - \frac{\sqrt{3}}{2}j$$

$$V_c = 1 \angle 120^\circ = -\frac{1}{2} + \frac{\sqrt{3}}{2}j$$

Usamos la notación de número complejo para hallar V_{ab}

$$V_{ab} = (1 + 0j) - \left(-\frac{1}{2} - \frac{\sqrt{3}}{2}j\right)$$



Capítulo 1 Conceptos básicos



$$V_{ab} = \frac{3}{2} + \frac{\sqrt{3}}{2} j$$

Magnitud de V_{ab}

$$V_{ab} = \sqrt{\left(\frac{3}{2}\right)^2 + \left(\frac{\sqrt{3}}{2}\right)^2} = V_{ab} = \sqrt{\frac{9}{4} + \frac{3}{4}} = V_{ab} = \sqrt{\frac{9+3}{4}} = V_{ab} = \sqrt{\frac{12}{4}}$$

$$V_{ab} = \sqrt{\frac{4 \times 3}{4}} = \sqrt{3}$$

Argumento de V_{ab}

$$\alpha = \tan^{-1} \frac{\frac{\sqrt{3}}{2}}{\frac{3}{2}} = \tan^{-1} \frac{\sqrt{3}}{3} = \tan^{-1} \frac{3}{3\sqrt{3}} = \tan^{-1} \frac{1}{\sqrt{3}}$$

$$\alpha = 30^\circ$$

De lo anterior obtenemos

$$V_{ab} = V_a \sqrt{3} \angle 30^\circ$$

$$V_{ca} = V_a \sqrt{3} \angle 150^\circ$$

$$V_{bc} = V_a \sqrt{3} \angle 270^\circ$$

Por lo que la magnitud de los voltajes de fase a fase son 1.732 veces más grande que los voltajes de fase. Asimismo, los voltajes de línea se adelantan respecto los voltajes de fase correspondiente en 30° .

Por lo que la potencia trifásica real se expresa como

$$P = \sqrt{3} VI \cos \phi \text{ Ec (1.23)}$$

La potencia trifásica reactiva

$$Q = \sqrt{3} VI \sen \phi \text{ Ec (1.24)}$$

Y la potencia trifásica aparente



Capítulo 1 Conceptos básicos



$$S = \sqrt{3} VI \text{ Ec (1.25)}$$

1.5 Factor de potencia

En un circuito de corriente directa la potencia la obtenemos del producto del voltaje por la corriente. En un circuito de corriente alterna se considera lo que se llama factor de potencia que se define como el cociente de la potencia real entre la potencia aparente. Se puede expresar en forma decimal o en forma porcentual.

$$\text{Factor de Potencia} = \frac{\text{Potencia real}}{\text{Potencia aparente}} = \frac{\sqrt{3} VI \cos \phi}{\sqrt{3} VI}$$

Por lo tanto

$$\text{Factor de Potencia} = \cos \phi$$

1.6 Impedancia

Se le llama impedancia (Z) a la suma de resistencia óhmica (R), reactancia inductiva (X_L) y reactancia capacitiva (X_C).

En el caso de circuito solamente resistivo, la impedancia es igual a la resistencia óhmica $Z=R$

Para un circuito inductivo $Z=X_L$

Para un circuito capacitivo $Z = X_C$

Cuando tenemos los tres elementos resistencia inductancia y capacitancia la impedancia es

$$Z = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2}$$

Su argumento

$$\alpha = \tan^{-1} = \frac{(X_L - X_C)^2}{R}$$

Para resistencia e inductancia

$$Z = \sqrt{R^2 + X_L^2}$$

Su argumento

$$\alpha = \tan^{-1} = \frac{X_L}{R}$$



Capítulo 1 Conceptos básicos



Para resistencia y capacitancia

$$Z = \sqrt{R^2 + X_C^2}$$

Su argumento

$$\alpha = \tan^{-1} = \frac{X_C}{R}$$

1.7 Conexiones básicas en circuitos trifásicos

Existen dos conexiones básicas en los circuitos trifásicos una conocida como conexión estrella y la otra conocida como conexión delta.

1.7.1 Conexión estrella

En el caso de la conexión estrella se muestra una representación en la figura 1.8 con las siguientes relaciones:

N representa el neutro de la conexión, los voltajes V_{AB} , V_{BC} , V_{AC} , se conocen como los voltajes de línea, y si el sistema está balanceado las magnitudes de estas cantidades son iguales entre sí $V_{AB} = V_{BC} = V_{AC}$ y con un desfase de 120° eléctricos. Mientras que los voltajes referidos del voltaje de línea al neutro se nombran voltajes de fase.

La relación entre los voltajes de fase y los voltajes de línea para esta conexión es como se indica:

$$V_L = \sqrt{3}V_F$$

Las corrientes I_A , I_B , I_C , son las corrientes de la línea y son las mismas corrientes que circulan por cada fase y si el sistema se encuentra balanceado son iguales entre sí $I_A = I_B = I_C = I_L$. Por lo que la relación de las corrientes de línea con las corrientes de fase es igual en magnitud.

En la conexión estrella la potencia aparente se expresa como sigue:

$$P_F = V_F I_F$$

La potencia aparente total para las tres fases se expresa como sigue:

$$P = 3V_F I_F$$

Se tiene que:



Capítulo 1 Conceptos básicos



$$V_F = \frac{V_L}{\sqrt{3}} \text{ Y que } I_F = I_L$$

Entonces:

$$P = \frac{3V_L}{\sqrt{3}} \times I_L \text{ De donde:}$$

Potencia aparente trifásica se expresa como sigue:

$$P = \sqrt{3}V_L I_L$$

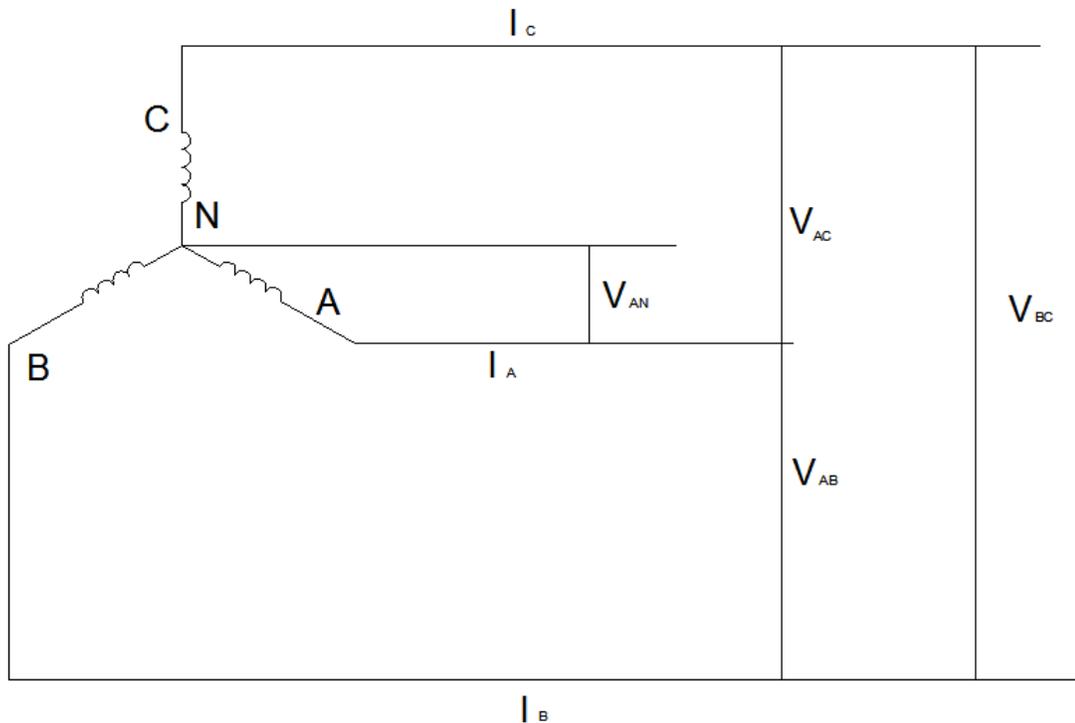


Figura 1.1 Conexión estrella de sistema trifásico a cuatro hilos.



Capítulo 1 Conceptos básicos



1.7.2 Conexión delta

En esta conexión se conecta el final de una fase con el principio de la otra fase, podemos representarla como se ve en la figura 1.9.

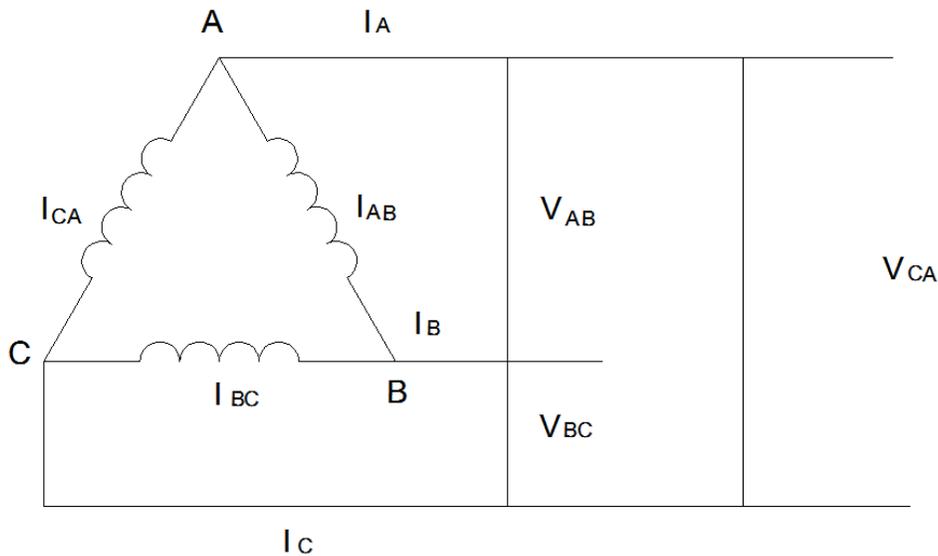


Figura 1.2 Representación de una conexión delta.

V_{AB} , V_{BC} , y V_{CA} se les llama voltaje de línea, si están desfasados 120° y tiene la misma magnitud se dice que el sistema está balanceado., por lo que $V_{AB}=V_{BC}=V_{CA}=V_L$. Siendo V_L el voltaje de línea que es igual al voltaje de fase $V_L=V_F$

En un sistema balanceado las corrientes de línea son iguales $I_A=I_B=I_C=I_L$. También si el sistema está balanceado las corrientes de fase son iguales $I_{AB}=I_{BC}=I_{CA}=I_F$

La relación entre las corrientes de fase y las corrientes de línea es como sigue:

$$I_L = \sqrt{3}I_F$$

La potencia aparente es:

$$P = \sqrt{3}V_L I_L$$



Capítulo 1 Conceptos básicos



1.8 Transformador

Casi todos los sistemas importantes de generación y distribución de potencia del mundo son, hoy en día, sistemas de corriente alterna trifásicos. Puesto que los sistemas trifásicos desempeñan un papel tan importante en la vida moderna, es necesario entender la forma como los transformadores se utilizan en ella.

Los transformadores para circuitos trifásicos pueden construirse de dos maneras. Estas son:

- a. Tomando tres transformadores monofásicos y conectándolos en un grupo trifásico.
- b. Haciendo un transformador trifásico que consiste en tres juegos de devanados enrollados sobre un núcleo común.

El transformador es una máquina eléctrica estática, dispositivo eléctrico construido con dos bobinas acopladas magnéticamente entre sí, en un núcleo común de hierro, de material ferro magnético, protegidos por un gabinete. El núcleo se construye de hierro porque tiene una gran permeabilidad, o sea, conduce muy bien el flujo magnético.

En un transformador, el núcleo tiene dos misiones fundamentales:

- a. Desde el punto de vista eléctrico siendo esta su misión principal, la vía por la cual discurre el flujo magnético, siguiendo un circuito prescrito, de una columna a otra.
- b. Desde el punto de vista mecánico es el soporte de los arrollamientos que en él se apoyan.

Se construyen de dos tipos:

Tipo núcleo: consta de un núcleo rectangular laminado, en donde se disponen las bobinas en dos lados del rectángulo.

Tipo acorazado: consta de un núcleo laminado de tres columnas, cuyas bobinas están enrolladas en la columna central.

Los transformadores reciben varios nombres según su utilización en los sistemas de potencia. Un transformador conectado a la salida de un generador, para elevar niveles de tensión hasta los 110 kV . Se le denomina transformador de unidad. El transformador situado en el otro extremo de la



Capítulo 1 Conceptos básicos



línea para reducir de nueva cuenta la tensión a niveles de distribución, se le denomina transformador de subestación. Por último al transformador que reduce la tensión a niveles donde es utilizada en la carga se le llama transformador de distribución.

En un sistema moderno de potencia, se genera energía eléctrica a niveles de tensión desde 12 *kV* a 25 *kV*. Los transformadores elevan su tensión a niveles comprendidos entre los 110 *kV* y cerca de 1000 *kV*. Para transmisiones a grandes distancias con pocas pérdidas y después bajan la tensión 12 *kV* y 34.5 *kV* para distribución local, ya que permite utilizar la potencia eléctrica en los hogares, oficinas y fábricas con seguridad a tensiones tan bajas como 120 V. En nuestro País la capacidad máxima de elevación es de 400 *kV*.

Su principal función de un transformador es convertir la tensión eléctrica alterna de un nivel a otro diferente, pero con la misma frecuencia.

Se basa en dos principios: El primero, que una corriente eléctrica produce un campo magnético (electromagnetismo). Y el segundo que, un campo electromagnético variable a través de una bobina produce una corriente eléctrica al final de la misma (inducción electromagnética). Cambiando la corriente en la bobina, cambiaremos el flujo magnético producido. El flujo producido induce un voltaje en la bobina secundaria.

La base del funcionamiento del transformador se puede derivar de la ley de Faraday

$$e_{inducida} = \frac{d\phi}{dt}$$

En donde ϕ es el flujo magnético ligado de la bobina, a través de la cual se induce la tensión. Si la bobina tiene N número de vueltas, la Ley de Faraday se puede escribir:

$$e_{inducida} = N \frac{d\bar{\phi}}{dt}$$

Donde ahora $\bar{\phi}$ es el flujo medio en la bobina.



Capítulo 1 Conceptos básicos



1.8.1 Relación de voltaje en el transformador.

Si el voltaje de la fuente es $V_p(t)$ y está aplicada en la bobina del primario, entonces la ecuación se soluciona para dicho flujo:

$$\bar{\phi} = \frac{1}{N_p} \int V_p(t) dt$$

Esta ecuación nos dice que el flujo promedio es directamente proporcional a la integral del voltaje que le llega a dicha bobina y la constante de proporcionalidad es el inverso del número de vueltas en el devanado primario.

El efecto que este flujo realiza en la bobina secundaria, va a depender de cuanto flujo pase por esta. No todo el flujo que pasa por la bobina primaria atraviesa por la bobina secundaria, ya que parte de este flujo sale del núcleo de hierro, pasa por el aire y regresa a través del mismo a la bobina primaria, este flujo es llamado flujo de dispersión. Por lo tanto el flujo que se produce en la bobina primaria se puede dividir en dos: un flujo mutuo, el cual liga a ambas bobinas y un flujo disperso que pasa a través del aire sin cruzar por la bobina secundaria.

$$\bar{\phi}_P = \phi_M + \phi_{LP}$$

Donde:

$\bar{\phi}_P$: es el flujo medio en la bobina primaria.

ϕ_M : es el flujo mutuo que liga a ambas bobinas.

ϕ_{LP} : es el flujo disperso en la bobina primaria.

De la misma forma el flujo de la bobina secundaria se divide en un flujo mutuo y en un flujo disperso que sale de la bobina secundaria y regresa a ella a través del aire si cruzar por la bobina primaria.



Capítulo 1 Conceptos básicos



$$\bar{\phi}_S = \phi_M + \phi_{LS}$$

Donde:

$\bar{\phi}_S$: es el flujo total de la bobina secundaria.

ϕ_M : es el flujo mutuo que liga a ambas bobinas.

ϕ_{LS} : es el flujo disperso en la bobina secundaria.

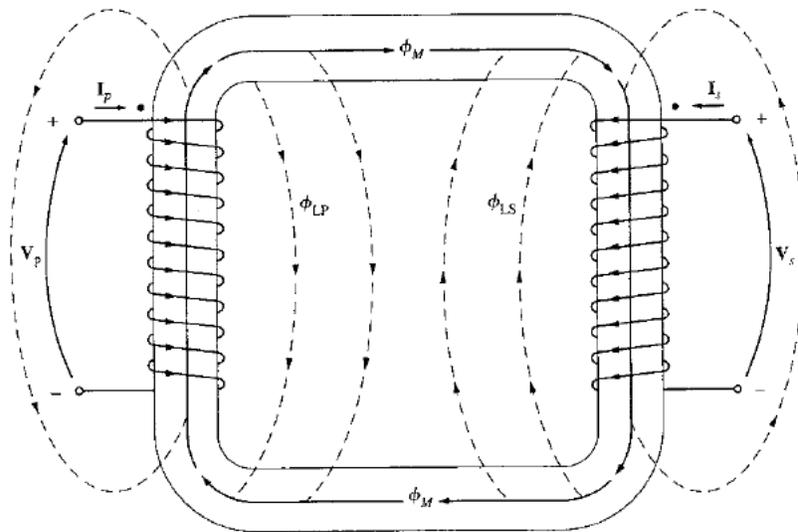


Figura 1.3 Flujos mutuo y disperso en el núcleo de un transformador.

De esta forma si se divide el voltaje producido en la bobina primaria y secundaria en sus flujos mutuo y disperso respectivamente, la Ley de Faraday se puede escribir de la siguiente manera, para cada uno de los voltajes, primario y secundario:

$$V_p(t) = N_p \frac{d\phi_M}{dt} + N_p \frac{d\phi_{LP}}{dt}$$



Capítulo 1 Conceptos básicos



$$V_s(t) = N_s \frac{d\phi_M}{dt} + N_s \frac{d\phi_{LS}}{dt}$$

De la misma manera los términos de cada uno de los voltajes se pueden escribir:

$$V_p(t) = e_p(t) + e_{LP}(t)$$

$$V_s(t) = e_s(t) + e_{LS}(t)$$

Por lo tanto el flujo mutuo del devanado primario y del devanado secundario debido a sus flujos respectivos están dados por:

$$e_p(t) = N_p \frac{d\phi_M}{dt}$$

$$e_s(t) = N_s \frac{d\phi_M}{dt}$$

De estas dos relaciones tenemos:

$$\frac{e_p(t)}{N_p} = \frac{e_s(t)}{N_s} = a$$

Esta ecuación nos dice que la relación del voltaje en el primario producido por el flujo mutuo y el voltaje en el secundario producido por el flujo mutuo es igual a la relación de vueltas del devanado primario y del devanado secundario. Puesto que en un transformador bien diseñado $\phi_M \gg \phi_{LP}$ y $\phi_M \gg \phi_{LS}$ entonces mientras menores sean los flujos de dispersión la relación del voltaje total del primario y del secundario en el transformador prácticamente es

$$\frac{V_p(t)}{N_p} = \frac{V_s(t)}{N_s} = a$$

Donde a es la relación de transformación por voltajes



Capítulo 1 Conceptos básicos



1.8.2 Corriente de excitación o de vacío.

Cuando es conectada una fuente de potencia en un transformador, fluye una corriente en su devanado primario, aun cuando no esté conectada una carga en el devanado secundario. Esta corriente es la requerida para producir el flujo en el núcleo del transformador. Dicha corriente tiene dos componentes.

- 1.- Corriente de magnetización I_m , necesaria para el flujo en el núcleo.
- 2.- Corriente de pérdidas en el núcleo I_{h+p} , producida por el fenómeno de histéresis y de corrientes parásitas. Si el voltaje aplicado en el devanado primario está dado por la expresión:

$V_p(t) = V_m \cos(\omega t)$ Volts, el flujo medio será.

$$\phi(t) = \frac{V_m \text{sen}(\omega t)}{\omega N_p}$$

Si se sabe el flujo en el núcleo, se puede encontrar la magnitud de la corriente de magnetización.

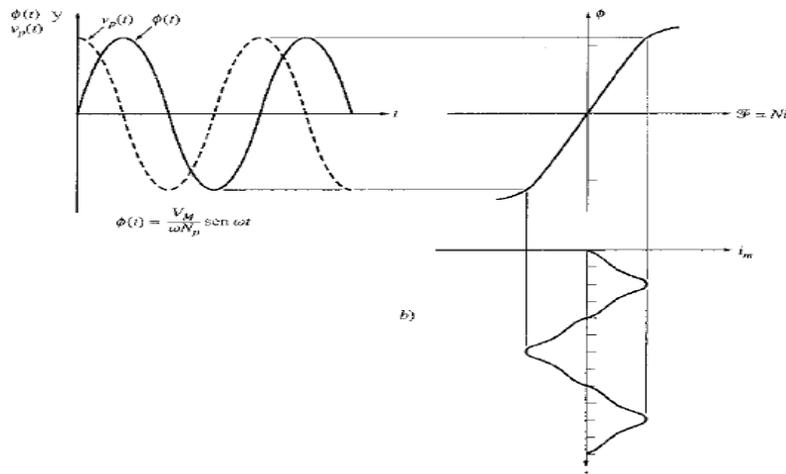


Figura 1.4 a) Curva de magnetización del núcleo del transformador b) Corriente de magnetización causada por el flujo en el núcleo del transformador.



Capítulo 1 Conceptos básicos



La corriente de magnetización en el transformador no es sinusoidal, las componentes de más alta frecuencia son debidas a la saturación magnética en el núcleo del transformador. La frecuencia fundamental de la corriente de magnetización atrasa al voltaje de la fuente con 90° , mientras mayores sean las componentes de alta frecuencia en comparación con la fundamental, debido a la saturación magnética del núcleo del transformador, mayores serán las componentes armónicas.

La otra componente de la corriente de excitación son las pérdidas en el núcleo debido a las corrientes parásitas y al proceso de histéresis.

Las corrientes de pérdidas en el núcleo no son lineales, debidas a los efectos no lineales del efecto de histéresis y que su componente fundamental está en fase con el voltaje aplicado. De este modo la corriente de excitación se compone de la siguiente forma.

$$i_{excitación} = i_m + i_{h+e}$$

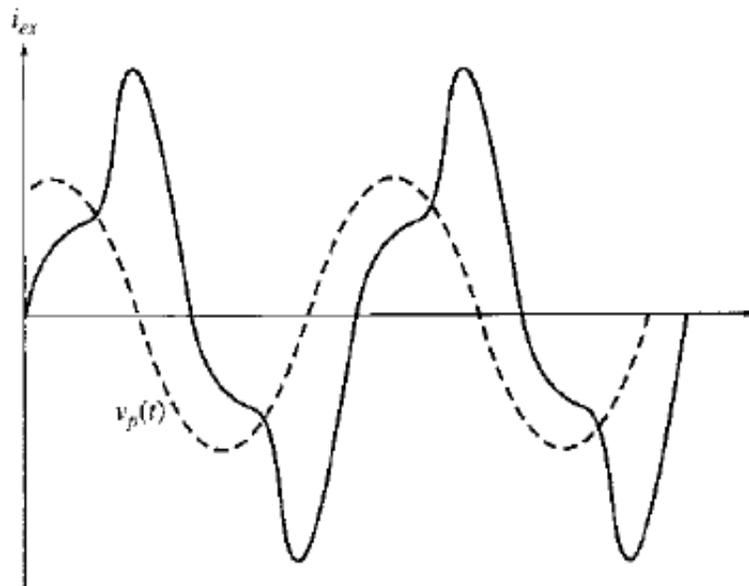


Figura 1.5 Corriente de excitación de un transformador.



Capítulo 1 Conceptos básicos



1.8.3 Relación de corrientes de un transformador

Cuando se conecta una carga en el secundario del transformador, la corriente que circula en el primario, produce una fuerza magneto motriz positiva $F = N_p I_p$ y la corriente secundaria produce una fuerza magneto motriz negativa $-F = N_s I_s$, por lo tanto la fuerza magneto motriz neta en el núcleo es:

$$F_N = N_p I_p - N_s I_s$$

Esta fuerza neta debe producir un flujo neto en el núcleo igual a:

$$F_N = N_p I_p - N_s I_s \cong \phi R$$

Donde la R es la reluctancia del núcleo del transformador, y como la reluctancia del núcleo de un transformador bien diseñado es muy pequeña, siempre y cuando el núcleo no esté saturado, entonces la relación entre las corrientes primaria y secundaria es aproximadamente:

$$F_N = N_p I_p - N_s I_s \cong 0$$

De tal forma $N_p I_p = N_s I_s$; y por lo tanto:

$\frac{I_p}{I_s} = \frac{N_s}{N_p} = \frac{1}{a}$; Donde $\frac{1}{a}$ es la relación de transformación de corrientes.

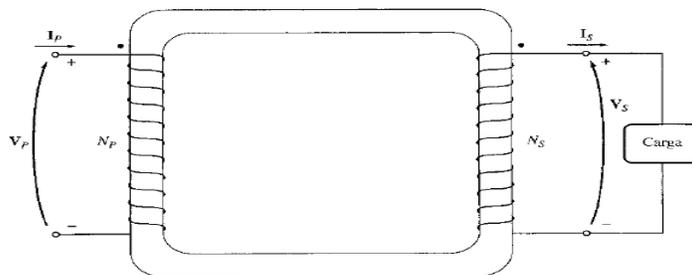


Figura 1.6 Transformador real con carga conectada a su secundario.



Capítulo 1 Conceptos básicos



1.8.4 Circuito equivalente de un transformador.

Las pérdidas que se generan en un transformador real, deben de tomarse en cuenta las siguientes características, para cualquier modelo aproximado de un transformador.

- 1.- Pérdidas en los devanados primario y secundario del transformador, por calentamiento resistivo del cobre, el cual es directamente proporcional al cuadrado de la corriente (I^2R).
- 2.- Pérdidas por corrientes parásitas. Estas son causadas por el calentamiento resistivo del núcleo del transformador y son directamente proporcionales al cuadrado del voltaje aplicado al transformador.
- 3.- Pérdidas por el efecto de histéresis. Están relacionadas con los reacomodos de los dominios magnéticos en cada semiciclo y son una función no lineal compleja del voltaje aplicado en el transformador.
- 4.- Flujo disperso. Los flujos que pasan únicamente en uno de los devanados, el cual produce una autoinductancia en ambas bobinas.

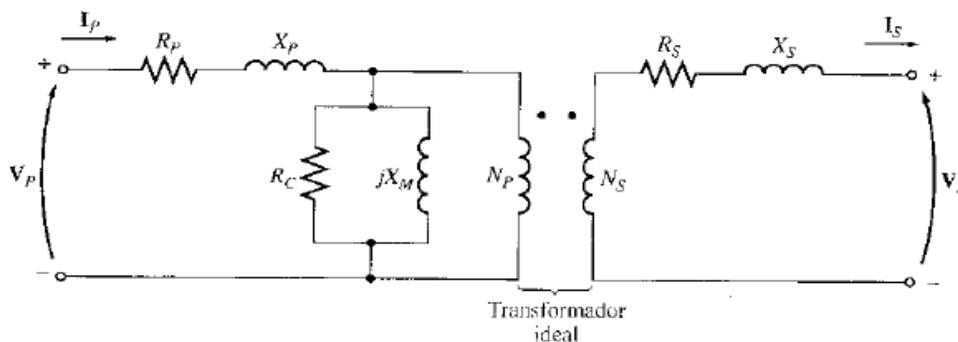


Figura 1.7 Modelo de un transformador real.



Capítulo 1 Conceptos básicos



1.9 Motor de inducción.

Los motores de inducción están basados en el accionamiento de una masa metálica por la acción de un campo giratorio. Están formados por dos partes una fija llamada estator y otra móvil llamada rotor.

El devanado del rotor que conduce la corriente alterna que se produce por inducción desde el devanado del estator, consiste de conductores de cobre o de aluminio vaciados en un rotor de laminaciones de acero. Se instalan anillos terminales de corto circuito en ambos extremos de la “jaula de ardilla” o bien en uno de sus extremos en el caso del rotor devanado. Los motores de rotor devanado son menos utilizados debido a su mayor costo y a que requieren más mantenimiento que los tipo jaula de ardilla.

1.9.1 Campo magnético rotatorio

Los sistemas eléctricos industriales utilizan sistemas trifásicos, por lo que los estatores de los motores se construyen con tres devanados dispuestos eléctricamente con defasamiento de 120° respectivamente entre ellos. Al aplicar al estator un conjunto de voltajes trifásicos, un conjunto de corrientes estáticas producen un campo magnético B_s que rota en dirección contraria a las manecillas del reloj. La velocidad de rotación del campo magnético está dada por

$$n_{\text{sinc}} = \frac{120f_e}{P}$$

Donde

n_{sinc} Velocidad del campo magnético llamado síncrono

f_e Frecuencia del sistema eléctrico

P Número de polos de la máquina

1.9.2 Desarrollo del par inducido

El campo magnético rotacional B_s induce voltaje en las barras del rotor. El voltaje inducido en cada barra está dado por la expresión:

$$e_{\text{ind}} = (v \times B) \cdot l$$

Donde



Capítulo 1 Conceptos básicos



v = velocidad de la barra, relativa al campo magnético

B = vector de densidad de flujo magnético

l = longitud del conductor en el campo magnético

El movimiento relativo del rotor con respecto al campo magnético del estator B_S induce voltajes y corrientes en las barras del rotor, produciéndose un flujo magnético del rotor B_R . El par en la máquina está dado por:

$$\tau_{ind} = kB_R \times B_S$$

Donde

τ_{ind} = par inducido en rotor

k = constante de construcción de la máquina

B_R = campo magnético del rotor

B_S = campo magnético del estator

La dirección es en sentido contrario a las manecillas del reloj, por lo tanto el rotor se acelera en esa dirección. En operación normal los campos magnéticos del estator y del rotor giran a la velocidad sincrónica, mientras el rotor gira a una velocidad menor.

1.9.3 Deslizamiento de la máquina de inducción

El voltaje inducido en una barra del rotor en un motor de inducción depende de la velocidad del rotor con respecto a los campos magnéticos. Por lo que el deslizamiento de una máquina de inducción se define como la velocidad relativa entre el campo magnético producido por las corrientes suministradas al estator y la velocidad mecánica del rotor. Expresada como sigue:

$$n_{des} = n_{sic} - n_m$$

Donde

n_{des} = velocidad de deslizamiento de la máquina



Capítulo 1 Conceptos básicos



n_{sic} = velocidad de los campos magnéticos síncronos

n_m = velocidad mecánica del eje del motor

Se puede expresar de otra forma usando una base en por unidad o en porcentaje.

Ecuación de deslizamiento:

$$s = \frac{n_{des}}{n_{sic}} \times 100\%$$

También se puede expresar así

$$s = \frac{n_{sic} - n_m}{n_{sic}} \times 100\%$$

Que en términos de velocidad angular puede expresarse como sigue:

$$s = \frac{\omega_{sic} - \omega_m}{\omega_{sic}} \times 100\%$$

De lo anterior podemos conocer la velocidad mecánica del eje del rotor en términos de la velocidad sincrónica y deslizamiento

$$n_m = (1 - s)n_{sic}$$

Y en función de la velocidad angular

$$\omega_m = (1 - s)\omega_{sic}$$

1.9.4 Circuito modelo del rotor

Cuanto mayor sea el movimiento relativo entre rotor y el campo magnético del estator, mayor será el voltaje y la frecuencia resultante en el rotor. El mayor movimiento relativo ocurre cuando el rotor se encuentra estacionario, condición conocida como rotor detenido o rotor bloqueado, de modo que en esta condición se inducen el máximo voltaje y la máxima frecuencia en el rotor. El mínimo voltaje y la mínima frecuencia ocurren cuando el rotor se mueve casi con la misma velocidad que el campo magnético del estator.



Capítulo 1 Conceptos básicos



El voltaje y la frecuencia del rotor son directamente proporcionales al deslizamiento del rotor por lo que el voltaje y la frecuencia inducidos para cualquier deslizamiento son:

$$E_R = sE_{R0}$$

$$f_R = sf_e$$

Donde

E_{R0} es el voltaje a rotor bloqueado

s Es el deslizamiento y

f_e Es la frecuencia de la línea

La reactancia de un motor de inducción depende de la inductancia del rotor y de la frecuencia y corriente del rotor, si la inductancia del rotor es L_R , la reactancia del rotor se expresa como sigue:

$$X_R = \omega_R L_R = 2\pi s f_e L_R$$

$$X_R = s(2\pi f_e L_R)$$

$$X_R = sX_{R0}$$

Donde

X_{R0} Es la reactancia del rotor cuando se encuentra bloqueado.

La corriente en el rotor se puede encontrar como sigue:

$$I_R = \frac{E_R}{R_R + jX_R}$$

$$I_R = \frac{E_R}{R_R + jsX_{R0}}$$

$$I_R = \frac{E_{R0}}{\frac{R_R}{s} + jX_{R0}}$$

Y el circuito del modelo del rotor se puede expresar como sigue:



Capítulo 1 Conceptos básicos

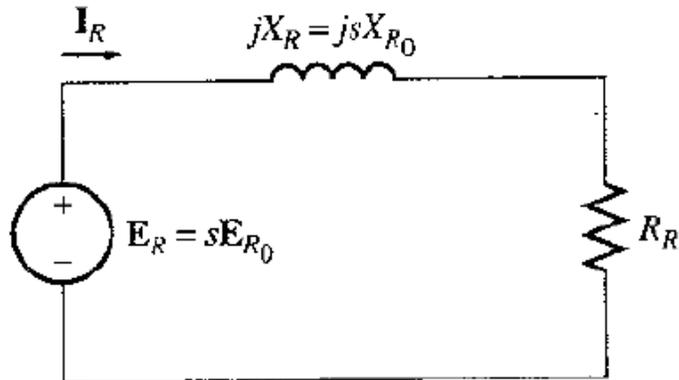


Figura 1.8 Circuito modelo del rotor de un motor de inducción

Podemos encontrar la impedancia del rotor con la siguiente expresión

$$Z_{R_{eq}} = \frac{R_R}{s} + jX_{R0}$$

Para obtener el circuito equivalente del rotor en el que el voltaje E_{R0} es constante y la impedancia del rotor contiene todos los efectos de la variación del deslizamiento. Como se ve en la figura.

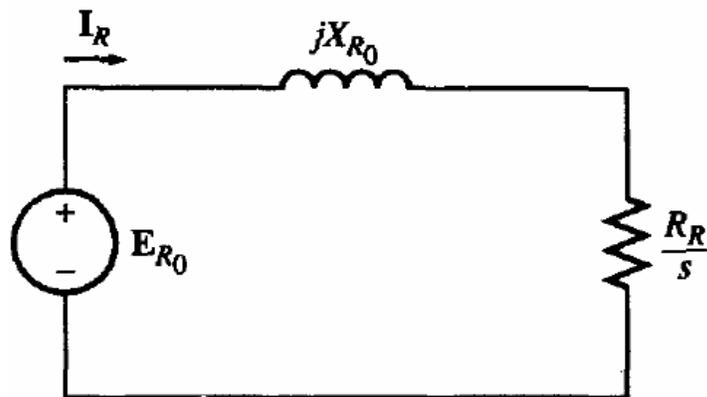


Figura 1.9 Circuito modelo del rotor con todos los efectos de frecuencia (deslizamiento) concentrados en la resistencia R_R



Capítulo 1 Conceptos básicos



1.9.5 Circuito equivalente final de una máquina de inducción

Para obtener el circuito final por fase, es necesario referir en el estator, el modelo del rotor. Si la relación de vueltas de un motor de inducción es a_{eff} el voltaje transformado es

$$E_1 = a_{eff} E_{R0}$$

Y la corriente y la impedancia rotóricas son:

$$I_2 = \frac{I_R}{a_{eff}}$$

$$Z_2 = a_{eff}^2 \left(\frac{R_R}{s} + jX_{R0} \right)$$

Y si se considera

$$R_2 = a_{eff}^2 R_R$$

$$X_2 = a_{eff}^2 X_{R0}$$

Llegamos al circuito equivalente final como se ve en la figura:

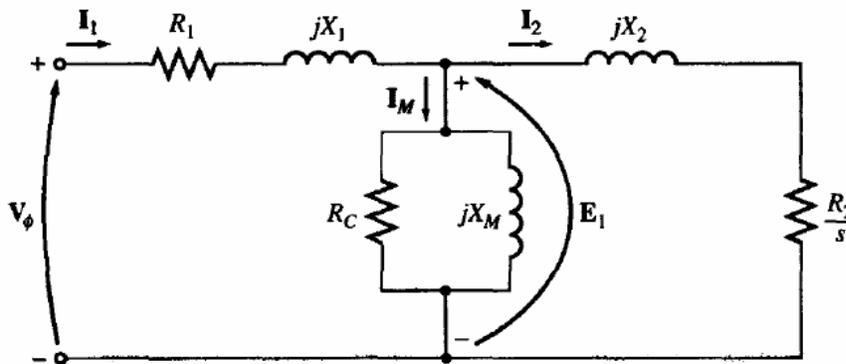


Figura 1.10 Circuito equivalente por fase de un motor de inducción



Capítulo 1 Conceptos básicos



Un circuito equivalente del motor de inducción difiere de un circuito equivalente del transformador en los efectos de la frecuencia del rotor sobre el voltaje del rotor E_R y en las impedancias del rotor R_R y jX_R .

En el momento del arranque se cumple que $\omega = 0$ por lo que $s = 1$ entonces la corriente queda en función solamente de la impedancia formada por $R_2 + jX_2$. A plena carga el deslizamiento típico está entre el 3% y el 8%.

Por lo que la impedancia para s a plena carga es mucho mayor que la impedancia s en arranque o rotor bloqueado, estando en un rango la corriente de arranque de 3 a 8 veces la corriente a plena carga.

1.9.6 Clases de diseño de motores de inducción

La National Electric Manufacturers Association (NEMA) y la International Electrotechnical Comision, han desarrollado un sistema de identificación mediante letras para los motores comerciales, según las curvas características par-velocidad para cada diseño.

Diseño clase NEMA A

Es un motor jaula de ardilla para usarse a velocidad constante.

- Buena capacidad de disipación de calor
- Baja reactancia al arranque
- El par máximo de arranque está entre 200% y 300 % del par a plena carga, y ocurre con bajo deslizamiento.
- Su corriente de arranque varía entre 5 y 7 veces la corriente nominal.
- Se utilizan para ventiladores, sopladores, bombas tornos, etc.

Diseño clase NEMA B

Se les llama motores de propósito general a este tipo pertenecen la mayoría de los motores con rotor jaula de ardilla.

- Par de arranque normal, baja corriente de arranque y bajo deslizamiento.
- Produce un par de arranque similar al del diseño NEMA A.



Capítulo 1 Conceptos básicos



- El par máximo es del 200 % del par a plena carga.
- Deslizamiento bajo (menor al 5%).
- Se prefieren por requerir poca corriente de arranque.

Diseño clase NEMA C

- Alto par de arranque entre 2 y 2.5 veces el par de arranque nominal.
- Bajas corrientes de arranque entre 3.5 y 5 veces la corriente nominal.
- Bajo deslizamiento, menos del 4.5% a plena carga.
- Debido a su alto par de arranque tiende a acelerar rápidamente.

Diseño clase NEMA D

También conocidos como de alto par y alta resistencia

- Alto par de arranque (275% o más con respecto al par a plena carga) y baja corriente de arranque.
- Alto deslizamiento a plena carga.
- La alta resistencia del rotor desplaza el par máximo hacia una velocidad muy baja.
- Diseñado para servicio pesado de arranque, en especial para grandes volantes utilizados en troqueladoras, cortadoras, trituradoras, etc.



Capítulo 2 Instalación eléctrica de planta de asfalto



2 Consideraciones generales

La instalación eléctrica en nuestro caso comienza en la alimentación de la compañía suministradora, donde se va a conectar el primer transformador, los conductores, transformadores de media tensión y la carga.

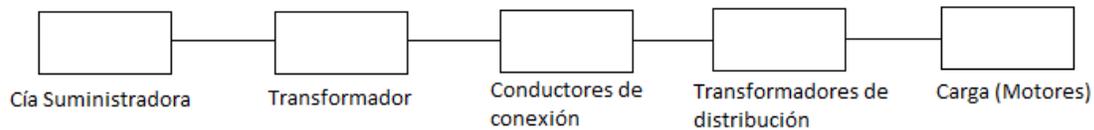


Figura 2.1 Representación en bloques de instalación eléctrica de media tensión

Elementos que intervienen en la instalación. Se toman los datos de los elementos como son: transformadores, conductores, motores, y fusibles; considerando los valores de potencia, voltaje, impedancia, reactancia, ampacidad, corrientes nominales y corrientes de corto circuito. Adelantando que los valores de voltaje corriente son valores efectivos o valores rms, normalmente las tablas de los valores están dadas en valores efectivos.

2.1 Fusibles

Los fusibles son los dispositivos de sobre corriente más simples que se utilizan en la protección de redes de distribución. Al mismo tiempo son uno de los más confiables, dado que pueden brindar protección aun sin estar sujeto a tareas de mantenimiento. Antiguamente los fusibles eran finos hilos de cobre o plomo, colocados al aire, lo cual tenía el inconveniente de que al fundir se saltaban pequeñas partículas incandescentes, dando lugar a otras averías en el circuito. Actualmente la parte o elemento fusible suele ser un fino hilo de cobre o aleación de plata, o bien una lámina del mismo metal para fusibles de gran intensidad, colocados dentro de unos cartuchos cerámicos llenos de arena de cuarzo, con lo cual se evita la dispersión del material fundido; por tal motivo también se denominan cartuchos fusibles. Los cartuchos fusibles son protecciones desechables, cuando uno se funde se sustituye por otro en buen estado.

2.1.1 Clase de fusibles

En cuanto a la clase de servicio los fusibles vienen designados mediante dos letras; la primera nos indica la función que va a desempeñar, la segunda el objeto a proteger:

Primera letra. Función.

- Categoría “g” fusibles de uso general.
- Categoría “a” fusibles de acompañamiento.



Capítulo 2 Instalación eléctrica de planta de asfalto



Segunda letra. Objeto a proteger.

- Objeto "I": Cables y conductores.
- Objeto "M": Aparatos de conexión.
- Objeto "R": Semiconductores.
- Objeto "B": Instalaciones de minería.
- Objeto "Tr": Transformadores.

La combinación de ambas letras nos da múltiples tipos de fusibles, algunos más utilizados:

- Tipo gF: Fusible de fusión rápida. Protege contra sobrecargas y cortocircuitos.
- Tipo gT: Fusible de fusión lenta. Protege contra sobrecargas sostenidas y cortocircuitos.
- Tipo gB: Fusibles para la protección de líneas muy largas.
- Tipo aD: Fusibles de acompañamiento de disyuntor.
- Tipo gG/gL: Norma CEI 269-1, 2, 2-1. Es un cartucho limitador de la corriente empleado fundamentalmente en la protección de circuitos sin puntas de corriente importantes, tales como circuitos de alumbrado, calefacción, etc.
- Tipo gI: Fusible de uso general. Protege contra sobrecargas y cortocircuitos, suele utilizarse para la protección de líneas aunque se podría utilizar en la protección de motores.
- Tipo gR: Semiconductores.
- Tipo gII: Fusible de uso general con tiempo de fusión retardado.
- Tipo aM: Fusibles de acompañamiento de motor, es decir, para protección de motores contra cortocircuitos y por tanto deberán ser protegido el motor contra sobrecargas con un dispositivo como podría ser el relé térmico.

En general todos los fusibles cuando se funde uno, el resto de los fusibles que no han fundido muy posiblemente hayan perdido las características de fábrica al ser atravesados por corrientes y tensiones que no son las nominales, es por eso que en un sistema trifásico cuando funde un fusible lo correcto es cambiar los tres así como en un sistema monofásico lo correcto es cambiar ambos fusibles cuando uno de ellos ha fundido.



Capítulo 2 Instalación eléctrica de planta de asfalto



Los fusibles MT (Media Tensión) son utilizados como elementos que actúan rápidamente en caso de cortocircuito. En consecuencia, protegen eficazmente a los equipos contra los efectos dinámicos y térmicos del cortocircuito.

Los fusibles de media tensión se pueden utilizar para la protección de:

- Transformadores
- Motores
- Condensadores
- Transformadores
- Cables de alimentación

2.2 Láminas de fusibles

Láminas Fusibles Tipo Universal. Las láminas fusibles son dispositivos de protección contra sobre corrientes; se denominan Tipo Universal ya que su intercambiabilidad tanto mecánica como eléctrica, está normalizada para todos los fabricantes. FEDELCA produce Láminas fusibles bajo las normas IEEE – ANSI y CADAPE, en los tipos H.K. y T. desde 1 amp. Hasta 200 amp., en 15 y 34.5 KV. Las láminas fusibles FEDELCA, mantienen inalterables durante el servicio, sus características de tiempo–corriente de acuerdo con las curvas normalizadas. Su temperatura de trabajo es baja; para atender el objetivo de estabilidad de propiedades, se utiliza en el elemento fusible, metales o aleaciones que no están sujetas a oxidaciones progresivas y con temperaturas de trabajos inferiores a 100°C con punto de fusión en 230°C.



Figura 2.2 Láminas fusibles.



Capítulo 2 Instalación eléctrica de planta de asfalto



La diferencia entre fusibles está determinada por la relación de velocidad, la cual se define como la relación entre las corrientes de fusión para 0.1 s y 300 segundos en fusibles hasta 100 A y 0.01 segundos y 600 s en fusibles por arriba de 100 A. Por ejemplo, un fusible T de 6 A tiene una corriente de fusión de 130 A para 0.1 segundos y 12 A para 300 segundos lo que resulta en una relación de velocidad de 10.8. Los fusibles lentos tienen una relación de velocidad entre 10.0 segundos y 13.0 segundos. Los fusibles rápidos tienen una relación de velocidad entre 6.0 y 8.1. A continuación se listan los tipos de link fusibles que existen hoy en día en el mercado según normas NEMA y ANSI C.37.40, 41, 42, 46, 47 y 48.

2.3 Fusibles de Potencia

Los fusibles para distribución eléctrica en exteriores tipo SMD, están reconocidos internacionalmente por su magnífica protección de transformadores, líneas, cables y bancos de capacitores en subestaciones de distribución y en alimentadores aéreos. Los fusibles de potencia SMD-20 y SMD-40 con sus unidades de fusibles SMU, proveen protección para un amplio espectro de fallas. Los productos detectan e interrumpen todas las fallas –grandes, medianas y pequeñas (hasta la mínima corriente de fusión); con voltaje de línea a línea o de línea a tierra, en el fusible; si la falla es en el lado primario o en el lado secundario del transformador independientemente del tipo de conexión de los devanados del transformador

Fusibles De Potencia Tipo SMD-20

Se ofrecen en la modalidad de montaje en poste para uso en líneas aéreas, así como también, en tres diferentes modelos tipo estación, en voltajes hasta 38 kV y una capacidad de corriente hasta de 200 Amperes. Las capacidades interruptivas son las siguientes

Voltaje, Amperes RMS Simétricos.

Tabla 2.1 Capacidad interruptiva SMD-20

Nominal	Máximo	60 Hz	50 Hz
14.4	17.0	14 000	11 200
25	25	12 500	10 000
34.5	38	10 000	8 000

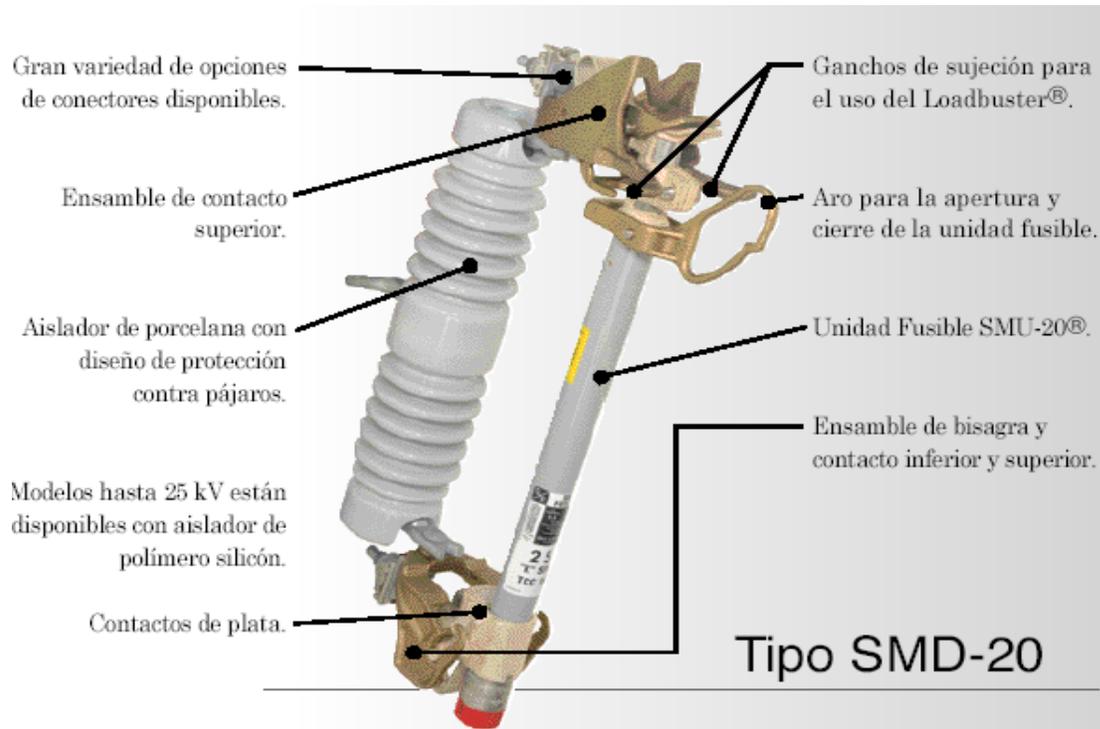


Figura 2.3 Fusible tipo SMD-20

2.4 Transformadores de instrumentos

Reciben este nombre generalmente los transformadores que alimentan instrumentos de medición y protección de alta tensión y que funcionan con bajo voltaje. Estos transformadores son llamados transformadores de corriente y transformadores de voltaje, Se van a encargar de reducir corriente y voltaje con valores seguros para medición y seguridad de los operadores.

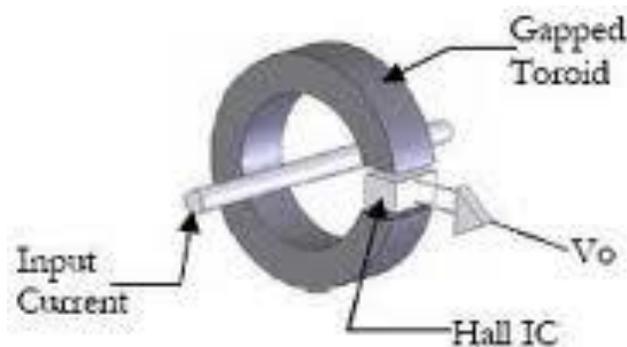


Figura 2.4 Representación de un transformador de instrumento.



Capítulo 2 Instalación eléctrica de planta de asfalto



2.5 Carga o burden en los transformadores de corriente

Burden o Potencia Nominal de un Transformador de Corriente. Es la capacidad de carga que se puede conectar a un transformador, expresada en VA o en Ohms a un factor de potencia dado. El término "Burden" se utiliza para diferenciarlo de la carga de potencia del sistema eléctrico. El factor de potencia referenciado es el del burden y no el de la carga.

Los TC alimentan instrumentos de medición o de protección como en el caso de un relevador de sobre corriente (51), de distancia (21), de sobre corriente instantáneo (50), estos instrumentos tienen un consumo de potencia, con lo que se puede designar el tipo de transformador de corriente.

2.6 Transformadores de potencial

Los TP utilizan la señal de voltaje de alta tensión y su función es aislar los instrumentos con los que operan en baja tensión. Unos son del tipo inductivo y operan bajo el principio de inducción electromagnética. Y los del tipo capacitivo que operan como divisores de tensión.

2.7 Carga o burden de un TP

En los TP la carga se conecta en paralelo por lo que la corriente que demanda es muy pequeña y las capacidades en VA son bajas y se expresan como una potencia. Se utilizan mayormente para instrumentos de medición.

2.8 Concepto de relevador

El relé o relevador es un dispositivo electromecánico. Funciona como un interruptor controlado por un circuito eléctrico en el que, por medio de una bobina y un electroimán, se acciona un juego de uno o varios contactos que permiten abrir o cerrar otros circuitos eléctricos independientes. Existen relevadores de núcleo móvil, de armadura, de estado sólido.

2.8.1 Consideraciones teóricas

Los cortos circuitos en sistemas eléctricos de potencia suceden cuando falla el aislamiento; debido a sobretensiones en el sistema causadas por relámpagos, sobretensiones de maniobra, falla de aislamiento por contaminación o por otras causas naturales o mecánicas.

En un corto circuito las magnitudes de las corrientes pueden ser varias veces mayores que las corrientes de operación normal. Si esto persiste puede causar daño en el aislamiento, que se funda el conductor, presencia de fuego, incluso explosión.



Capítulo 2 Instalación eléctrica de planta de asfalto



Los devanados y los buses de las barras pueden sufrir daños mecánicos debido a que se crean grandes fuerzas magnéticas durante la falla. Con las protecciones adecuadas las fallas pueden ser eliminadas rápidamente de un sistema eléctrico de potencia.

La protección se define como la ciencia y el arte de la aplicación y el establecimiento de enlaces y/o fusibles que proporcionan sensibilidad máxima en fallas y condiciones no deseables en un sistema de potencia. Es decir básicamente se trata de definir las condiciones no deseables de las permitidas que los relés puedan detectar. Es importante también eliminar únicamente las fallas, manteniendo la continuidad del suministro de energía a la carga del sistema el mayor tiempo posible.

Aunque interruptores y relevadores son usados ampliamente para proteger la parte primaria de un sistema de potencia con rangos de voltaje entre 115 KV a 230 KV, también se utilizan en bajo voltaje de 600 V o menores.

Tres tecnologías de relés son usados actualmente

- 1.- relés electromecánicos utilizados desde 1900
- 2.- relés de estado sólido, comienza su uso alrededor de 1950 y
- 3.- relés computarizados (microprocesados) que hacen su aparición desde 1980

Los relés microprocesados presentan beneficios como flexibilidad, confiabilidad con capacidad de autocontrol, ubicación de fallas grabando datos y por medio de comunicación remota a través de una PC permite conocer los resultados del o los eventos de las fallas. El relevador microprocesado presenta constante desarrollo y expansión en la industria.

2.8.2 Relevador instantáneo 50

Relevador de sobrecorriente Instantáneo (50): Es un relevador con “respuesta instantánea” para un valor predeterminado de corriente. Su tiempo de respuesta u operación es menor a 3 ciclos (0.05 segundos).

Un sistema de protección tiene tres componentes básicos.

1. Instrumentos (transformador de corriente, transformador de voltaje)
2. Relevadores
3. Circuito de interruptor



Capítulo 2 Instalación eléctrica de planta de asfalto

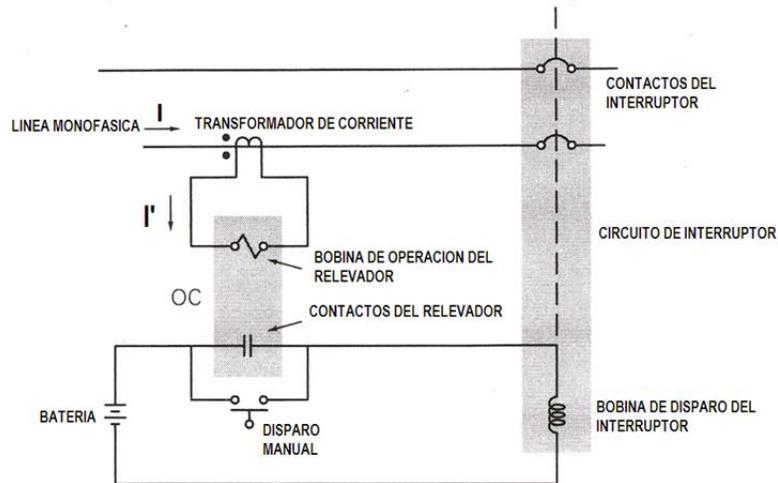


Figura 2.5 Representación de un relevador electromecánico

La figura muestra la protección de sobre corriente de una línea monofásica utilizando un transformador de corriente, un relevador de sobre corriente un circuito de interruptor para una fase. La función del transformador de corriente I (TC) que tiene un rango en miles de amperes es entregar en el devanado secundario (TC) una I' con rango de 0 a 5 amperes, valores que son más convenientes para las mediciones con las siguientes ventajas.

Seguridad: los transformadores de corriente, presentan aislamiento de la parte del sistema de potencia, por lo que el personal operativo puede trabajar en un entorno seguro.

Economía: pocas entradas al relé permiten que sean pequeños, simples y que no se necesite cambiar otro circuito.

Precisión: los transformadores instrumentales reproducen con precisión corrientes y voltajes en un amplio rango de operación en un sistema eléctrico de potencia.

La función de un relevador es la de discriminar entre operación normal del sistema y condiciones de falla.

El diseño de los componentes de un sistema de protección toma en cuenta:

Confiabilidad: operan cuando la falla sucede aún después de no haber actuado por meses o años.

Selectividad: Evitar innecesariamente falsos disparos.

Velocidad: operar rápidamente para minimizar la duración de la falta y evitar daños al equipo.



Capítulo 2 Instalación eléctrica de planta de asfalto



Economía: Proporciona máxima protección a un costo mínimo.

Simplicidad: minimizar la protección del equipo y los circuitos propios de este.

Como podemos ver es difícil satisfacer todos estos criterios simultáneamente, pero estos compromisos deben estar presentes en un sistema de protección.

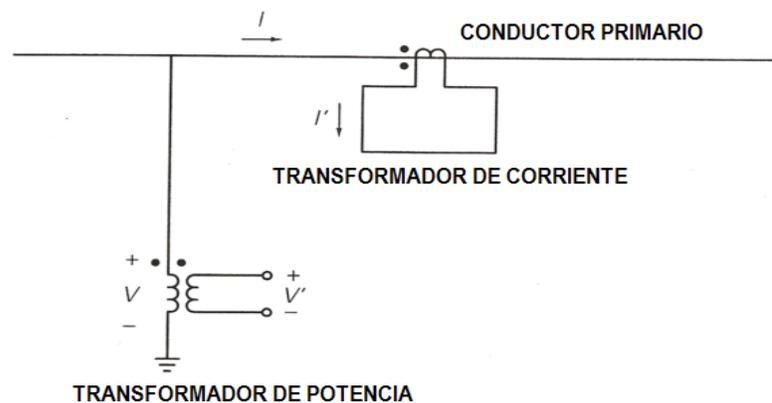


Figura 2.6 Conexión de TC y TP en una barra

Hay dos tipos de instrumentos de medición uno se conoce como transformador de voltaje (o transformador de potencia), y el otro como transformador de corriente. En la figura 2.6 se observa que el transformador de voltaje está conectado en la línea primaria y está aislado del sistema de alimentación. El transformador de voltaje y el transformador de corriente se encargan de reducir voltaje y corriente hasta llegar a valores estandarizados y adecuados para la operación de los relevadores. Para Los propósitos de un sistema de potencia estos instrumentos se consideran exactos y adecuados.

2.8.3 Relevador electromecánico de tiempo inverso 51

Tanto los relés de tiempo instantáneos como los de tiempo inverso pueden detectar condiciones de sobre corriente en sus zonas de protección como también en las zonas adyacentes. Sin embargo, en la práctica, esta selectividad se logra mediante una adecuada calibración de sus sensibilidades o mediante un retardo intencional, o bien, combinando estas dos alternativas.

Cualquiera que sea el tipo de relé, de inducción o estático, existen términos comunes que se definen a continuación y que son básicos para la comprensión del empleo y calibración de estos elementos.



Capítulo 2 Instalación eléctrica de planta de asfalto



Tap: este dispositivo permite variar la sensibilidad del relé permitiendo que opere a diferentes valores de corriente.

Corriente mínima de operación (pick up): es aquella corriente mínima que produce el cambio de los contactos del relé de abierto a cerrado si son contactos normalmente abiertos y de cerrados a abiertos si son contactos normalmente cerrados. Corriente mínima de operación (corriente pickup): es el valor de corriente justa y necesaria que vence la inercia de las partes móviles.

Los relés de sobre corriente con retardo poseen características de operación tal que el tiempo varía inversamente con la magnitud de la corriente que detecta. Los relés de sobre corriente más comúnmente usados, son tres: inverso, muy inverso y extremadamente inverso. En las siguientes gráficas de relé de tipo inverso Westinghouse, se muestran los tiempos de operación en función del múltiplo de la corriente mínima de operación que se aplique al relé y de una palanca de tiempo. Cuando el relé alcanza su condición de operación, esta se ejecuta a través del cierre de un contacto normalmente abierto; contacto que se utiliza para mandar la señal de disparo del interruptor correspondiente.



Capítulo 2 Instalación eléctrica de planta de asfalto

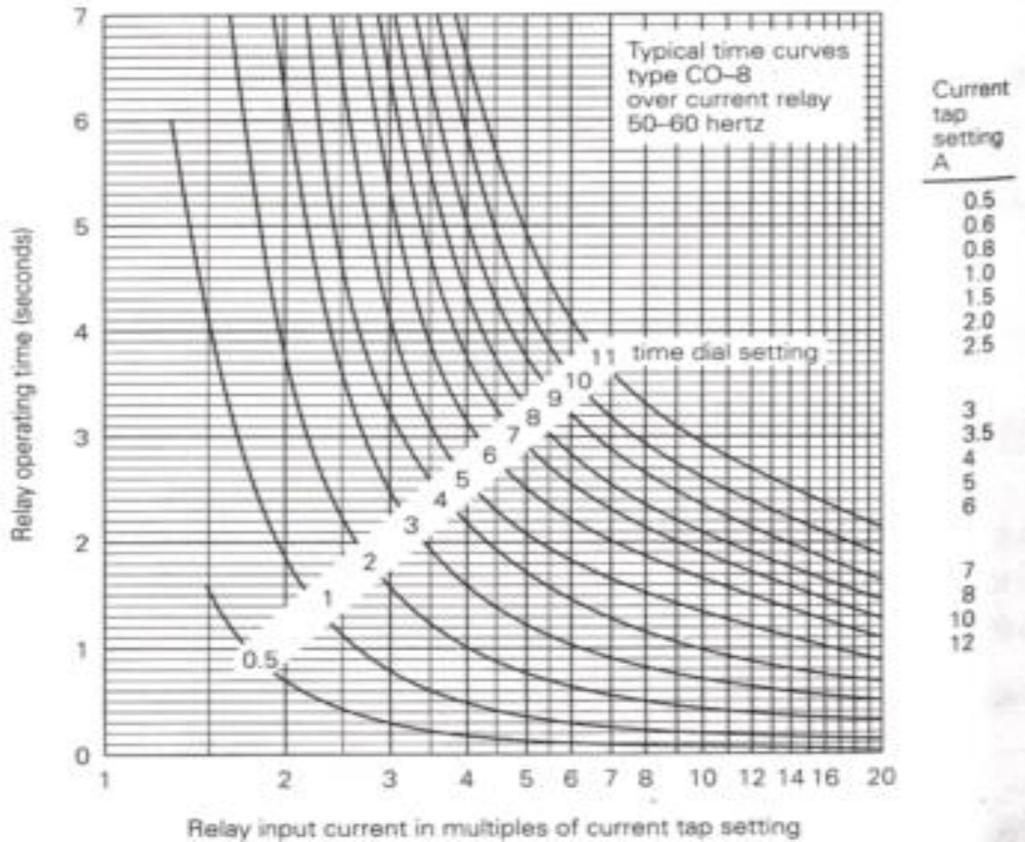


Figura 2.7 Curvas de múltiplos de corriente de entrada al relé contra tiempo en segundos.

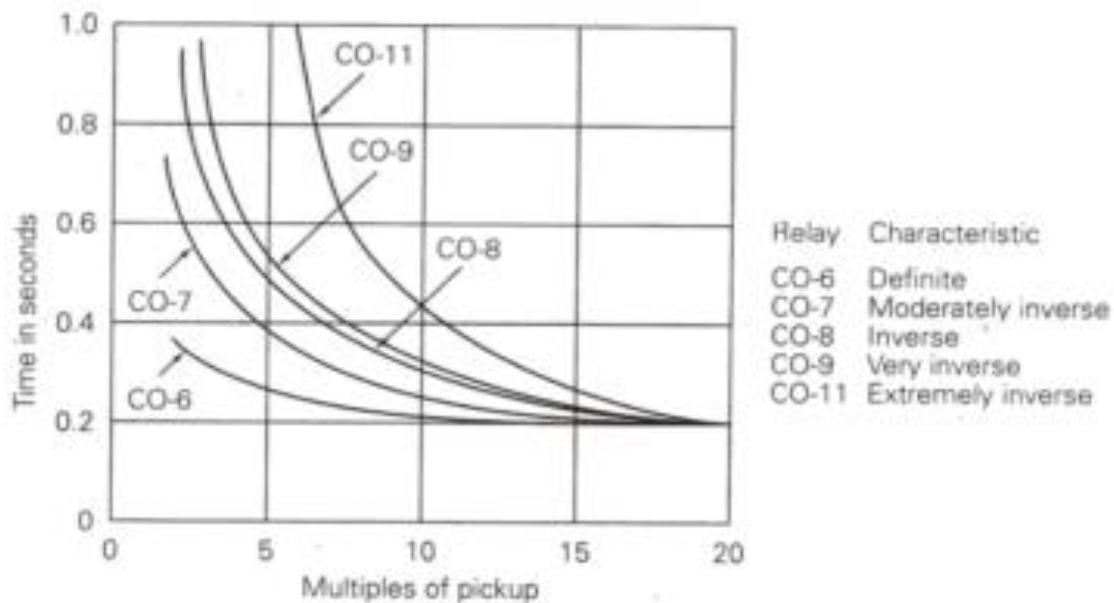


Figura 2.8 Curvas de los diferentes relés CO-6 instantáneo, CO-7 inverso moderado, CO-8 inverso, CO-9 muy inverso, CO-11 extremadamente inverso.

2.8.4 Relevador diferencial 87

El relé diferencial compara permanentemente la corriente que entra a una carga con la que sale del equipo que protege; en condiciones normales de trabajo estas corrientes son iguales, pero en caso de romperse esta igualdad, significará que dentro de la zona protegida existe una falla de aislamiento.

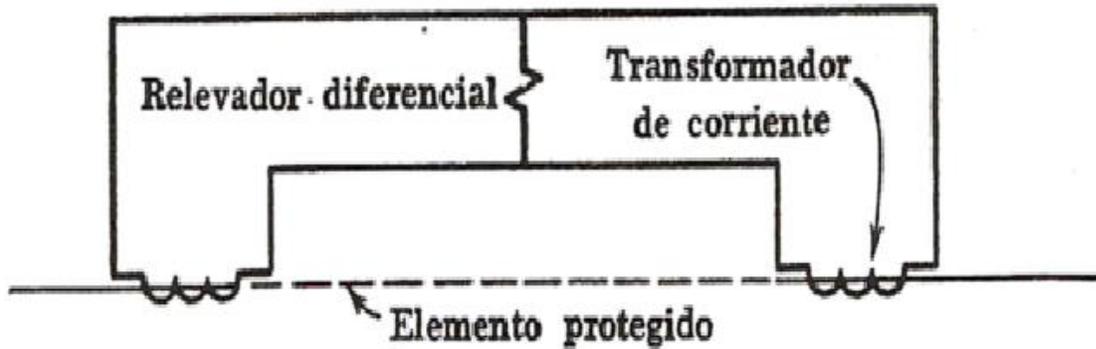


Figura 2.9 Representación de elemento diferencial

Ahora la corriente va del circuitito primario hacia una carga con falla en X. La condición es como se muestra en la figura, si los transformadores de corriente tienen la misma relación de transformación y están correctamente conectados la corriente secundaria circulará entre los TC's sin pasar por el relevador diferencial.

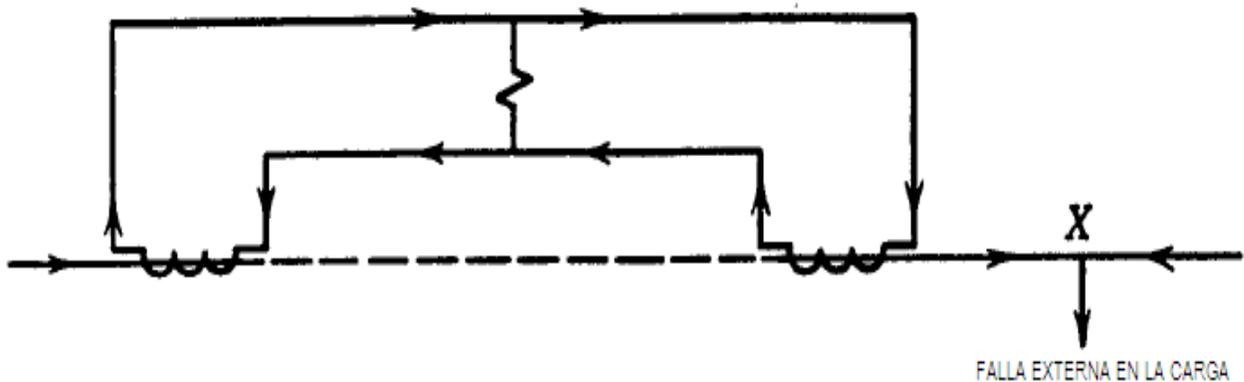


Figura 2.10 Representación de falla externa con respecto del elemento a proteger

En caso de falla dentro de la zona protegida, la igualdad anterior se rompe y la diferencia que exista circulará por el elemento de operación. Como se muestra en la figura, y será suficiente la



Capítulo 2 Instalación eléctrica de planta de asfalto



corriente de cualquiera de los dos lados para que fluyan las corrientes diferentes por la parte baja de los TC'S, operando el relevador diferencial.

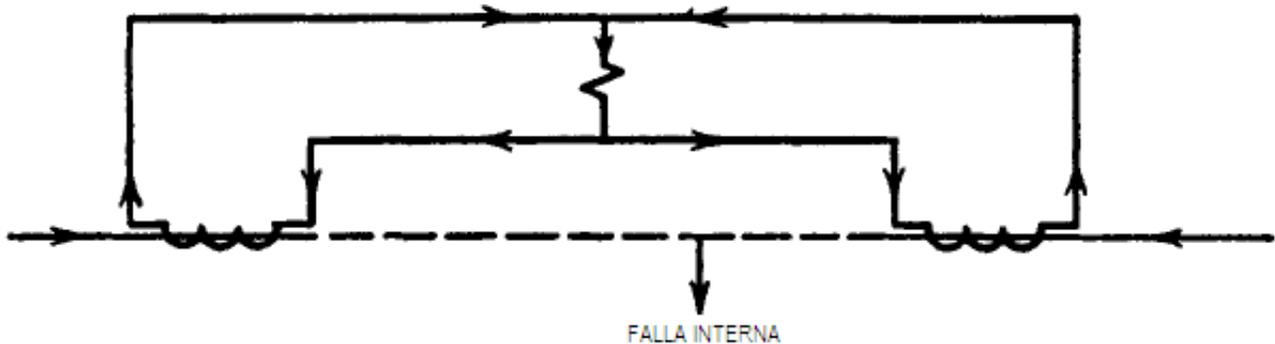


Figura 2.11 Falla en zona protegida

El relé diferencial 87 para evitar operaciones en falso cuenta con dos elementos de retención y un elemento de operación. Cuando por el elemento de operación circula una corriente mayor en una cierta relación respecto a la corriente menor que circula por los elementos de retención, el relé dará la señal de disparo.

2.8.5 Relevador de estado sólido

Se llama relé de estado sólido a un circuito híbrido, normalmente compuesto por un optoacoplador que aísla la entrada, un circuito de disparo, que detecta el paso por cero de la corriente de línea y un triac o dispositivo similar que actúa de interruptor de potencia. Su nombre se debe a la similitud que presenta con un relé electromecánico; este dispositivo es usado generalmente para aplicaciones donde se presenta un uso continuo de los contactos del relé que en comparación con un relé convencional generaría un serio desgaste mecánico, además de poder conmutar altos amperajes que en el caso del relé electromecánico destruirían en poco tiempo los contactos. Estos relés permiten una velocidad de conmutación muy superior a la de los relés electromecánicos.

2.8.6 Relevador microprocesado

El relé basado en un microprocesador, proporciona una combinación de funciones como son la protección, vigilancia, control y automatización. Cuenta con un enlace de comunicación que permite una operación permanente, confiable y segura.



Capítulo 2 Instalación eléctrica de planta de asfalto



El microprocesador: Que contiene dos componentes de memoria:

La memoria RAM, que tiene varias funciones incluyendo retención de los datos de entrada al procesador y es necesaria para almacenar la información.

La memoria ROM que es usada para almacenar programas permanentemente.

Por ejemplo, en el Sel-387 cuenta con puerto serial, sección de control, registro de eventos con mediciones, LED'S indicadores de relés 50, 51, 87, LED'S indicadores de disparo, así como de LED'S indicadores de fallas en cualquiera de las líneas individualmente o entre ellas, también fallas a tierra y de sobre corriente en las bobinas del elemento protegido por este relevador. Finalmente se tiene una salida de pantalla que nos muestra las mediciones de interés.

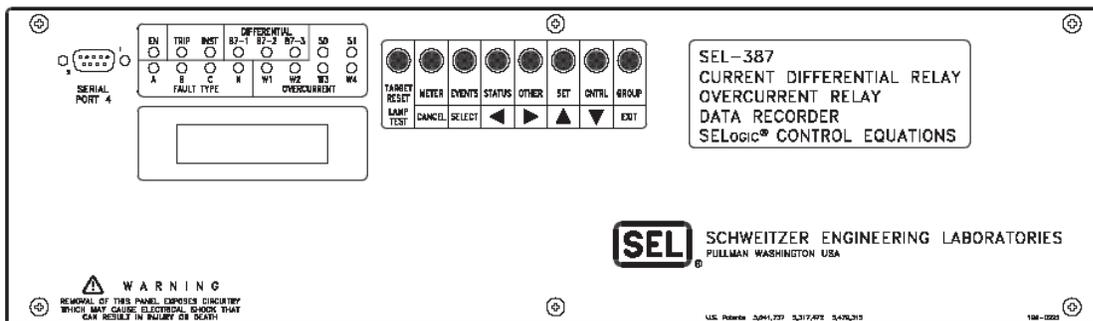


Figura 2.12 Panel frontal de relevador microprocesado SEL 387

En la figura se observan las conexiones disponibles del SEL-387 en la parte posterior del panel marcadas con etiquetas correspondientes a contactos de entrada, contactos de salida, contactos para conectar las bobinas del elemento a proteger, los transformadores de corriente, la fuente de energía para corriente directa y corriente alterna, y conexión a tierra.

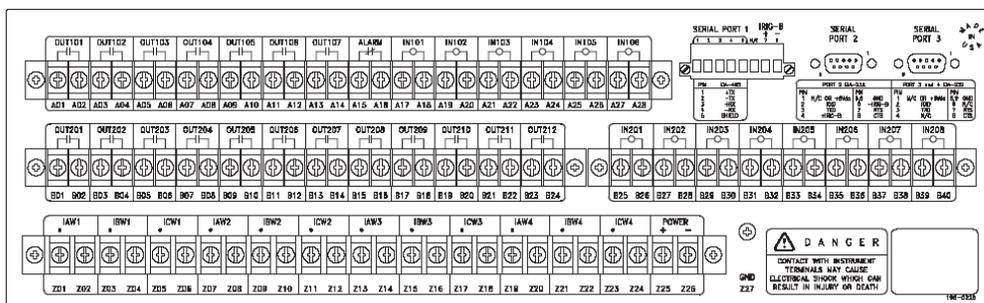


Figura 2.13 Panel posterior del relevador microprocesado SEL 387



Capítulo 2 Instalación eléctrica de planta de asfalto



2.8.7 Ventajas de los relevadores microprocesados

Las operaciones incorrectas son menos probables con los relevadores computarizados.

Autodiagnóstico: Los relevadores microprocesados tienen la capacidad de autodiagnóstico continuo, que incluye chequeos de memoria y pruebas de módulos de entrada análogos. En caso de falla, usualmente los relevadores, o bloquean o intentan una recuperación, dependiendo del disturbio detectado.

Registro de eventos y disturbios: Estos relevadores pueden producir registros de eventos cada vez que existe una operación de la función de protección, la energización de un estado de entrada, o cualquier falla del hardware. Igualmente, los registros de disturbios pueden ser generados en varios canales análogos, junto con todos los estados de entrada y la información de salida del relevador.

Integración de sistemas digitales: La tecnología actual incluye muchas tareas en una subestación. Tales como comunicaciones, medida y control. Estas funciones pueden integrarse en un sistema digital de tal manera que una subestación pueda ser operada de una manera más rápida y confiable. La fibra óptica está siendo ahora utilizada para proporcionar enlaces de comunicación entre varios elementos del sistema para evitar los problemas de interferencia que pueden ocurrir cuando se usan conductores metálicos.

Protección adaptable: Con la capacidad de programación y de comunicación de los sistemas digitales, los relevadores microprocesados pueden programar protección adaptable. Esta característica permite que los ajustes del relevador sean cambiados dependiendo de las condiciones de operación del circuito, garantizando así los ajustes convenientes del relevador para una situación en tiempo real para no usar un ajuste basado en el arreglo más crítico del sistema.

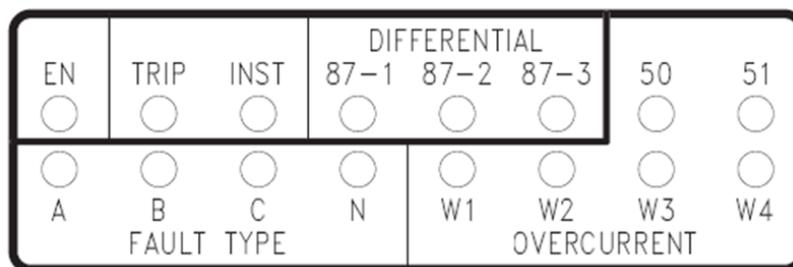


Figura 2.14 Panel frontal con señalización luminosa de SEL 387



Capítulo 2 Instalación eléctrica de planta de asfalto



LED	ETIQUETA	DESCRIPCION
1	EN	Relevador habilitado
2	TRIP	Disparo de relevador
3	INST	Disparo instantáneo
4	87-1	Elemento diferencial primera
5	87-2	Elemento diferencial segunda
6	87-3	Elemento diferencial tercera
7	50	Elemento de disparo instantáneo
8	51	Elemento de disparo de tiempo inverso
9	A	Fase A involucrada en falla
10	B	Fase B involucrada en falla
11	C	Fase C involucrada en falla
12	N	Elemento residual
13	W1	Sobre corriente en primera bobina
14	W2	Sobre corriente en segunda bobina
15	W3	Sobre corriente en tercera bobina
16	W4	Sobre corriente en cuarta bobina

Figura 2.15 Descripción de elemento que se alarma.

2.9 Transformador, motor y conductores

El transformador. Es el elemento principal de la subestación, se encarga de reducir el voltaje de la compañía suministradora, y de entregar los voltajes de utilización correspondientes a la instalación de la industria. Por su medio ambiente de utilización los transformadores son de tipo:

- Intemperie
- Interior

Por su enfriamiento pueden ser de tipo:

- Enfriado por aire se representa por la letra A
- Enfriado por aceite y aire se representa por las letras OA
- Enfriado por aceite y aire con circulación de aire forzado se representa por las letras OA/FA
- Enfriado por aceite y aire con aceite forzado con circulación de aceite forzado se representa por las letras OA/FOA.



Capítulo 2 Instalación eléctrica de planta de asfalto



Características del transformador

- Potencia
- Voltaje primario y voltaje secundario
- Frecuencia
- Impedancia por ciento

Tabla 2.2 Magnetización de transformadores

CAPACIDAD DEL TRANSFORMADOR	MÚLTIPLO
MENORES DE 1500 KVA	8
MAYORES DE 1500 KVA Y MENORES DE 3750 KVA	10
MAYORES DE 3750 KVA	12

Tabla 2.3 Factores de enfriamiento

TIPO DE TRANSFORMADOR	CAPACIDAD [kVA]	ENFRIAMIENTO		TEMPERATURA	
		TIPO	FACTOR	ELEVACIÓN [C°]	FACTOR
SECO	<2500	AA	1	150	1
		FA	1.3		
	<2500	OA	1	55/65	1.2
CENTRO DE CARGA				65	1
	500	FA	1	55/65	1.2
				65	1
	>500	FA	1.15	55/65	1.2
	<2000			65	1
	>2000	FA	1.25	55/65	1.2
	<2500			65	1
SUB ESTACIÓN PRIMARIA		OA	1	55/65	1.2
		FA	1.33	65	1
		FOA	1.67	55/65	1.2
				65	1
	<2500	AA	1	150	1



Capítulo 2 Instalación eléctrica de planta de asfalto



Características del motor.

- Potencia
- Revoluciones por minuto
- Diseño
- Voltaje
- Corriente

Es importante considerar la corriente a rotor bloqueado por lo que es común usar la siguiente tabla:

Tabla 2.4 Letras de código de rotor bloqueado.

Letra de código	KVA/HP A Rotor Bloqueado	Letra de código	KVA/HP A Rotor Bloqueado
A	Hasta 3.14	L	9.0 a 9.99
B	3.15 a 3.54	M	10.0 a 11.19
C	3.55 a 3.99	N	11.2 a 12.49
D	4.0 a 4.49	P	12.5 a 13.99
E	4.5 a 4.99	R	14.0 a 15.99
F	5.0 a 5.59	S	16.0 a 17.99
G	5.6 a 6.29	T	18.0 a 19.99
H	6.3 a 7.09	U	20.0 a 22.39
J	7.1 a 7.99	V	22.4 y superior
K	8.0 a 8.99		



Capítulo 2 Instalación eléctrica de planta de asfalto



Tabla 2.5 Valores de reactancia para el cálculo de interrupción y para el primer ciclo.

Cálculo de tarea de interrupción	Componente del sistema	Valor de reactancia para cálculos de mediano y alto voltaje según: IEEE C37.010 - 1999 [1] IEEE C37.5 - 1979 [3]	Valor de reactancia para cálculos de bajo voltaje (2)
Primer ciclo (Cálculos momentáneos)	Compañía suministradora de potencia.	X_s	X_s
	Todos los turbogeneradores, todos los hidrogeneradores, con devanados amortiguadores; todos los condensadores.	$1.0 X''_d$	$1.0 X''_d$
	Hidrogeneradores sin devanados amortiguados.	$0.75 X''_d$	$0.75 X''_d$
	Todos los motores síncronos.	$1.0 X''_d$	$1.0 X''_d$
	Motores de inducción.		
	Por encima de 1000 HP a 1800 rev/min o menos.	$1.0 X''_d$	$1.0 X''_d$
	Por encima de 250 HP a 3600 rev/min.	$1.0 X''_d$	$1.0 X''_d$
Cálculos de interrupción	Todos los demás, 50 HP y mayores.	$1.2 X''_d$	$1.2 X''_d$
	Menores de 50 HP	Se ignora (6)	$1.67 X''_d$
	Compañía suministradora de potencia.	X_s	N/A
	Todos los turbogeneradores, todos los hidrogeneradores, con devanados amortiguadores; todos los condensadores.	$1.0 X''_d$	N/A
	Hidrogeneradores con devanados amortiguados.	$0.75 X''_d$	N/A
	Todos los motores síncronos.	$1.5 X''_d$	N/A
	Motores de inducción.		
Por encima de 1000 HP a 1800 rev/min o menos.	$1.5 X''_d$	N/A	
Por encima de 250 HP a 3600 rev/min.	$1.5 X''_d$	N/A	
Todos los demás, 50 HP y mayores.	$3.0 X''_d$	N/A	
Menores de 50 HP	Se ignora (6)	N/A	

Tabla 2.6 Reactancias típicas de máquinas trifásicas PU

X''_d	X'_d	X_d	X_2	X_0
0.09	0.15	1.20	0.09	0.03
0.14	0.22	1.70	0.14	0.07
0.20	0.30	1.25	0.20	0.18
0.28	0.30	1.20	0.35	0.12



Capítulo 2 Instalación eléctrica de planta de asfalto



Características de los conductores

- Capacidad de conducción de amperes
- Diámetro del conductor
- Tipo de aislamiento

Tabla 2.7 Capacidad de conducción de corriente para conductores de media tensión

Tamaño o Designación		Capacidad de conducción de corriente para 2 001 V – 5 000 V		Capacidad de conducción de corriente para 5 001 V – 15 000 V		Capacidad de conducción de corriente para 15 001 V – 35 000 V	
mm ²	AWG o kcmil	90 °C	105 °C	90 °C	105 °C	90 °C	105 °C
8,37	8	83	93	---	---	---	---
13,3	6	110	120	110	125	---	---
21,2	4	145	160	150	165	---	---
33,6	2	190	215	195	215	---	---
42,4	1	225	250	225	250	225	250
53,5	1/0	260	290	260	290	260	290
67,4	2/0	300	330	300	335	300	330
85,0	3/0	345	385	345	385	345	380
107	4/0	400	445	400	445	395	445
127	250	445	495	445	495	440	490
177	350	550	615	550	610	545	605
253	500	695	775	685	765	680	755
380	750	900	1 000	885	990	870	970
507	1 000	1 075	1 200	1 060	1 185	1 040	1 160
633	1 250	1 230	1 370	1 210	1 350	1 185	1 320
760	1 500	1 365	1 525	1 345	1 500	1 315	1 465
887	1 750	1 495	1 665	1 470	1 640	1 430	1 595
1010	2 000	1 605	1 790	1 575	1 755	1 535	1 710



Capítulo 2 Instalación eléctrica de planta de asfalto



Tabla 2.8 Tabla de impedancia de secuencia conductores para Media Tensión en $\Omega/1000$ pies

AWG o kcmil	En ducto magnético						En ducto no magnético					
	600 V y 5 kV sin aislamiento			5 kV y 15 kV con aislamiento			600 V y 5 kV sin aislamiento			5 kV y 15 kV con aislamiento		
	R	X	Z	R	X	Z	R	X	Z	R	X	Z
8	0,811	0,0754	0,814	0,811	0,0860	0,816	0,811	0,0603	0,813	0,811	0,0688	0,814
8	0,786	0,0754	0,790	0,786	0,0860	0,791	0,786	0,0603	0,788	0,786	0,0688	0,789
(sólido)	0,510	0,0685	0,515	0,510	0,0796	0,516	0,510	0,0548	0,513	0,510	0,0636	0,514
6	0,496	0,0685	0,501	0,496	0,0796	0,502	0,496	0,0548	0,499	0,496	0,0636	0,500
4	0,321	0,0632	0,327	0,321	0,0742	0,329	0,321	0,0506	0,325	0,321	0,0594	0,326
4	0,312	0,0632	0,318	0,312	0,0742	0,321	0,312	0,0506	0,316	0,312	0,0594	0,318
(sólido)	0,202	0,0585	0,210	0,202	0,0685	0,214	0,202	0,0467	0,207	0,202	0,0547	0,209
2	0,160	0,0570	0,170	0,160	0,0675	0,174	0,160	0,0456	0,166	0,160	0,0540	0,169
1/0	0,128	0,0540	0,139	0,128	0,0635	0,143	0,127	0,0432	0,134	0,128	0,0507	0,138
2/0	0,102	0,0533	0,115	0,103	0,0630	0,121	0,101	0,0426	0,110	0,102	0,0504	0,114
3/0	0,0805	0,0519	0,0958	0,0814	0,0605	0,101	0,0766	0,0415	0,0871	0,0805	0,0484	0,0939
4/0	0,0640	0,0497	0,0810	0,0650	0,0583	0,0929	0,0633	0,0398	0,0748	0,0640	0,0466	0,0792
250	0,0552	0,0495	0,0742	0,0557	0,570	0,0797	0,0541	0,0396	0,0670	0,0547	0,0456	0,0712
300	0,0464	0,0493	0,0677	0,0473	0,0564	0,0736	0,0451	0,0394	0,0599	0,0460	0,0451	0,0644
350	0,0378	0,0491	0,0617	0,0386	0,0562	0,0681	0,0368	0,0393	0,0536	0,0375	0,0450	0,0586
400	0,0356	0,0490	0,0606	0,0362	0,0548	0,0657	0,0342	0,0392	0,0520	0,0348	0,0438	0,0559
450	0,0322	0,0480	0,0578	0,0328	0,0538	0,0630	0,0304	0,0384	0,0490	0,0312	0,0430	0,0531
500	0,0294	0,0466	0,0551	0,0300	0,0526	0,0505	0,0276	0,0373	0,0464	0,0284	0,0421	0,0508
600	0,0257	0,0463	0,0530	0,0264	0,0516	0,0580	0,0237	0,0371	0,0440	0,0246	0,0412	0,0479
750	0,0216	0,0445	0,0495	0,0223	0,0497	0,0545	0,0194	0,0356	0,0405	0,0203	0,0396	0,0445



Capítulo 2 Instalación eléctrica de planta de asfalto



DIAGRAMA ELÉCTRICO UNIFILAR DE PLANTA DE ASFALTO

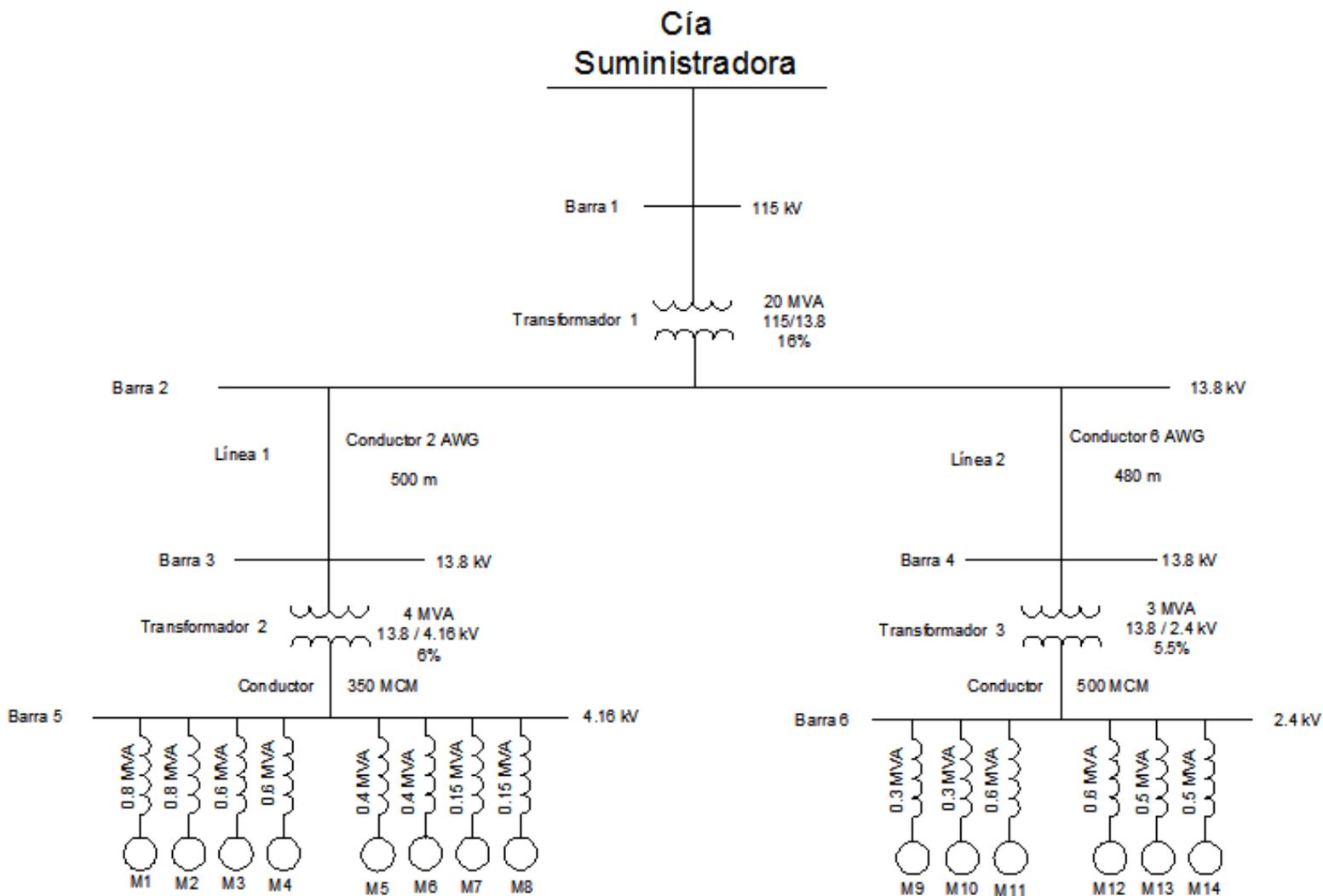


Figura 2.16 Diagrama unifilar de la instalación eléctrica.



Capítulo 2 Instalación eléctrica de planta de asfalto



2.10 Cantidades por unidad.

Las cantidades eléctricas, voltaje, corriente, impedancia de un circuito se expresan frecuentemente en por ciento o por unidad.

El valor por unidad de una magnitud cualquiera, se define como la razón de su valor a su valor base. Y se expresa con valor decimal.

La ventaja que se tiene al utilizar los valores por unidad es que al realizar operaciones el resultado obtenido también es por unidad, en tanto que si las operaciones fueran referidas al cien por ciento, todavía se tendría que dividir entre 100 para obtener los valores en por ciento.

Los voltajes, corrientes e impedancias en un circuito están relacionadas entre sí y tomando dos valores dados como base se pueden obtener los demás valores base.

Normalmente las cantidades para seleccionar la base son la potencia en KVA y la tensión en kV. En los sistemas monofásicos o en sistemas trifásicos para el término corriente se refiere a la corriente de línea en amperes, el término tensión (voltaje) se refiere al voltaje con respecto al neutro y los KVA son KVA por fase. Con lo anterior podemos relacionar las siguientes cantidades con las expresiones que se muestran:

Potencia base trifásica = S MVA base

Voltaje base = kV base de línea

$$I_{base} = \text{Corriente base en amperes} = \frac{\text{Potencia base}}{\text{Voltaje base}} = \frac{\text{MVA}}{\sqrt{3} \times \text{kV}} \quad \text{Ec (2.1)}$$

$$Z_{base} = \text{Impedancia base} = \frac{(\text{voltaje base})^2}{\text{potencia base}} = \frac{(\text{kV})^2}{\text{MVA}} \quad \text{Ec (2.2)}$$

$$\text{La impedancia por unidad } Z_{pu} = \frac{\text{impedancia real en ohms}}{\text{impedancia base en ohms}} = \frac{Z_{\Omega}}{\frac{(V_{base})^2}{S_{base}}} = Z_{\Omega} \frac{S_{base}}{(V_{base})^2} \quad \text{Ec (2.3)}$$



Capítulo 2 Instalación eléctrica de planta de asfalto



2.11 Cambio de base

Todas las impedancias de cualquier parte del sistema tienen que ser expresadas respecto a la misma impedancia base, para los cálculos, necesitamos pasar las impedancias por unidad de una base a otra. Cuando un elemento en un circuito tiene su impedancia expresada en ohms, el valor de la impedancia en ohms cambiará de uno a otro lado del transformador, cuando expresamos la impedancia en por unidad, con la base adecuada, la impedancia en por unidad vista desde un lado del transformador es la misma vista desde el otro lado del transformador, simplificando con esto los cálculos. Con lo que podemos designar Z_n como impedancia en base nueva y Z_v como impedancia de base vieja, y cambiar la impedancia con la ecuación siguiente:

$$Z_{nueva\ por\ unidad} = Z_{vieja\ por\ unidad} \left(\frac{kV_{viejos\ base}}{kV_{nuevos\ base}} \right)^2 \times \left(\frac{kVA_{nuevos\ base}}{kVA_{viejos\ base}} \right) \text{ Ec (2.4)}$$

En el caso de que el valor de la tensión base sea el mismo la impedancia queda

$$Z_{nueva\ por\ unidad} = Z_{vieja\ por\ unidad} \left(\frac{kVA_{nuevos\ base}}{kVA_{viejos\ base}} \right) \text{ Ec (2.5)}$$

Y cuando el valor de la impedancia está dada en por ciento

$$Z_{nueva\ por\ unidad} = \frac{\%Z_{vieja\ por\ unidad}}{100} \left(\frac{kVA_{nuevos\ base}}{kVA_{viejos\ base}} \right) \text{ Ec (2.6)}$$

Ocupando el teorema de Thévenin con el voltaje en la falla indicada y la impedancia con cantidades en por unidad, podemos calcular la corriente de corto circuito con la siguiente ecuación.



Capítulo 2 Instalación eléctrica de planta de asfalto



$$I \text{ de corto circuito} = \frac{\text{Voltaje por unidad}}{\text{Im pedancia por unidad}} \quad \text{Ec (2.7)}$$

$$I_{cc} = \frac{V_{pu}}{Z_{pu}}$$

V_{pu} Voltaje por unidad Thévenin

Z_{pu} Impedancia por unidad Thévenin

Podemos calcular la potencia de corto circuito con la expresión

$$P \text{ corto circuito} = \sqrt{3} \times V \text{ línea} \times I \text{ corto circuito} \quad \text{Ec (2.8)}$$

Para obtener las cantidades de los valores reales del cálculo que se obtuvo por unidad, podemos usar las siguientes ecuaciones:

$$V \text{ real} = V \text{ pu} \times V \text{ base en Volts} \quad \text{Ec (2.9)}$$

$$I \text{ real} = I \text{ pu} \times I \text{ base en Amperes} \quad \text{Ec (2.10)}$$

$$Z \text{ real} = Z \text{ pu} \times Z \text{ base en } \Omega \quad \text{Ec (2.11)}$$

$$S \text{ real} = S \text{ pu} \times S \text{ base en VA} \quad \text{Ec (2.12)}$$

$$P \text{ real} = P \text{ pu} \times P \text{ base en W} \quad \text{Ec (2.13)}$$

$$Q \text{ real} = Q \text{ pu} \times Q \text{ base en VAR} \quad \text{Ec (2.14)}$$



Capítulo 2 Instalación eléctrica de planta de asfalto



2.12 Procedimiento general para el cálculo de fallos.

El procedimiento general para redes radiales contiene los siguientes pasos:

- a) Dibujar el diagrama unifilar del circuito con todos sus elementos.
- b) Identificar en el diagrama los puntos en los cuales las corrientes de falla van a ser calculadas.
- c) Identificar los circuitos y cables usados.
- d) Para cada sección de línea escribir sobre el diagrama del circuito y su longitud en metros.
- e) Calcular las impedancias.
- f) Seleccionar la impedancia de la falla.

2.13 Datos de los elementos de la instalación eléctrica

Línea 1 Conductor 2 AWG con 500 m de longitud

Línea 2 Conductor 6 AWG con 480 m de longitud

Línea 3 Conductor 350 MCM con 80 m de longitud

Línea 4 Conductor 500 MCM con 60 m de longitud

Transformador 1 20MVA de potencia, voltaje 115/13.8kV, impedancia de 16% delta estrella.

Transformador 2 4MVA de potencia, voltaje 13.8/4.16kV, impedancia de 6% delta estrella.

Transformador 3 3MVA de potencia, voltaje 13.8/2.4kV, impedancia de 5.5% delta estrella.

Motores 1 y 2 de 0.8 MVA de potencia, voltaje 4.16kV, reactancia de 17%.

Motores 3 y 4 de 0.6 MVA de potencia, voltaje 4.16kV, reactancia de 17%

Motores 5 y 6 de 0.4 MVA de potencia, voltaje 4.16kV, reactancia de 17%

Motores 7 y 8 de 0.15 MVA de potencia, voltaje 4.16kV, reactancia de 17%

Motores 9 y 10 de 0.3 MVA de potencia, voltaje 2.4kV, reactancia de 17%

Motores 11 y 12 de 0.6 MVA de potencia, voltaje 2.4kV, reactancia de 17%

Motores 13 y 14 de 0.5 MVA de potencia, voltaje 2.4kV, reactancia de 17%



Capítulo 3 Cálculo de corto circuito



3.1 Componentes Simétricas

El teorema de Charles Legeyt Fortescue o teorema de las componentes simétricas es uno de los teoremas más importantes en la ingeniería eléctrica. Fue adoptado en empresas del sector eléctrico usándose en el ajuste del sistema de protecciones y dimensionamiento de equipos. Se trata de un método particular de transformación lineal que consiste básicamente en descomponer un conjunto de fasores desbalanceados en otro conjunto de fasores de características tales que permitan un análisis más sencillo del problema original. La secuencia de fase de las componentes de secuencia positiva es abc y la secuencia de fase de las componentes de secuencia negativa es acb. Si los fasores originales de voltaje se designan como V_a, V_b y V_c los tres conjuntos de componentes simétricas se designan agregando un subíndice (o superíndice) adicional 1 para las componentes de secuencia positiva, 2 para las de secuencia negativa y 0 para las de secuencia cero.

Se pueden clasificar como se muestra en la figura

- Componentes de secuencia positiva: formado por tres fasores de igual magnitud, desfasados 120° entre sí y con la misma secuencia de fase que el sistema original.
- Componentes de secuencia negativa: formado por tres fasores de igual módulo, con desfase de 120° uno de otro y con la secuencia de fases opuesta a la de los fasores originales.
- Componentes de secuencia cero: formada por tres fasores de igual módulo y con desfase nulo.

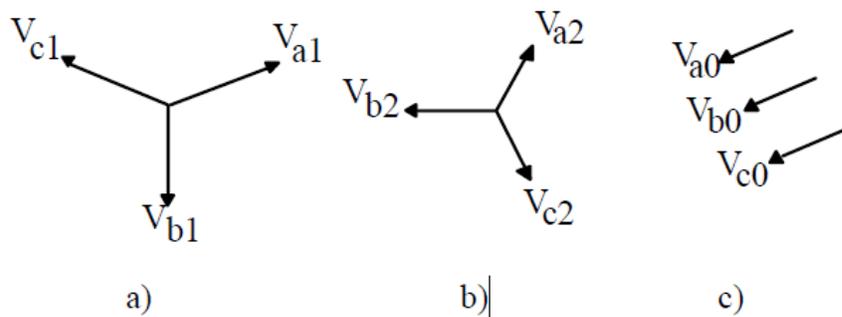


Figura 3.1 Representación de componentes simétricas de tensiones, también se utiliza para corrientes.



Capítulo 3 Cálculo de corto circuito



Usando matrices se puede expresar como se muestra.

Para voltajes

$$\begin{bmatrix} Va \\ Vb \\ Vc \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} Va_0 \\ Va_1 \\ Va_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Va_0 + Va_1 + Va_2 \\ Va_0 + a^2Va_1 + aVa_2 \\ Va_0 + aVa_1 + a^2Va_2 \end{bmatrix}$$

La matriz de transformación tiene inversa

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

Por lo que podemos calcular

$$\begin{bmatrix} Va_0 \\ Va_1 \\ Va_2 \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} Va \\ Vb \\ Vc \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{Va + Vb + Vc}{3} \\ \frac{Va + aVb + a^2Vc}{3} \\ \frac{Va + a^2Vb + aVc}{3} \end{bmatrix}$$

Por lo que podemos utilizar lo anterior en el caso de una falla monofásica como se muestra.

$$\begin{bmatrix} Ia \\ Ib \\ Ic \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} Ia_0 \\ Ia_1 \\ Ia_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Ia_0 + Ia_1 + Ia_2 \\ Ia_0 + a^2Ia_1 + aIa_2 \\ Ia_0 + aIa_1 + a^2Ia_2 \end{bmatrix}$$

Pero $Ib = Ic = 0$ entonces y como en este caso $Ia_0 = Ia_1 = Ia_2$

Tenemos $Ia = 3Ia_0$

Lo que usaremos más adelante como

$$Ia = 3Ipu \quad \text{Ec (3.1)}$$

Para el caso de falla trifásica usamos

$$Ia = \frac{Vpu}{Zpu} \quad \text{Ec (3.2)}$$



Capítulo 3 Cálculo de corto circuito



3.2 Cálculo en PU de líneas.

Compañía Suministradora

$$X_1 = X_2 = 0.025 \times \frac{20MVA}{20MVA} \times \frac{115kV}{115kV} = 0.025 pu$$
$$X_0 = \frac{3 \times S_B \times V_{PU}^2}{S_{CC1}} - 2X_{1,2} = \frac{3 \times 20 \times 1^2}{640} - 2 \times 0.025$$
$$X_0 = 0.04375 pu$$

Línea 1

$$X_B = \frac{kV_B^2}{MVA_B} = \frac{13.8^2}{20} = 9.522 \Omega$$
$$X_1 = X_2 = \frac{X \Omega}{X_B \Omega} = \frac{0.1107}{9.522} = 0.0116 pu$$
$$X_0 = 3 \times 0.0116 = 0.0348 pu$$

Línea 2

$$X_B = \frac{kV_B^2}{MVA_B} = \frac{13.8^2}{20} = 9.522 \Omega$$
$$X_1 = X_2 = \frac{X \Omega}{X_B \Omega} = \frac{0.1254}{9.522} = 0.0132 pu$$
$$X_0 = 3 \times 0.0132 = 0.0396 pu$$

Línea 3

$$X_B = \frac{kV_B^2}{MVA_B} = \frac{4.16^2}{20} = 0.8653 \Omega$$
$$X_1 = X_2 = \frac{X \Omega}{X_B \Omega} = \frac{0.0129}{0.8653} = 0.0149 pu$$
$$X_0 = 3 \times 0.0149 = 0.0447 pu$$



Línea 4

Capítulo 3 Cálculo de corto circuito



$$X_B = \frac{kV_B^2}{MVA_B} = \frac{2.4^2}{20} = 0.0288 \Omega$$

$$X_1 = X_2 = \frac{X \Omega}{X_B \Omega} = \frac{0.0092}{0.288} = 0.0319 pu$$

$$X_0 = 3 \times 0.0319 = 0.0957 pu$$

3.3 Cálculo en PU de transformadores.

Transformador 1

$$X_1 = X_2 = X_0 = 0.16 \times \frac{20 MVA}{20 MVA} \times \left(\frac{115 kV}{115 kV} \right)^2 = 0.16 pu$$

Transformador 2

$$X_1 = X_2 = X_0 = 0.06 \times \frac{20 MVA}{4 MVA} \times \left(\frac{4.16 kV}{4.16 kV} \right)^2 = 0.3 pu$$

Transformador 3

$$X_1 = X_2 = X_0 = 0.055 \times \frac{20 MVA}{3 MVA} \times \left(\frac{2.4 kV}{2.4 kV} \right)^2 = 0.37 pu$$

3.4 Cálculo en PU de motores a 4.16 kV

Motores 1 y 2

$$X_1 = X_2 = 0.17 \times \frac{20 MVA}{0.8 MVA} \times \left(\frac{4.16 kV}{4.16 kV} \right)^2 = 4.25 pu$$

$$X_0 = 0.03 \times \frac{20 MVA}{0.8 MVA} \times \left(\frac{4.16 kV}{4.16 kV} \right)^2 = 0.75 pu$$

Motores 3 y 4

$$X_1 = X_2 = 0.17 \times \frac{20 MVA}{0.6 MVA} \times \left(\frac{4.16 kV}{4.16 kV} \right)^2 = 5.67 pu$$

$$X_0 = 0.03 \times \frac{20 MVA}{0.6 MVA} \times \left(\frac{4.16 kV}{4.16 kV} \right)^2 = 1.0 pu$$



Motores 5 y 6

Capítulo 3 Cálculo de corto circuito



$$X_1 = X_2 = 0.17 \times \frac{20 \text{ MVA}}{0.4 \text{ MVA}} \times \left(\frac{4.16 \text{ kV}}{4.16 \text{ kV}} \right)^2 = 8.5 \text{ pu}$$

$$X_0 = 0.03 \times \frac{20 \text{ MVA}}{0.4 \text{ MVA}} \times \left(\frac{4.16 \text{ kV}}{4.16 \text{ kV}} \right)^2 = 1.5 \text{ pu}$$

Motores 7 y 8

$$X_1 = X_2 = 0.17 \times \frac{20 \text{ MVA}}{0.15 \text{ MVA}} \times \left(\frac{4.16 \text{ kV}}{4.16 \text{ kV}} \right)^2 = 22.67 \text{ pu}$$

$$X_0 = 0.03 \times \frac{20 \text{ MVA}}{0.15 \text{ MVA}} \times \left(\frac{4.16 \text{ kV}}{4.16 \text{ kV}} \right)^2 = 4.0 \text{ pu}$$

3.5 Cálculo en PU de motores a 2.4 kV

Motores 9 y 10

$$X_1 = X_2 = 0.17 \times \frac{20 \text{ MVA}}{0.3 \text{ MVA}} \times \left(\frac{2.4 \text{ kV}}{2.4 \text{ kV}} \right)^2 = 11.33 \text{ pu}$$

$$X_0 = 0.03 \times \frac{20 \text{ MVA}}{0.3 \text{ MVA}} \times \left(\frac{2.4 \text{ kV}}{2.4 \text{ kV}} \right)^2 = 2.0 \text{ pu}$$

Motores 11 y 12

$$X_1 = X_2 = 0.17 \times \frac{20 \text{ MVA}}{0.6 \text{ MVA}} \times \left(\frac{2.4 \text{ kV}}{2.4 \text{ kV}} \right)^2 = 5.67 \text{ pu}$$

$$X_0 = 0.03 \times \frac{20 \text{ MVA}}{0.6 \text{ MVA}} \times \left(\frac{2.4 \text{ kV}}{2.4 \text{ kV}} \right)^2 = 1.0 \text{ pu}$$

Motores 13 y 14

$$X_1 = X_2 = 0.17 \times \frac{20 \text{ MVA}}{0.5 \text{ MVA}} \times \left(\frac{2.4 \text{ kV}}{2.4 \text{ kV}} \right)^2 = 6.8 \text{ pu}$$

$$X_0 = 0.03 \times \frac{20 \text{ MVA}}{0.5 \text{ MVA}} \times \left(\frac{2.4 \text{ kV}}{2.4 \text{ kV}} \right)^2 = 1.2 \text{ pu}$$



Capítulo 3 Cálculo de corto circuito



Tabla 3.1 Valores en PU

Elemento	Secuencia positiva y negativa PU	Secuencia cero PU
Línea 1	0.0116	0.0348
Línea 2	0.0132	0.0396
Línea 3	0.0149	0.0447
Línea 4	0.0319	0.0957
Transformador 1	0.16	0.16
Transformador 2	0.3	0.3
Transformador 3	0.37	0.37
Motor 1	4.25	0.75
Motor 2	4.25	0.75
Motor 3	5.67	1
Motor 4	5.67	1
Motor 5	8.5	1.5
Motor 6	8.5	1.5
Motor 7	22.67	4
Motor 8	22.67	4
Motor 9	11.33	2
Motor 10	11.33	2
Motor 11	5.67	1
Motor 12	5.67	1
Motor 13	6.8	1.2
Motor 14	6.8	1.2



Capítulo 3 Cálculo de corto circuito

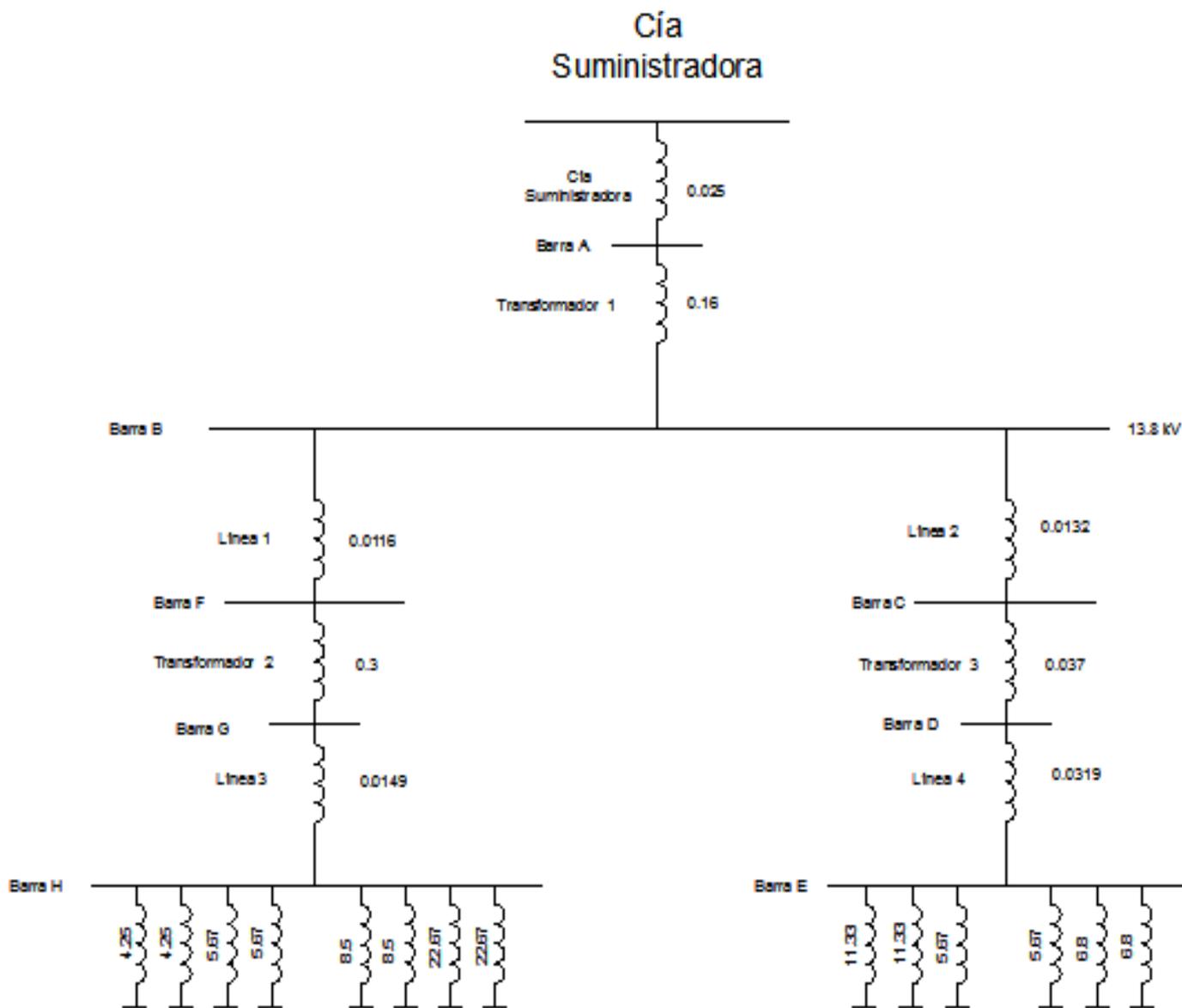


Figura 3.2 Diagrama de impedancias de secuencia positiva y negativa PU



Capítulo 3 Cálculo de corto circuito

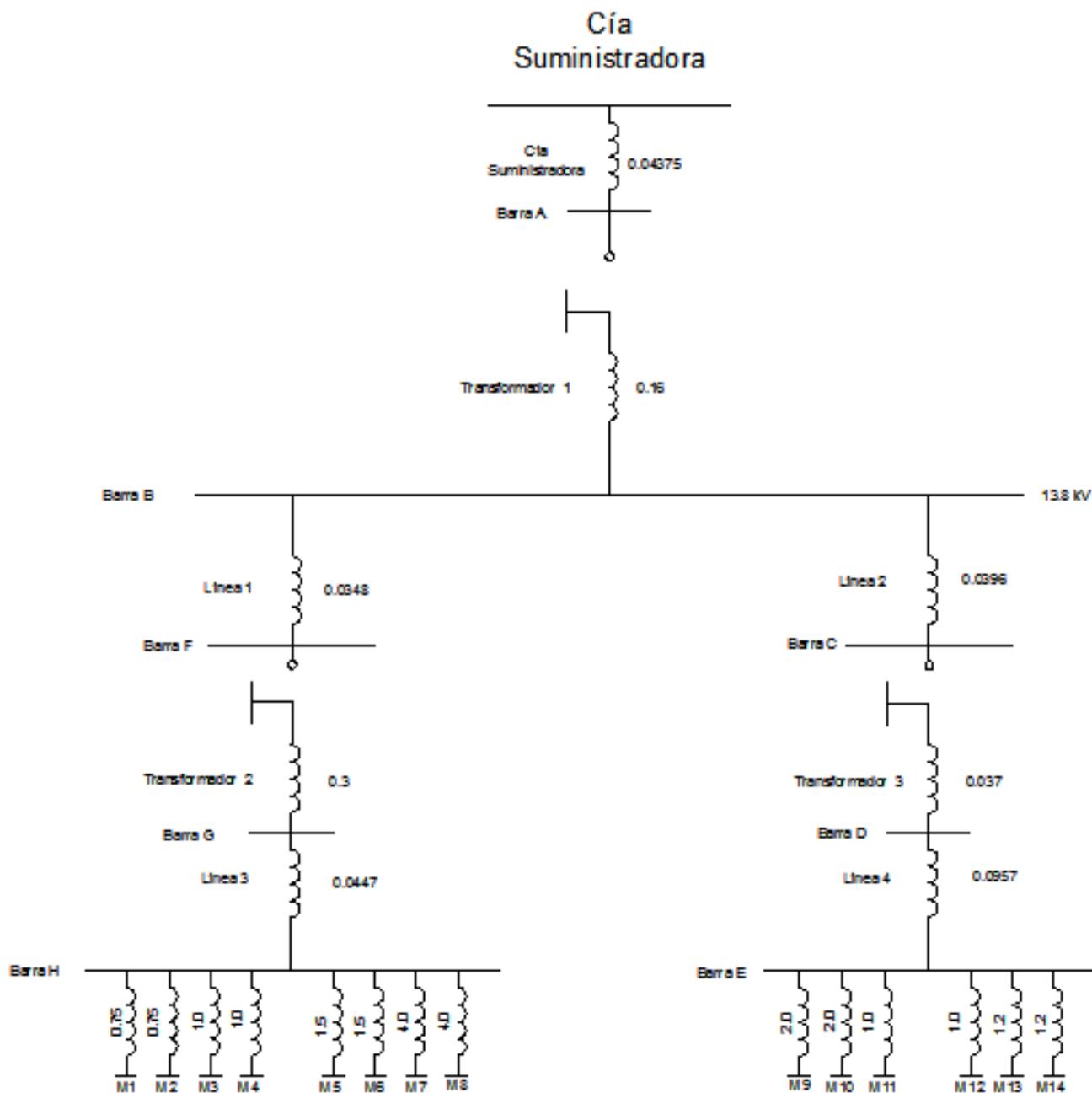


Figura 3.3 Diagrama de impedancias de secuencia cero PU



Capítulo 3 Cálculo de corto circuito



3.6 Fallas de corto circuito en los buses.

Bus A

$$V_{pu} = \frac{V_{real}}{V_{base}} = \frac{115kV}{115kV} = 1 pu$$

$$ZEQ1 = ZL2 + ZT3 + ZL4 + ZM9 AM14$$

$$ZEQ = 0.0132 + .37 + 0.0319 + 1.2145 = 1.6296 pu$$

$$ZEQ2 = ZL1 + ZT2 + ZL3 + ZM1 AM8$$

$$ZEQ2 = 0.0116 + 0.3 + 0.0149 + 0.872 = 1.1985 pu$$

$$ZEQ3 = ZEQ2 // ZEQ1 = \frac{1.1985 \times 1.6296}{1.1985 + 1.6296} = 0.6906 pu$$

$$ZEQ4 = ZEQ3 + ZT1 = 0.6906 + .16 = 0.8506 pu$$

$$ZEQTH BUS A = ZEQ4 // ZCIASUM = \frac{0.8506 \times 0.025}{0.8506 + 0.025} = 0.02428 pu$$

$$SECUENCIA POSITIVAY NEGATIVA X_1 = X_2 = 0.02428 pu$$

$$ZEQTH BUS A SECUENCIA CERO$$

$$ZEQTH BUS A = X_0 = 0.04375 pu$$

Cálculo de Corto Circuito Trifásico

$$I_B = \frac{kVA_B}{\sqrt{3} \times kV_B} = \frac{20 \times 10^3 kVA}{\sqrt{3} \times 115 kV} = 100.4087 Amperes$$

$$I_{pu} = \frac{1}{0.02428} = 41.19 pu; I_{cc} = I_{pu} \times I_{base}$$

$$I_{cc3\phi} = 41.19 \times 100.4087 = 4135.83 Amperes$$



Bus B

Capítulo 3 Cálculo de corto circuito



$$V_{pu} = \frac{V_{real}}{V_{base}} = \frac{13.8kV}{13.8kV} = 1 pu$$

$$Z_{EQ1} = Z_{CÍASUM} + Z_{T1} = 0.025 + 0.16 = 0.185 pu$$

$$Z_{EQ2} = Z_{L2} + Z_{T3} + Z_{L4} + Z_{M9AM14}$$

$$Z_{EQ2} = 0.0132 + 0.37 + 0.0319 + 1.2145 = 1.6296 pu$$

$$Z_{EQ3} = Z_{L1} + Z_{T2} + Z_{L3} + Z_{M1AM8}$$

$$Z_{EQ3} = 0.0116 + 0.3 + 0.0149 + 0.872 = 1.1985 pu$$

$$Z_{EQ4} = Z_{EQ3} // Z_{EQ2} = \frac{1.1985 \times 1.6296}{1.1985 + 1.6296} = 0.6906 pu$$

$$Z_{EQ5} = Z_{EQ4} // Z_{EQ1} = \frac{0.6906 \times 0.185}{0.6906 + 0.185} = 0.1459 pu$$

$$Z_{EQTH BUS B}; X_1 = X_2 = 0.1459 pu$$

$$Z_{EQTH SECUENCIA CERO} X_0 = 0.16 pu$$

Cálculo de Corto Circuito Trifásico

$$I_B = \frac{kVA_B}{\sqrt{3} \times kV_B} = \frac{20 \times 10^3 kVA}{\sqrt{3} \times 13.8 kV} = 836.7395 Amperes$$

$$I_{pu} = \frac{1}{0.1459} = 6.85 pu; I_{cc} = I_{pu} \times I_{base}$$

$$I_{cc3\phi} = 6.85 \times 836.7395 = 5731.6655 Amperes$$

Cálculo de Corto Circuito Monofásico

$$I_{pu} = \frac{1}{X_1 + X_2 + X_0} = \frac{1}{0.1459 + 0.1459 + 0.0166} = 3.2425 pu$$

$$I_a = 3 \times I_{pu} = 3 \times 3.2425 pu = 9.7276 pu$$

$$I_{cc1\phi} = I_a \times I_{base} = 9.7276 \times 836.7395 = 8139.48 Amperes$$

Bus C

$$V_{pu} = \frac{V_{real}}{V_{base}} = \frac{13.8kV}{13.8kV} = 1 pu$$



Capítulo 3 Cálculo de corto circuito



$$ZEQ1 = Z \text{ CÍA SUM} + ZT1 = 0.025 + 0.16 = 0.185 \text{ pu}$$

$$ZEQ2 = ZL1 + ZT2 + ZL3 + ZM1AM8$$

$$ZEQ2 = 0.0116 + 0.3 + 0.0149 + 0.872 = 1.1985 \text{ pu}$$

$$ZEQ3 = ZEQ2 // ZEQ1 = \frac{1.1985 \times 0.185}{1.1985 + 0.185} = 0.1603 \text{ pu}$$

$$ZM9AM14 = 1.2145 \text{ pu}$$

$$ZEQ4 = ZEQ3 + ZL2 = 0.1603 + 0.0132 = 0.1735 \text{ pu}$$

$$ZEQ5 = ZT3 + ZL4 + ZM9AM14$$

$$ZEQ5 = 0.37 + 0.0319 + 1.2145 = 1.6164 \text{ pu}$$

$$ZEQTH \text{ BUS C} = ZEQ5 // ZEQ4 = \frac{1.6164 \times 0.1735}{1.6164 + 0.1735} = 0.1567 \text{ pu}$$

$$ZEQTH \text{ BUS C}; X_1 = X_2 = 0.1567 \text{ pu}$$

$$ZEQTH \text{ BUS C} = ZEQ1 + ZL2 = 0.0286 + 0.0396 = 0.0682 \text{ pu}$$

$$ZEQTH \text{ BUS C SECUENCIA CERO } X_0 = 0.0682 \text{ pu}$$

Cálculo de Corto Circuito Trifásico

$$I_B = \frac{kVA_B}{\sqrt{3} \times kV_B} = \frac{20 \times 10^3 \text{ kVA}}{\sqrt{3} \times 13.8 \text{ kV}} = 836.7395 \text{ Amperes}$$

$$I_{pu} = \frac{1}{0.1567} = 6.38 \text{ pu}; I_{cc} = I_{pu} \times I_{base}$$

$$I_{cc3\phi} = 6.38 \times 836.7395 = 5338.40 \text{ Amperes}$$

Bus D

$$V_{pu} = \frac{V \text{ real}}{V \text{ base}} = \frac{2.4 \text{ kV}}{2.4 \text{ kV}} = 1 \text{ pu}$$

$$ZEQ1 = Z \text{ CÍA SUM} + ZT1 = 0.185 \text{ pu}$$

$$ZEQ2 = ZL1 + ZT2 + ZL3 + ZM1AM8 = 1.1985 \text{ pu}$$

$$ZEQ3 = ZEQ2 // ZEQ1 = 0.1603 \text{ pu}$$

$$ZEQ4 = ZEQ3 + ZL2 + ZT3 = 0.5435 \text{ pu}$$

$$ZEQ5 = ZL4 + ZM9AM14 = 1.2464 \text{ pu}$$

$$ZEQTH \text{ BUS D} = ZEQ5 // ZEQ4 = 0.3785 \text{ pu}$$

$$ZEQTH \text{ BUS D SECUENCIA POSITIVA Y NEGATIVA } X_1 = X_2 = 0.3785 \text{ pu}$$

$$ZEQTH \text{ BUS D SECUENCIA CERO } X_0 = 0.37 \text{ pu}$$



Capítulo 3 Cálculo de corto circuito



Cálculo de Corto Circuito Trifásico

$$I_B = \frac{kVA_B}{\sqrt{3} \times kV_B} = \frac{20 \times 10^3 kVA}{\sqrt{3} \times 2.4 kV} = 4811.2522 \text{ Amperes}$$

$$I_{pu} = \frac{1}{0.0.3785} = 2.64 pu; I_{cc} = I_{pu} \times I_{base}$$

$$I_{cc3\phi} = 2.64 \times 4811.2522 = 12701.7058 \text{ Amperes}$$

Cálculo de Corto Circuito Monofásico

$$I_{pu} = \frac{1}{X_1 + X_2 + X_0} = \frac{1}{0.3785 + 0.3785 + 0.02868} = 1.276 pu$$

$$I_a = 3 \times I_{pu} = 3 \times 1.276 pu = 3.828 pu$$

$$I_{cc1\phi} = I_a \times I_{base} = 3.828 \times 4811.2522 = 18417.3917 \text{ Amperes}$$

Bus E

$$V_{pu} = \frac{V_{real}}{V_{base}} = \frac{2.4 kV}{2.4 kV} = 1 pu$$

$$Z_{EQ1} = Z_{CÍASUM} + Z_{T1} = 0.185 pu$$

$$Z_{EQ2} = Z_{L1} + Z_{T2} + Z_{L3} + Z_{M1AM8} = 1.1985 pu$$

$$Z_{EQ3} = Z_{EQ2} // Z_{EQ1} = 0.1603 pu$$

$$Z_{EQ4} = Z_{EQ3} + Z_{L2} + Z_{T3} + Z_{L4} = 0.5754 pu$$

$$Z_{M9AM14} = 1.2145 pu$$

$$Z_{EQTH BUS E} = Z_{EQ4} // Z_{M9AM14} = 0.3904 pu$$

$$Z_{EQTH BUS E} = 0.3904; X_1 = X_2 = 0.3904 pu$$

$$Z_{EQTH BUS E} = 0.4657; X_0 = 0.4657 pu$$

Cálculo de Corto Circuito Trifásico

$$I_B = \frac{kVA_B}{\sqrt{3} \times kV_B} = \frac{20 \times 10^3 kVA}{\sqrt{3} \times 2.4 kV} = 4811.2522 \text{ Amperes}$$

$$I_{pu} = \frac{1}{0.3904} = 2.56 pu; I_{cc} = I_{pu} \times I_{base}$$

$$I_{cc3\phi} = 2.56 \times 4811.2522 = 12316.8056 \text{ Amperes}$$



Bus F

Capítulo 3 Cálculo de corto circuito



$$V_{pu} = \frac{V_{real}}{V_{base}} = \frac{4.16kV}{4.16kV} = 1 pu$$

$$Z_{EQ1} = Z_{CÍA SUM} + Z_{T1} = 0.185 pu$$

$$Z_{EQ2} = Z_{L2} + Z_{T3} + Z_{L4} + Z_{M9 AM14} = 1.6296 pu$$

$$Z_{EQ3} = Z_{EQ2} // Z_{EQ1} = 0.1661 pu$$

$$Z_{EQ4} = Z_{EQ3} + Z_{L1} = 0.1777 pu$$

$$Z_{M1 AM8} = 0.872 pu$$

$$Z_{EQ5} = Z_{T2} + Z_{L3} + Z_{M1 AM8} = 1.1869 pu$$

$$Z_{EQTH BUS F} = Z_{EQ5} // Z_{EQ4} = 0.1546 ; X_1 = X_2 = 0.1546 pu$$

$$Z_{EQTH BUS F SECUENCIA CERO} X_0 = 0.0665 pu$$

Cálculo de Corto Circuito Trifásico

$$I_B = \frac{kVA_B}{\sqrt{3} \times kV_B} = \frac{20 \times 10^3 kVA}{\sqrt{3} \times 13.8 kV} = 836.7395 Amperes$$

$$I_{pu} = \frac{1}{0.1546} = 6.47 pu ; I_{cc} = I_{pu} \times I_{base}$$

$$I_{cc3\phi} = 6.47 \times 836.7395 = 12316.8056 Amperes$$

Bus G

$$V_{pu} = \frac{V_{real}}{V_{base}} = \frac{4.16kV}{4.16kV} = 1 pu$$

$$Z_{EQ1} = Z_{CÍA SUM} + Z_{T1} = 0.185 pu$$

$$Z_{EQ2} = Z_{L2} + Z_{T3} + Z_{L4} + Z_{M9 AM14} = 1.6296$$

$$Z_{EQ3} = Z_{EQ2} // Z_{EQ1} = 0.1661 pu$$

$$Z_{EQ4} = Z_{EQ3} + Z_{L1} + Z_{T2} = 0.4777 pu$$

$$Z_{M1 AM8} = 0.872 pu$$

$$Z_{EQ5} = Z_{L3} + Z_{M1 AM8} = 0.8869 pu$$

$$Z_{EQTH BUS G} = Z_{EQ5} // Z_{EQ4} = 0.3105 ; X_1 = X_2 = 0.3105 pu$$

$$Z_{EQTH BUS G SECUENCIA CERO} = 0.3 ; X_0 = 0.3 pu$$

Cálculo de corto circuito trifásico.



Capítulo 3 Cálculo de corto circuito



$$I_B = \frac{kVA_B}{\sqrt{3} \times kV_B} = \frac{20 \times 10^3 kVA}{\sqrt{3} \times 4.16 kV} = 2775.7224 \text{ Amperes}$$

$$I_{pu} = \frac{1}{0.3105} = 3.22 \text{ pu}; I_{cc} = I_{pu} \times I_{base}$$

$$I_{cc3\phi} = 3.22 \times 2775.7224 = 8937.8261 \text{ Amperes}$$

Cálculo de corto circuito monofásico.

$$I_{pu} = \frac{1}{X_1 + X_2 + X_0} = \frac{1}{0.3105 + 0.3105 + 0.0389} = 1.5153 \text{ pu}$$

$$I_a = 3 \times I_{pu} = 3 \times 1.5153 \text{ pu} = 4.5461 \text{ pu}$$

$$I_{cc1\phi} = I_a \times I_{base} = 4.5461 \times 2775.7224 = 12618.767 \text{ Amperes}$$

Bus H

$$V_{pu} = \frac{V_{real}}{V_{base}} = \frac{4.16 kV}{4.16 kV} = 1 \text{ pu}$$

$$Z_{EQ1} = Z_{CÍA SUM} + Z_{T1} = 0.185 \text{ pu}$$

$$Z_{EQ2} = Z_{L2} + Z_{T3} + Z_{L4} + Z_{M9 AM14} = 1.6296 \text{ pu}$$

$$Z_{EQ3} = Z_{EQ2} // Z_{EQ1} = 0.1661 \text{ pu}$$

$$Z_{EQ4} = Z_{EQ3} + Z_{L1} + Z_{T2} + Z_{L3} = 0.4926 \text{ pu}$$

$$Z_{M1 AM8} = 0.872 \text{ pu}$$

$$Z_{EQTH BUS H} = Z_{EQ4} // Z_{M1 AM8} = X_1 = X_2 = 0.3148 \text{ pu}$$

$$Z_{EQTH BUS H} = X_1 = X_2 = 0.3148 \text{ pu}$$

$$Z_{EQTH BUS H SECUENCIA CERO} = X_0 = 0.3447 \text{ pu}$$

Cálculo de corto circuito trifásico.

$$I_B = \frac{kVA_B}{\sqrt{3} \times kV_B} = \frac{20 \times 10^3 kVA}{\sqrt{3} \times 4.16 kV} = 2775.7224 \text{ Amperes}$$

$$I_{pu} = \frac{1}{0.3148} = 3.18 \text{ pu}; I_{cc} = I_{pu} \times I_{base}$$

$$I_{cc3\phi} = 3.18 \times 2775.7224 = 8826.7972 \text{ Amperes}$$



Capítulo 3 Cálculo de corto circuito



Tabla 3.2 Corto circuito en los Bus

Bus	Corto circuito 3 ϕ Amperes	Corto circuito 1 ϕ Amperes
A	4135.83	3263.1823
B	5731.6655	8139.48
C	5338.4	6576.78
D	12701.7058	18417.83917
E	12316.8056	11578.7958
F	5413.7	6677.1812
G	8937.8261	9048.855
H	8826.7972	8550.3355



Capítulo 4 Protecciones



4.1 Protección de elementos de la instalación eléctrica.

Para su estudio cada elemento presenta valores como factores a considerar en la sobrecarga y corto circuito para su protección, que comúnmente son proporcionados por los fabricantes de acuerdo a normas internacionales y nacionales de puesta en operación. Los cuales son expresados frecuentemente en tablas y gráficas.

Tabla 4.1 Categoría de transformadores según kVA nominales.

CATEGORIA	MONOFASICOS	TRIFASICOS
I	5 - 500	15 - 500
II	501 - 1667	501 - 5000
III	1668 - 10,000	5001 - 30,000
IV	> 10,000	> 30,000

Fuente: Schneider Electric.

Tabla 4.2 Puntos de curva ANSI para transformadores.

Punto	Categoría	Tiempo (seg)	Corriente (amp)
1	I	$1250 Z_t^2$	I_{pc} / Z_t
	II	2	I_{pc} / Z_t
	III, IV	2	$I_{pc} / (Z_t + Z_s)$
2	II	4.08	$0.7 I_{pc} / Z_t$
	III, IV	8	$0.5 I_{pc} / (Z_t + Z_s)$
3	II	$2,551 Z_t^2$	$0.7 I_{pc} / Z_t$
	III, IV	$5,000 (Z_t + Z_s)^2$	$0.5 I_{pc} / (Z_t + Z_s)$
4	I, II, III, IV	50	$5 I_{pc}$

Fuente: Schneider Electric.



Capítulo 4 Protecciones



Donde:

Z_t = la impedancia del transformador por unidad referidos a los kVA con enfriamiento tipo OA.

Z_s = la impedancia de la fuente por unidad referidos a los kVA con enfriamiento tipo OA.

I_{pc} = corriente en Amperes a plena carga del transformador referidos a su capacidad de enfriamiento tipo OA.

Tabla 4.3 Impedancia mínima por unidad con base en los *kVA* del transformador

IMPEDANCIAS MINIMAS		
MONOFASICO KVA	TRIFASICO KVA	IMPEDANCIA MINIMA Z_t EN POR UNIDAD EN BASE A LOS KVA DEL TRANSFORMADOR
5-25	15-75	0.0250
37.5-100	112.5-300	0.0286
167-500	500	0.0400

Tabla 4.4 Factor ANSI según la conexión del transformador.

FACTOR ANSI	
CONEXION DEL TRANSFORMADOR	FACTOR ANSI
DELTA-DELTA	0.87
DELTA-ESTRELLA	0.58
DELTA-ESTRELLA	1.00
ESTRELLA ATERRIZADA-ESTRELLA	1.00
ESTRELLA ATERRIZADA-ESTRELLA ATERRIZADA	1.00
ESTRELLA-ESTRELLA ATERRIZADA(TIPO NUCLEO)	0.67
ESTRELLA-ESTRELLA (TIPO ACORAZADO)	1.00
ESTRELLA-ESTRELLA	1.00
ESTRELLA ATERRIZADA-DELTA	1.00
ESTRELLA-DELTA	1.00



Capítulo 4 Protecciones



La corriente de magnetización de un transformador se considera como un múltiplo de la corriente nominal. El voltaje inicial y el flujo magnético residual que se produce al iniciar la energización del transformador son factores que se toman en cuenta para la protección, antes de causar daño térmico o mecánico en el equipo.

4.2 Puntos ANSI de un transformador y protección con relevador diferencial 87

Se consideran las siguientes cantidades para el transformador según la categoría

Z_t = impedancia de transformador por unidad

Z_s = impedancia de fuente por unidad

I_{pc} = corriente plena carga del transformador

Y las ecuaciones que siguen según ANSI

De la tabla 4.3 tenemos un transformador trifásico cumple dentro de una impedancia mínima.

$$Z_t \text{ pu} = \frac{Z_t\%}{100} \text{ Impedancia del transformador por unidad.}$$

$$Z_s \text{ pu} = \frac{Z_s\%}{100} \text{ Impedancia de la fuente.}$$

$$Z_t = 0.16 \text{ pu}$$

$$Z_s = 0.025 \text{ pu}$$

Cálculos para transformador No. 1 con los datos siguientes:

20 MVA, 115/13.8 kVA, 16%

La corriente nominal se considera igual a la corriente a plena carga. $I_N = I_{pc}$

Punto ANSI No. 1

$$I_{pc} = \frac{kVA \times 10^3}{\sqrt{3} \times kV} \quad \text{Ec. (2.1)}$$

$$I_{pc} = \frac{kVA}{\sqrt{3} \times kV} = \frac{20000 \text{ kVA}}{\sqrt{3} \times 115 \text{ kV}} = 100.4087425 \text{ A}$$



Capítulo 4 Protecciones



$$Zt = 0.16 \text{ pu}$$

$$Zs = 0.025 \text{ pu}$$

De la tabla 4.2 la ecuación que corresponde para un transformador de categoría III y con un tiempo $t_1 = 2$ segundos, del punto ANSI No. 1 es:

$$I_{ANSI\ NO.1} = \frac{I_{PC}}{Zt + Zs} \text{ Ec. (4.1)}$$

$$I_{ANSI\ NO.2} = \frac{I_{PC}}{Zt + Zs} = \frac{100.4087425}{0.16 + 0.025} = 542.7499595 \text{ A}$$

Punto ANSI No. 2 y con $t_2 = 8$ segundos.

$$I_{ANSI\ NO.2} = \frac{0.5I_{PC}}{Zt + Zs} \text{ Ec. (4.2)}$$

$$I_{ANSI\ NO.2} = \frac{0.5I_{PC}}{Zt + Zs} = \frac{100.4087425}{0.16 + 0.025} = 271.3749797 \text{ A}$$

Punto ANSI No. 3

La corriente del punto tres es idéntica a la corriente del punto ANSI No. 2 ya que se ocupa la misma ecuación que en el punto ANSI No. 2

Pero el tiempo con la ecuación:

$$t_{PUNTO\ ANSI\ NO.3} = 5000 \times (Zt + Zs)^2 \text{ Ec. (4.3)}$$

$$t_{PUNTO\ ANSI\ NO.3} = 5000 \times (Zt + Zs)^2 = 5000 \times (.16 + .025)^2 = 171.125 \text{ s}$$

$$I_{ANSI\ NO.3} = \frac{0.5I_{PC}}{Zt + Zs} = \frac{100.4087425}{0.16 + 0.025} = 271.3749797 \text{ A}$$

Punto ANSI NO. 4

Este punto tiene un tiempo de 50 s y se ocupa la ecuación para la corriente:

$$t_{PUNTO\ ANSI\ NO.4} = 5 \times I_{PC} \text{ Ec. (4.4)}$$

$$t_{PUNTO\ ANSI\ NO.4} = 5 \times I_{PC} = 5 \times 100.4087425 = 502.0437125 \text{ A}$$



Capítulo 4 Protecciones



Para los transformadores se recomienda el uso de protección diferencial, la cual es capaz de detectar fallas internas. Por lo que necesitamos hacer uso de transformadores de corriente que actuarán en estos casos.

Para encontrar la relación de transformación de los TC ocupamos la Ec. (2.1) en el lado del primario y secundario del transformador. Entonces consideramos sobrecarga de 50% para encontrar las corrientes primarias de los TC, se multiplica 1.5 veces la corriente nominal. Y con este valor determinamos la relación de transformación.

La ecuación de sobrecarga es:

$$I_{SC} = 1.5 \times I_{PC} \text{ Ec. (4.5)}$$

Cálculo de las relaciones de transformación de los TC lado de alta y baja tensión.

Lado alta tensión:

$$I_{PC} = \frac{20000 \text{ kVA}}{\sqrt{3} \times 115 \text{ kV}} = 100.4087425 \text{ A}$$

$$I_{SC} = 1.5 \times I_{PC} = 1.5 \times 100.4087425 \text{ A} = 150.6131138 \text{ A}$$

La relación de transformación lado de alta será:

$$RTC = \frac{150}{5}$$

$$RTC \text{ } 150 : 5 = 30$$

Lado de baja:

$$I_{PC} = \frac{20000 \text{ kVA}}{\sqrt{3} \times 13.8 \text{ kV}} = 836.7395206 \text{ A}$$

$$I_{SC} = 1.5 \times I_{PC} = 1.5 \times 836.7395206 \text{ A} = 1255.109281 \text{ A}$$

$$RTC = \frac{1200}{5}$$

$$RTC \text{ } 1200 : 5 = 240$$

La conexión de los transformadores de corriente en el lado de alta será en estrella, y en el lado de baja será en delta, esto con la finalidad de compensar el desfase de las corrientes de la delta con respecto de las corrientes de la estrella en los devanados del transformador de potencia.



Capítulo 4 Protecciones



Y Tomando en cuenta los TAP que se pueden seleccionar para un relevador Westinghouse tipo 87 diferencial tenemos:

Calculamos las corrientes secundarias de los transformadores de corriente:

$$I_{REL} = \frac{I_{PC}}{RTC} \quad \text{Ec. (4.6)}$$

Corriente devanado primario:

$$I_{REL} = \frac{I_{PC}}{RTC} = \frac{100.4}{30} = 3.346 \text{ Amperes}$$

Para encontrar la corriente en el devanado secundario del TC ocupamos la expresión

$$I_{REL} = \frac{\sqrt{3} \times I_{PC}}{RTC} \quad \text{Ec. (4.7)}$$

Corriente devanado secundario:

$$I_{REL} = \frac{\sqrt{3} \times I_{PC}}{RTC} = \frac{\sqrt{3} \times 836.739}{240} = 6.0386 \text{ Amperes}$$

$$\frac{TAP_{MAYOR}}{TAP_{MENOR}} = \frac{CORRIENTE SECUNDARIA_{MAYOR}}{CORRIENTE SECUNDARIA_{MENOR}} = \frac{I_2}{I_1} = \frac{6.0386}{3.346} = 1.8$$

De tabla de fabricante cociente de TAP'S es 1.891 el cual nos lleva a TAP mayor 8.7 y TAP menor 4.6

$$\% E = \left(\frac{1.8 - 1.891}{1.891} \right) \times 100 = 4.81\%$$

Que es menor al 5% indicado.

Cálculos para transformador No. 2 con los datos siguientes:



Capítulo 4 Protecciones



4 MVA, 13.8/4.16 kVA, 6%

La corriente nominal o a plena carga:

$$I_{PC} = \frac{kVA}{\sqrt{3} \times kV} = \frac{4000kVA}{\sqrt{3} \times 13.8} = 167.3479041A$$

La impedancia del transformador:

$$Z_t = \frac{Z_t\%}{100} = \frac{6\%}{100} = 0.06 pu$$

De la tabla 3.3 observamos que corresponde a una categoría II, con lo que procedemos a calcular los puntos ANSI.

Punto No. 1. Con un tiempo de 2 segundos, usamos la ecuación:

$$I_{PUNTOANSINO.1} = \frac{I_{PC}}{Z_t} \text{ Ec. (4.9)}$$

$$I_{PUNTOANSINO.1} = 2789.1317 A$$

Punto No. 2 Con un tiempo de 4.08 segundos, usamos la ecuación:

$$I_{PUNTOANSINO.2} = 0.7 \frac{I_{PC}}{Z_t} \text{ Ec. (4.10)}$$

$$I_{PUNTOANSINO.2} = 0.7 \frac{I_{PC}}{Z_t} = 0.7 \frac{167.3479041}{0.06} = 1952.392215 A$$

Punto No. 3 para encontrar el tiempo usamos la ecuación:

$$t = 2551(Z_t)^2 \text{ Ec. (4.11)}$$

$$t = 2551(Z_t)^2 = 2551(0.06)^2 = 9.1836 \text{ segundos}$$

Para encontrar la corriente se usa la misma ecuación que para el punto No. 2

$$I_{PUNTOANSINO.2} = 0.7 \frac{I_{PC}}{Z_t} = 0.7 \frac{167.3479041}{0.06} = 1952.392215 A$$

Punto No. 4 con un tiempo de 50 segundos, usamos la ecuación Ec. (4.4):

$$I_{PUNTOANSINO.4} = 5I_{PC} = 5 \times 167.3479041 = 836.7395206 A$$



Capítulo 4 Protecciones



Se utilizará una protección diferencial, por lo que calculamos las corrientes nominales del lado de alta y el lado de baja tensión.

Lado alta:

$$I_{PC} = \frac{kVA}{\sqrt{3} \times kV} = \frac{4000 kVA}{\sqrt{3} \times 13.8 kV} = 167.3479041 A$$

$$I_{SC} = 1.5 \times I_{PC} = 251.0218562 A$$

La RTC será:

$$RTC = 250 : 5$$

$$RTC = \frac{250}{5} = 50$$

Lado baja:

$$I_{PC} = \frac{kVA}{\sqrt{3} \times kV} = \frac{4000 kVA}{\sqrt{3} \times 4.16 kV} = 555.1444896 A$$

$$I_{SC} = 1.5 \times I_{PC} = 832.7167344 A$$

La RTC será:

$$RTC = 800 : 5$$

$$RTC = \frac{800}{5} = 160$$

Calculamos las corrientes de los transformadores de corriente:

Lado alta:

$$I_{REL} = \frac{I_{PC}}{RTC} = \frac{167.3469}{50} = 3.346 \text{ Amperes}$$

Lado baja:

$$I_{REL} = \frac{\sqrt{3} \times I_{PC}}{RTC} = \frac{\sqrt{3} \times 555.1414}{160} = 6.009 \text{ Amperes}$$



Capítulo 4 Protecciones



$$\frac{TAP_{MAYOR}}{TAP_{MENOR}} = \frac{CORRIENTE SECUNDARIA_{MAYOR}}{CORRIENTE SECUNDARIA_{MENOR}} = \frac{I_2}{I_1} = \frac{6.009}{3.346} = 1.8$$

De tabla de fabricante cociente de TAP'S es 1.891 el cual nos lleva a TAP mayor 8.7 y TAP menor 4.6

$$\% E = \left(\frac{1.8 - 1.891}{1.891} \right) \times 100 = 4.81\%$$

Que es menor al 5% indicado.

Cálculo para transformador No. 3 con los datos siguientes:

3 MVA, 13.8/2.4 kV, 5.5%

La corriente nominal o a plena carga:

$$I_{PC} = \frac{kVA}{\sqrt{3} \times kV} = \frac{3000kVA}{\sqrt{3} \times 13.8} = 125.5109281A$$

La impedancia del transformador:

$$Z_t = \frac{Z_t\%}{100} = \frac{5.5\%}{100} = 0.055 pu$$

De la tabla 4.2 observamos que corresponde a una categoría II, con lo que procedemos a calcular los puntos ANSI.

Punto No. 1. Con un tiempo de 2 segundos, usamos la ecuación:

$$I_{PUNTOANSINO.1} = \frac{I_{PC}}{Z_t} \text{ Ec. (4.9)}$$

$$I_{PUNTOANSINO.1} = \frac{I_{PC}}{Z_t} = \frac{125.5109281A}{0.055} = 2282.016875A$$

Punto No. 2 Con un tiempo de 4.08 segundos, usamos la ecuación:

$$I_{PUNTOANSINO.2} = 0.7 \frac{I_{PC}}{Z_t} \text{ Ec. (4.10)}$$



Capítulo 4 Protecciones



$$I_{PUNTO\ ANSI\ NO.2} = 0.7 \frac{I_{PC}}{Z_t} = 0.7 \frac{125.5109281}{0.055} = 1597.411812\ A$$

Punto No. 3 para encontrar el tiempo usamos la ecuación:

$$t = 2551(Zt)^2 \text{ Ec. (4.11)}$$

$$t = 2551(Zt)^2 = 2551(0.055)^2 = 7.716775 \text{ segundos}$$

Para encontrar la corriente se usa la misma ecuación que para el punto No. 2

$$I_{PUNTO\ ANSI\ NO.3} = 0.7 \frac{I_{PC}}{Z_t} = 0.7 \frac{125.5109281}{0.055} = 1597.411812\ A$$

Punto No. 4 con un tiempo de 50 segundos, usamos la ecuación Ec. (4.4):

$$I_{PUNTO\ ANSI\ NO.4} = 5I_{PC} = 5 \times 125.5109281\ A = 627.5546405\ A$$

Se utilizará una protección diferencial, por lo que calculamos las corrientes nominales del lado de alta y el lado de baja tensión.

Lado alta:

$$I_{PC} = \frac{kVA}{\sqrt{3} \times kV} = \frac{3000\ kVA}{\sqrt{3} \times 13.8\ kV} = 125.5109281\ A$$

$$I_{SC} = 1.5 \times I_{PC} = 188.2663921\ A$$

La RTC será:

$$RTC = 200 : 5$$

$$RTC = \frac{200}{5} = 40$$

Lado baja:

$$I_{PC} = \frac{kVA}{\sqrt{3} \times kV} = \frac{3000\ kVA}{\sqrt{3} \times 2.4\ kV} = 721.6878365\ A$$

$$I_{SC} = 1.5 \times I_{PC} = 1082.531755\ A$$



Capítulo 4 Protecciones



La RTC será:

$$RTC = 1000 : 5$$

$$RTC = \frac{1000}{5} = 200$$

Calculamos las corrientes de los transformadores de corriente:

Lado alta:

$$I_{REL} = \frac{I_{PC}}{RTC} = \frac{125.51}{40} = 3.137 \text{ Amperes}$$

Lado baja:

$$I_{REL} = \frac{\sqrt{3} \times I_{PC}}{RTC} = \frac{\sqrt{3} \times 721.6878}{200} = 6.25 \text{ Amperes}$$

Cociente de TAP'S:

$$\frac{TAP_{MAYOR}}{TAP_{MENOR}} = \frac{CORRIENTE SECUNDARIA_{MAYOR}}{CORRIENTE SECUNDARIA_{MENOR}} = \frac{I_2}{I_1} = \frac{6.25}{3.137} = 2.0$$

De tabla de fabricante cociente de TAP'S es 2.071 el cual nos lleva a TAP mayor 8.7 y TAP menor 4.2

$$\% E = \left(\frac{1.99 - 2.071}{2.071} \right) \times 100 = 3.9\%$$

Que es menor al 5% indicado.



Capítulo 4 Protecciones



4.3 Consideraciones generales para la protección de un motor

La protección para motores se selecciona contra sobre corriente suficiente para que soporte la corriente de arranque que puede ser de 4 hasta 10 veces la corriente nominal, se seleccionan lo suficientemente grandes para evitar disparos en falso, pero a la vez sin excederse de estas cantidades que sobrepasen lo permitido antes de daño térmico o mecánico.

Intervienen en la corriente de arranque factores como corriente a rotor bloqueado que es la corriente de reposo, o la corriente de movimiento a alto total. La cual se puede consultar en tablas o con fabricante. La corriente de rotor bloqueado se permite entre 0.1 a 0.4 segundos, ya que de la expresión It^2 que es calor no se puede permitir mayor tiempo sin ocasionar daños al equipo. La corriente de magnetización es de 1.76 veces la corriente de arranque para motores de media tensión se permite hasta 0.1 segundos.

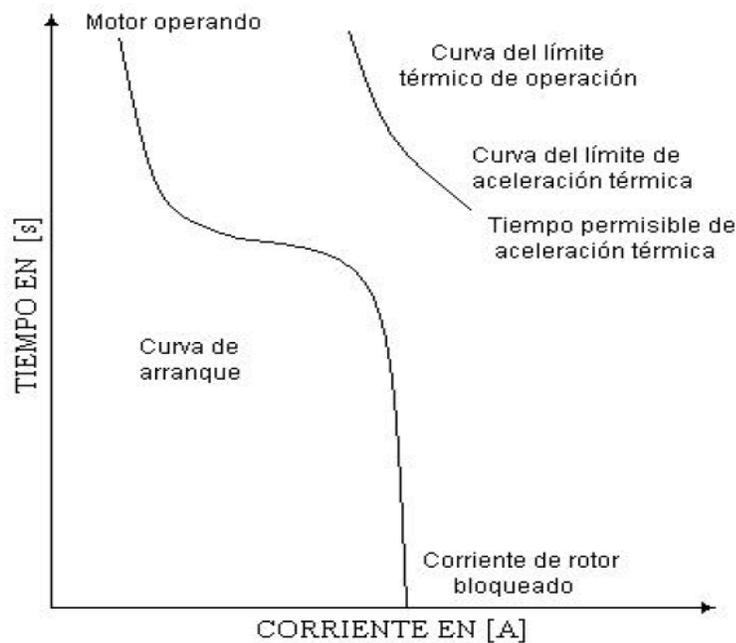


Figura 4.1 Curva típica de tiempo corriente de motor en operación.

Se considera para $1 \text{ kVA} = 1 \text{ HP}$, algunos motores son utilizados en más de una ocasión por lo que sólo se encontrarán los valores de uno de ellos para evitar repetir los cálculos.

Para motor 1 y 2 de 800 HP y voltaje de 4.16 KV

$$I_{PC} = \frac{kVA}{\sqrt{3} \times kV} \quad \text{Ec. (2.1)}$$



Capítulo 4 Protecciones



$$I_{PC} = \frac{kVA}{\sqrt{3} \times 4.16} = \frac{800}{\sqrt{3} \times 4.16} = 111.02889 \text{ Amperes}$$

$$I_{RB} = \text{Factor de rotor bloqueado} \times I_{PC} \quad \text{Ec. (4.13)}$$

Para código F el máximo valor del código es 5

$$I_{RB} = 5 \times I_{PC} = 5 \times \frac{kVA}{\sqrt{3} \times kV} = 5 \times \frac{800}{\sqrt{3} \times 4.16} = 555.1445 \text{ Amperes}$$

Por lo que la corriente de arranque de motor se calcula por la ecuación:

$$I_{CORRIENTE DE ARRANQUE DEL MOTOR} = 1.76 \times I_{RB} \quad \text{Ec. (4.14)}$$

$$I_{CORRIENTE DE ARRANQUE DEL MOTOR} = 1.76 \times I_{RB} = 1.76 \times 555.1445 = 977.0543 \text{ Amperes}$$

Corriente de ajuste de protección.

Se considera para motores de media tensión factores de servicio de 115 % y factor de sobrecarga 125 %. Con esto se obtiene el ajuste de la corriente, con la ecuación:

$$I_{AJUSTE DE CORRIENTE} = 1.15 \times 1.25 \times I_{PC} \quad \text{Ec. (4.15)}$$

$$I_{CORRIENTE DE ARRANQUE DEL MOTOR} = 1.15 \times 1.25 \times I_{PC} = 1.15 \times 1.25 \times 111.0289 \text{ Amperes} = 159.6041 \text{ Amperes}$$

Por lo que la RTC es 200:5, RTC =40

Se propone relevador 51 con la ecuación:

$$I_{REL 51} = \frac{I_{AJUSTE DE CORRIENTE}}{RTC} \quad \text{Ec. (4.16)}$$

$$I_{REL 51} = \frac{I_{AJUSTE DE CORRIENTE}}{RTC} = \frac{159.6041}{40} = 3.9901 \text{ Amperes}$$

Corresponde a TAP 4

Corriente de arranque del relevador al arrancar el motor se obtiene con la ecuación:

$$I_{AL ARRANCAR EL MOTOR} = \frac{I_{RB}}{RTC} \quad \text{Ec. (4.17)}$$



Capítulo 4 Protecciones



$$I_{AL\ ARRANCAR\ EL\ MOTOR} = \frac{I_{RB}}{RTC} = \frac{555.1445}{40} = 13.8786\ Amperes$$

Se obtiene el múltiplo de TAP con la ecuación:

$$M = \frac{I_{AL\ ARRANCAR\ EL\ MOTOR}}{I_{REL\ 51}} \quad Ec. (4.18)$$

$$M = \frac{I_{AL\ ARRANCAR\ EL\ MOTOR}}{I_{REL\ 51}} = \frac{13.8786\ Amperes}{4\ Amperes} = 3.4696$$

Elegimos para un relevador 51 con un tiempo de 0.2 segundos o 12 ciclos, M de 3.4696 y palanca de 1/2.

Para motor 3 y 4 de 600 HP y voltaje de 4.16 KV

$$I_{PC} = \frac{kVA}{\sqrt{3} \times kV} \quad Ec. (2.1)$$

$$I_{PC} = \frac{kVA}{\sqrt{3} \times 4.16} = \frac{600}{\sqrt{3} \times 4.16} = 83.2717\ Amperes$$

$$I_{RB} = \text{Factor de rotor bloqueado} \times I_{PC} \quad Ec. (4.13)$$

Para código F el máximo valor del código es 5

$$I_{RB} = 5 \times I_{PC} = 5 \times \frac{kVA}{\sqrt{3} \times kV} = 5 \times \frac{600}{\sqrt{3} \times 4.16} = 416.3584\ Amperes$$

Por lo que la corriente de arranque de motor se calcula por la ecuación:

$$I_{CORRIENTE\ DE\ ARRANQUE\ DEL\ MOTOR} = 1.76 \times I_{RB} \quad Ec. (4.14)$$

$$I_{CORRIENTE\ DE\ ARRANQUE\ DEL\ MOTOR} = 1.76 \times I_{RB} = 1.76 \times 416.3584 = 732.7907\ Amperes$$

Corriente de ajuste de protección.

Se considera para motores de media tensión factores de servicio de 115 % y factor de sobrecarga 125 %. Con esto se obtiene el ajuste de la corriente, con la ecuación:



Capítulo 4 Protecciones



$$I_{AJUSTE DE CORRIENTE} = 1.15 \times 1.25 \times I_{PC} \quad \text{Ec. (4.15)}$$

$$I_{AJUSTE DE CORRIENTE} = 1.15 \times 1.25 \times I_{PC} = 1.15 \times 1.25 \times 83.2717 \text{ Amperes} = 119.7030 \text{ Amperes}$$

Por lo que la RTC es 150:5, RTC =30

Se propone relevador 51 con la ecuación:

$$I_{REL 51} = \frac{I_{AJUSTE DE CORRIENTE}}{RTC} \quad \text{EC. (4.16)}$$

$$I_{REL 51} = \frac{I_{AJUSTE DE CORRIENTE}}{RTC} = \frac{119.7030}{30} = 3.9901 \text{ Amperes}$$

Corresponde a TAP 4

Corriente de arranque del relevador al arrancar el motor se obtiene con a la ecuación:

$$I_{AL ARRANCAR EL MOTOR} = \frac{I_{RB}}{RTC} \quad \text{Ec. (4.17)}$$

$$I_{AL ARRANCAR EL MOTOR} = \frac{I_{RB}}{RTC} = \frac{416.3584}{30} = 13.8786 \text{ Amperes}$$

Se obtiene el múltiplo de TAP con la ecuación:

$$M = \frac{I_{AL ARRANCAR EL MOTOR}}{I_{REL 51}} \quad \text{Ec. (4.18)}$$

$$M = \frac{I_{AL ARRANCAR EL MOTOR}}{I_{REL 51}} = \frac{13.8786 \text{ Amperes}}{4 \text{ Amperes}} = 3.4696$$

Elegimos para un relevador 51 con un tiempo de 0.2 segundos o 12 ciclos, M de 3.4696 y palanca de 1/2.

Para motor de 5 y 6 400 HP y voltaje de 4.16 KV

$$I_{PC} = \frac{kVA}{\sqrt{3} \times kV} \quad \text{Ec. (2.1)}$$



Capítulo 4 Protecciones



$$I_{PC} = \frac{kVA}{\sqrt{3} \times 4.16} = \frac{400}{\sqrt{3} \times 4.16} = 51.5144 \text{ Amperes}$$

$$I_{RB} = \text{Factor de rotor bloqueado} \times I_{PC} \quad \text{Ec. (4.13)}$$

Para código F el máximo valor del código es 5

$$I_{RB} = 5 \times I_{PC} = 5 \times \frac{kVA}{\sqrt{3} \times kV} = 5 \times \frac{400}{\sqrt{3} \times 4.16} = 277.5722 \text{ Amperes}$$

Por lo que la corriente de arranque de motor se calcula por la ecuación:

$$I_{\text{CORRIENTE DE ARRANQUE DEL MOTOR}} = 1.76 \times I_{RB} \quad \text{Ec. (4.14)}$$

$$I_{\text{CORRIENTE DE ARRANQUE DEL MOTOR}} = 1.76 \times I_{RB} = 1.76 \times 277.5722 = 488.5271 \text{ Amperes}$$

Corriente de ajuste de protección.

Se considera para motores de media tensión factores de servicio de 115 % y factor de sobrecarga 125 %. Con esto se obtiene el ajuste de la corriente, con la ecuación:

$$I_{\text{AJUSTE DE CORRIENTE}} = 1.15 \times 1.25 \times I_{PC} \quad \text{Ec. (4.15)}$$

$$I_{\text{AJUSTE DE CORRIENTE}} = 1.15 \times 1.25 \times I_{PC} = 1.15 \times 1.25 \times 55.5144 \text{ Amperes} = 79.8020 \text{ Amperes}$$

Por lo que la RTC es 100:5, RTC =20

Se propone relevador 51 con la ecuación:

$$I_{REL\ 51} = \frac{I_{\text{AJUSTE DE CORRIENTE}}}{RTC} \quad \text{EC. (4.16)}$$

$$I_{REL\ 51} = \frac{I_{\text{AJUSTE DE CORRIENTE}}}{RTC} = \frac{79.8020}{20} = 3.9901 \text{ Amperes}$$

Corresponde un TAP de 4

Corriente de arranque del relevador al arrancar el motor se obtiene con a la ecuación:

$$I_{\text{AL ARRANCAR EL MOTOR}} = \frac{I_{RB}}{RTC} \quad \text{Ec. (4.17)}$$



Capítulo 4 Protecciones



$$I_{AL\ ARRANCAR\ EL\ MOTOR} = \frac{I_{RB}}{RTC} = \frac{277.5722}{20} = 13.8786\ Amperes$$

Se obtiene el múltiplo de TAP con la ecuación:

$$M = \frac{I_{AL\ ARRANCAR\ EL\ MOTOR}}{I_{REL\ 51}} \quad Ec. (4.18)$$

$$M = \frac{I_{AL\ ARRANCAR\ EL\ MOTOR}}{I_{REL\ 51}} = \frac{13.8786\ Amperes}{4\ Amperes} = 3.4696$$

Elegimos para un relevador 51 con un tiempo de 0.2 segundos o 12 ciclos, M de 3.4696 y palanca de 1/2.

Para motor 7 y 8 de 150 HP y voltaje de 4.16 KV

$$I_{PC} = \frac{kVA}{\sqrt{3} \times kV} \quad Ec. (2.1)$$

$$I_{PC} = \frac{kVA}{\sqrt{3} \times 4.16} = \frac{150}{\sqrt{3} \times 4.16} = 20.8179\ Amperes$$

$$I_{RB} = \text{Factor de rotor bloqueado} \times I_{PC} \quad Ec. (4.13)$$

Para código F el máximo valor del código es 5

$$I_{RB} = 5 \times I_{PC} = 5 \times \frac{kVA}{\sqrt{3} \times kV} = 5 \times \frac{150}{\sqrt{3} \times 4.16} = 104.0896\ Amperes$$

Por lo que la corriente de arranque de motor se calcula por la ecuación:

$$I_{CORRIENTE\ DE\ ARRANQUE\ DEL\ MOTOR} = 1.76 \times I_{RB} \quad Ec. (4.14)$$

$$I_{CORRIENTE\ DE\ ARRANQUE\ DEL\ MOTOR} = 1.76 \times I_{RB} = 1.76 \times 104.0896 = 183.1977\ Amperes$$

Corriente de ajuste de protección.

Se considera para motores de media tensión factores de servicio de 115 % y factor de sobrecarga 125 %. Con esto se obtiene el ajuste de la corriente, con la ecuación:



Capítulo 4 Protecciones

$$I_{AJUSTE DE CORRIENTE} = 1.15 \times 1.25 \times I_{PC} \quad \text{Ec. (4.15)}$$

$$I_{AJUSTE DE CORRIENTE} = 1.15 \times 1.25 \times I_{PC} = 1.15 \times 1.25 \times 20.8179 \text{ Amperes} = 29.9258 \text{ Amperes}$$

La corriente de corto circuito en la barra H es 8826.7972 Amperes por lo que la relación del TC es:

Por lo que la RTC es 50:5, RTC = 10

Se propone relevador 51 con la ecuación:

$$I_{REL 51} = \frac{I_{AJUSTE DE CORRIENTE}}{RTC} \quad \text{Ec. (4.16)}$$

$$I_{REL 51} = \frac{I_{AJUSTE DE CORRIENTE}}{RTC} = \frac{29.9258}{10} = 2.9926 \text{ Amperes}$$

Corresponde a un TAP de 3

Corriente de arranque del relevador al arrancar el motor se obtiene con a la ecuación:

$$I_{AL ARRANCAR EL MOTOR} = \frac{I_{RB}}{RTC} \quad \text{Ec. (4.17)}$$

$$I_{AL ARRANCAR EL MOTOR} = \frac{I_{RB}}{RTC} = \frac{104.08196}{10} = 10.4082 \text{ Amperes}$$

Se obtiene el múltiplo de TAP con la ecuación:

$$M = \frac{I_{AL ARRANCAR EL MOTOR}}{I_{REL 51}} \quad \text{Ec. (4.18)}$$

$$M = \frac{I_{AL ARRANCAR EL MOTOR}}{I_{REL 51}} = \frac{10.4082 \text{ Amperes}}{3 \text{ Amperes}} = 3.4694$$

Elegimos para un relevador 51 con un tiempo de 0.2 segundos o 12 ciclos, M de 3.4696 y palanca de 1/2.

Para motor 9 y 10 de 300 HP y voltaje de 2.4 KV



Capítulo 4 Protecciones



$$I_{PC} = \frac{kVA}{\sqrt{3} \times kV} \quad \text{Ec. (2.1)}$$

$$I_{PC} = \frac{kVA}{\sqrt{3} \times 2.4} = \frac{300}{\sqrt{3} \times 2.4} = 72.1688 \text{ Amperes}$$

Para código F el máximo valor del código es 5

$$I_{RB} = 5 \times I_{PC} = 5 \times \frac{kVA}{\sqrt{3} \times kV} = 5 \times \frac{300}{\sqrt{3} \times 2.4} = 360.8439 \text{ Amperes}$$

Por lo que la corriente de arranque de motor se calcula por la ecuación:

$$I_{CORRIENTE DE ARRANQUE DEL MOTOR} = 1.76 \times I_{RB} \quad \text{Ec. (4.14)}$$

$$I_{CORRIENTE DE ARRANQUE DEL MOTOR} = 1.76 \times I_{RB} = 1.76 \times 360.8439 = 635.0853 \text{ Amperes}$$

Corriente de ajuste de protección.

Se considera para motores de media tensión factores de servicio de 115 % y factor de sobrecarga 125 %. Con esto se obtiene el ajuste de la corriente, con la ecuación:

$$I_{AJUSTE DE CORRIENTE} = 1.15 \times 1.25 \times I_{PC} \quad \text{Ec. (4.15)}$$

$$I_{AJUSTE DE CORRIENTE} = 1.15 \times 1.25 \times I_{PC} = 1.15 \times 1.25 \times 72.1688 \text{ Amperes} = 103.7426 \text{ Amperes}$$

Por lo que la RTC es 150:5; RTC = 30

Se propone relevador 51 con la ecuación:

$$I_{REL 51} = \frac{I_{AJUSTE DE CORRIENTE}}{RTC} \quad \text{EC. (4.16)}$$

$$I_{REL 51} = \frac{I_{AJUSTE DE CORRIENTE}}{RTC} = \frac{103.7426}{30} = 3.458 \text{ Amperes}$$

Corresponde un TAP de 3.5

Corriente de arranque del relevador al arrancar el motor se obtiene con la ecuación:

$$I_{AL ARRANCAR EL MOTOR} = \frac{I_{RB}}{RTC} \quad \text{Ec. (4.17)}$$



Capítulo 4 Protecciones



$$I_{AL\ ARRANCAR\ EL\ MOTOR} = \frac{I_{RB}}{RTC} = \frac{360.8439}{30} = 12.0281\ Amperes$$

Se obtiene el múltiplo de TAP con la ecuación:

$$M = \frac{I_{AL\ ARRANCAR\ EL\ MOTOR}}{I_{REL\ 51}} \quad \text{Ec. (4.18)}$$

$$M = \frac{I_{AL\ ARRANCAR\ EL\ MOTOR}}{I_{REL\ 51}} = \frac{12.0281\ Amperes}{3.5\ Amperes} = 3.4366$$

Elegimos para un relevador 51 con un tiempo de 0.2 segundos o 12 ciclos, M de 3.4366 y palanca de 1/2.

Para motor 11 y 12 de 600 HP y voltaje de 2.4 KV

$$I_{PC} = \frac{kVA}{\sqrt{3} \times kV} \quad \text{Ec. (2.1)}$$

$$I_{PC} = \frac{kVA}{\sqrt{3} \times 4.16} = \frac{600}{\sqrt{3} \times 2.4} = 144.3376\ Amperes$$

$$I_{RB} = \text{Factor de rotor bloqueado} \times I_{PC} \quad \text{Ec. (4.13)}$$

Para código F el máximo valor del código es 5

$$I_{RB} = 5 \times I_{PC} = 5 \times \frac{kVA}{\sqrt{3} \times kV} = 5 \times \frac{600}{\sqrt{3} \times 2.4} = 721.6878\ Amperes$$

Por lo que la corriente de arranque de motor se calcula por la ecuación:

$$I_{CORRIENTE\ DE\ ARRANQUE\ DEL\ MOTOR} = 1.76 \times I_{RB} \quad \text{Ec. (4.14)}$$

$$I_{CORRIENTE\ DE\ ARRANQUE\ DEL\ MOTOR} = 1.76 \times I_{RB} = 1.76 \times 721.6878 = 1270.1706\ Amperes$$

Corriente de ajuste de protección.



Capítulo 4 Protecciones



Se considera para motores de media tensión factores de servicio de 115 % y factor de sobrecarga 125 %. Con esto se obtiene el ajuste de la corriente, con la ecuación:

$$I_{AJUSTE DE CORRIENTE} = 1.15 \times 1.25 \times I_{PC} \quad \text{Ec. (4.15)}$$

$$I_{AJUSTE DE CORRIENTE} = 1.15 \times 1.25 \times I_{PC} = 1.15 \times 1.25 \times 144.3376 \text{ Amperes} = 207.4873 \text{ Amperes}$$

Po lo que la RTC es 250:5; RTC = 50

Se propone relevador 51 con la ecuación:

$$I_{REL 51} = \frac{I_{AJUSTE DE CORRIENTE}}{RTC} \quad \text{Ec. (4.16)}$$

$$I_{REL 51} = \frac{I_{AJUSTE DE CORRIENTE}}{RTC} = \frac{207.4853}{50} = 4.1497 \text{ Amperes}$$

Corresponde un TAP de 4

Corriente de arranque del relevador al arrancar el motor se obtiene con a la ecuación:

$$I_{AL ARRANCAR EL MOTOR} = \frac{I_{RB}}{RTC} \quad \text{Ec. (4.17)}$$

$$I_{AL ARRANCAR EL MOTOR} = \frac{I_{RB}}{RTC} = \frac{721.6878}{50} = 14.4337 \text{ Amperes}$$

Se obtiene el múltiplo de TAP con la ecuación:

$$M = \frac{I_{AL ARRANCAR EL MOTOR}}{I_{REL 51}} \quad \text{Ec. (4.18)}$$

$$M = \frac{I_{AL ARRANCAR EL MOTOR}}{I_{REL 51}} = \frac{14.4337 \text{ Amperes}}{4 \text{ Amperes}} = 3.6084$$

Elegimos para un relevador 51 con un tiempo de 0.2 segundos o 12 ciclos, M de 3.6084 y palanca de 1/2.

Para motor 13 y 14 de 500 HP y voltaje de 2.4 KV



Capítulo 4 Protecciones



$$I_{PC} = \frac{kVA}{\sqrt{3} \times kV} \quad \text{Ec. (2.1)}$$

$$I_{PC} = \frac{kVA}{\sqrt{3} \times 4.16} = \frac{500}{\sqrt{3} \times 2.4} = 120.2813 \text{ Amperes}$$

$$I_{RB} = I_{PC} \times \frac{kVA}{HP} \quad \text{Ec. (4.13)}$$

Para código F el máximo valor del código es 5

$$I_{RB} = 5 \times I_{PC} = 5 \times \frac{kVA}{\sqrt{3} \times kV} = 5 \times \frac{500}{\sqrt{3} \times 2.4} = 601.4065 \text{ Amperes}$$

Por lo que la corriente de arranque de motor se calcula por la ecuación:

$$I_{CORRIENTE DE ARRANQUE DEL MOTOR} = 1.76 \times I_{RB} \quad \text{Ec. (4.14)}$$

$$I_{CORRIENTE DE ARRANQUE DEL MOTOR} = 1.76 \times I_{RB} = 1.76 \times 601.4065 = 1058.4755 \text{ Amperes}$$

Corriente de ajuste de protección.

Se considera para motores de media tensión factores de servicio de 115 % y factor de sobrecarga 125 %. Con esto se obtiene el ajuste de la corriente, con la ecuación:

$$I_{AJUSTE DE CORRIENTE} = 1.15 \times 1.25 \times I_{PC} \quad \text{Ec. 4.15)$$

$$I_{AJUSTE DE CORRIENTE} = 1.15 \times 1.25 \times I_{PC} = 1.15 \times 1.25 \times 120.2813 \text{ Amperes} = 172.9044 \text{ Amperes}$$

Por lo que la RTC es 200:5, RTC = 40

Se propone relevador 51 con la ecuación:

$$I_{REL 51} = \frac{I_{AJUSTE DE CORRIENTE}}{RTC} \quad \text{EC. (4.16)}$$

$$I_{REL 51} = \frac{I_{AJUSTE DE CORRIENTE}}{RTC} = \frac{172.9044}{40} = 4.3236 \text{ Amperes}$$

Corresponde un TAP de 4

Corriente de arranque del relevador al arrancar el motor se obtiene con a la ecuación:



Capítulo 4 Protecciones



$$I_{AL\ ARRANCAR\ EL\ MOTOR} = \frac{I_{RB}}{RTC} \quad \text{Ec. (4.17)}$$

$$I_{AL\ ARRANCAR\ EL\ MOTOR} = \frac{I_{RB}}{RTC} = \frac{601.4065}{40} = 15.035 \text{ Amperes}$$

$$M = \frac{I_{AL\ ARRANCAR\ EL\ MOTOR}}{I_{REL\ 51}} \quad \text{Ec. (4.18)}$$

$$M = \frac{I_{AL\ ARRANCAR\ EL\ MOTOR}}{I_{REL\ 51}} = \frac{15.035 \text{ Amperes}}{4 \text{ Amperes}} = 3.7587$$

Se obtiene el múltiplo de TAP con la ecuación:

Elegimos para un relevador 51 con un tiempo de 0.2 segundos o 12 ciclos, M de 3.7587 y palanca de 1/2.



Capítulo 4 Protecciones



4.4 Protección de conductores eléctricos

Los conductores eléctricos también son susceptibles de daño por corrientes superiores a su capacidad de conducción, por lo que es necesario protegerlos. Los conductores eléctricos se describen por su ampacidad, factor de pérdidas, material del que está construido, resistencia mecánica al viento, resistencia a la presión de tensión, temperatura, degradación por agentes químicos del medio ambiente entre otros, por supuesto además de los costos.

Los conductores eléctricos usados son normalmente de cobre o de aluminio. Las normas eléctricas establecen que para conductores usados en voltajes mayores a 600 volts se podrá usar una protección de hasta 600% de su ampacidad.

Con las siguientes ecuaciones podemos acercarnos a los valores límite de corriente antes de que exista un daño en los conductores.

Para el conductor de cobre la ecuación:

$$I = \sqrt{\frac{0.0297 \times \log_{10} \left[\frac{T2 + 234}{T1 + 234} \right]}{t}} \times A \text{ Ec (4.19)}$$

Donde

I = Máxima corriente que circula en el conductor

A = Sección transversal del conductor en Circular Mils

t = Tiempo en segundos de duración de la corriente

T1 = Máxima temperatura normal en °C

T2 = Máxima temperatura permisible del conductor en °C

Con el área en mm^2 de los conductores podemos encontrar el valor CM del conductor a partir de la equivalencia siguiente:

CM = Circular Mils

$$1 \text{ CM} = 5.067074791 \text{ mm}^2$$

Para el conductor de 2 AWG tenemos 33.6 mm^2

$$1 \text{ CM}_{2\text{AWG}} = \frac{33.6 \text{ mm}^2}{5.067074791 \times 10^{-4} \text{ mm}^2} = 66310.448 \text{ CM}$$



Capítulo 4 Protecciones



Usando la ecuación Ec (4.19)

Para un tiempo de 0.1 segundos

$$I = \sqrt{\frac{0.0297 \log \frac{234+T2}{234+T1}}{t}} \times A$$
$$I = \sqrt{\frac{0.0297 \log \frac{234+150}{234+75}}{0.1}} \times 63310.448$$
$$I = 11101.5464A$$

Para un tiempo de 10 segundos

$$I = \sqrt{\frac{0.0297 \log \frac{234+T2}{234+T1}}{t}} \times A$$
$$I = \sqrt{\frac{0.0297 \log \frac{234+150}{234+75}}{10}} \times 63310.448$$
$$I = 1110.1546A$$

Corresponde fusible 150 E

Para el conductor de 6 AWG tenemos 13.3 mm^2

$$1CM_{2AWG} = \frac{13.3 \text{ mm}^2}{5.067074791 \times 10^{-4} \text{ mm}^2} = 26247.886CM$$

Para un tiempo de 0.1 segundos

$$I = \sqrt{\frac{0.0297 \log \frac{234+T2}{234+T1}}{t}} \times A$$
$$I = \sqrt{\frac{0.0297 \log \frac{234+150}{234+75}}{0.1}} \times 26247.886$$
$$I = 4394.3622A$$



Capítulo 4 Protecciones



Para un tiempo de 10 segundos

$$I = \sqrt{\frac{0.0297 \log \frac{234+T2}{234+T1}}{t}} \times A$$
$$I = \sqrt{\frac{0.0297 \log \frac{234+150}{234+75}}{10}} \times 26247.886$$
$$I = 439.4362 A$$

Corresponde fusible 40 E

Para el conductor de 350 MCM tenemos 177 mm^2

$$1 \text{ CM}_{350 \text{ MCM}} = \frac{177 \text{ mm}^2}{5.067074791 \times 10^{-4} \text{ mm}^2} = 349313.9677 \text{ CM}$$

Para un tiempo de 0.1 segundos

$$I = \sqrt{\frac{0.0297 \times \log_{10} \left[\frac{234+150}{234+75} \right]}{0.1}} \times 349313.9677$$
$$I = 58481.36085 \text{ A}$$

Para un tiempo de 10 segundos

$$I = \sqrt{\frac{0.0297 \times \log_{10} \left[\frac{234+150}{234+75} \right]}{10}} \times 349313.9677$$

Corresponde fusible 400 E

$$I = 5848.1361 \text{ A}$$

Para un conductor de 500 MCM tenemos 253 mm^2

$$1 \text{ CM}_{500 \text{ MCM}} = \frac{253 \text{ mm}^2}{5.067074791 \times 10^{-4} \text{ mm}^2} = 499301.8861 \text{ CM}$$

Para un tiempo de 0.1 segundos



Capítulo 4 Protecciones



$$I = \sqrt{\frac{0.0297 \times \log_{10} \left[\frac{234 + 150}{234 + 75} \right]}{0.1}} \times 499301.8861$$

$$I = 83592.0017 \text{ A}$$

Para un tiempo de 10 segundos

$$I = \sqrt{\frac{0.0297 \times \log_{10} \left[\frac{234 + 150}{234 + 75} \right]}{10}} \times 499301.8861$$

$$I = 8359.2002 \text{ A}$$

Corresponde fusible 2-300 E



Capítulo 4 Protecciones



4.5 Protección de los Bus

Protección para el Bus B

$$I_{rel} = 1.3 \times I_N = 1.3 \times 836.7395 \text{ Amperes} = 1087.7613 \text{ Amperes}$$
$$RTC = 1200/5 = RTC = 240$$

Ajuste del relevador

$$I_{SEC} = \frac{I_{REL}}{RTC} = \frac{1087.7613}{240} = 4.53 \text{ Amperes}$$

Corresponde TAP 5

La corriente de falla en el secundario es

$$I_{fSEC} = \frac{I_{CC}}{RTC} = \frac{5371.6655}{240} = 23.8819 \text{ Amperes}$$

El múltiplo del TAP es

$$M = \frac{I_{fSEC}}{TAP} = \frac{137.861}{5} = 27.5722$$

Elegimos para Bus B un relevador 51 con 46 ciclos, M de 4.77 y palanca de 2.

$$M = \frac{I_{fSEC}}{TAP} = \frac{22.24}{5} = 4.45$$

Protección para el Bus D

$$I_{rel} = 1.3 \times I_N = 1.3 \times 721.6878 \text{ Amperes} = 938.19418 \text{ Amperes}$$
$$RTC = 1000/5 = RTC = 200$$

Ajuste del relevador

$$I_{SEC} = \frac{I_{REL}}{RTC} = \frac{938.19418}{200} = 4.69 \text{ Amperes}$$

Corresponde TAP 5

La corriente de falla en el secundario es



Capítulo 4 Protecciones



$$I_{fSEC} = \frac{I_{CC}}{RTC} = \frac{12701.7058}{200} = 63.5085 \text{ Amperes}$$

El múltiplo del TAP es

$$M = \frac{I_{fSEC}}{TAP} = \frac{63.5085}{5} = 12.7$$

Elegimos para Bus D un relevador 51 con 12 ciclos, M de 12.7 y palanca de 1.

Protección para el Bus G

$$I_{rel} = 1.3 \times I_N = 1.3 \times 555.1448 \text{ Amperes} = 721.6878 \text{ Amperes}$$
$$RTC = 800 / 5 = RTC = 160$$

Ajuste del relevador

$$I_{SEC} = \frac{I_{REL}}{RTC} = \frac{721.6878}{160} = 4.51 \text{ Amperes}$$

Corresponde TAP 5

La corriente de falla en el secundario es

$$I_{fSEC} = \frac{I_{CC}}{RTC} = \frac{8937.8261}{160} = 55.86 \text{ Amperes}$$

El múltiplo del TAP es

$$M = \frac{I_{fSEC}}{TAP} = \frac{55.86}{5} = 11.72$$

Elegimos para Bus G un relevador 51 con 12 ciclos, M de 11.72 y palanca de 1.



Capítulo 4 Protecciones



4.6 Coordinación de protecciones

La coordinación de protecciones consiste en el ordenamiento de los dispositivos de protección y el tiempo de disparo cuando ocurre una falla en el sistema eléctrico. La selección de protecciones debe ajustarse al nivel de falla que puede ocurrir en cada uno de los puntos de la red. El objetivo del ajuste de protecciones es eliminar lo más rápido posible la falla y aislar esa sección de la instalación eléctrica, protegiendo la propagación de la falla, así como los equipos instalados y las personas que operan el sistema eléctrico. Debiendo disparar la protección más cercana a la falla. En nuestro caso la carga instalada son motores por lo que alcanzan picos de corriente de arranque y en algunos casos de sobrecarga, por lo que la coordinación de protección debe tener un margen de operación seguro. En lo que respecta a tensión, estos fusibles deben ser seleccionados con base en la máxima tensión entre fases que se puede presentar en el sistema en donde se apliquen. La capacidad interruptora del fusible de potencia debe ser mayor siempre a la máxima disponible en el lugar de instalación. Estos fusibles están normalizados para capacidad de cortocircuito simétrico. En cuanto a su capacidad de corriente de trabajo nominal, deberán tomarse en consideración todos los aspectos indicados para los fusibles tipo distribución y las especificaciones que proporciona el fabricante a través de sus curvas de tiempo corriente. La escala del tiempo consta de cinco secciones de: 0.01 a 0.1, de 0.1 a 1.0, de 1.0 a 10, de 10 a 100 y de 100 a 1000 segundos. Las cinco secciones tienen idénticas subdivisiones y son de la misma longitud. La escala de la corriente en amperios consta de cuatro divisiones: de 1 a 10, de 10 a 100, de 100 a 1000 y de 1000 a 10000 A. Los amperios en la escala de corriente son amperios simétricos. La escala del tiempo empieza en 0.01 segundos, valor poco menor que un ciclo (0.0167 segundos). Las curvas características de fusión no empiezan en un tiempo igual a cero debido a que los fusibles actúan como respaldo de manera definitiva es decir el fusible realiza la interrupción total.



Capítulo 4 Protecciones



4.7 Criterio fusible relevador.

Instalaciones con transformadores de no más de 10 MVA donde se usarán fusibles de potencia.

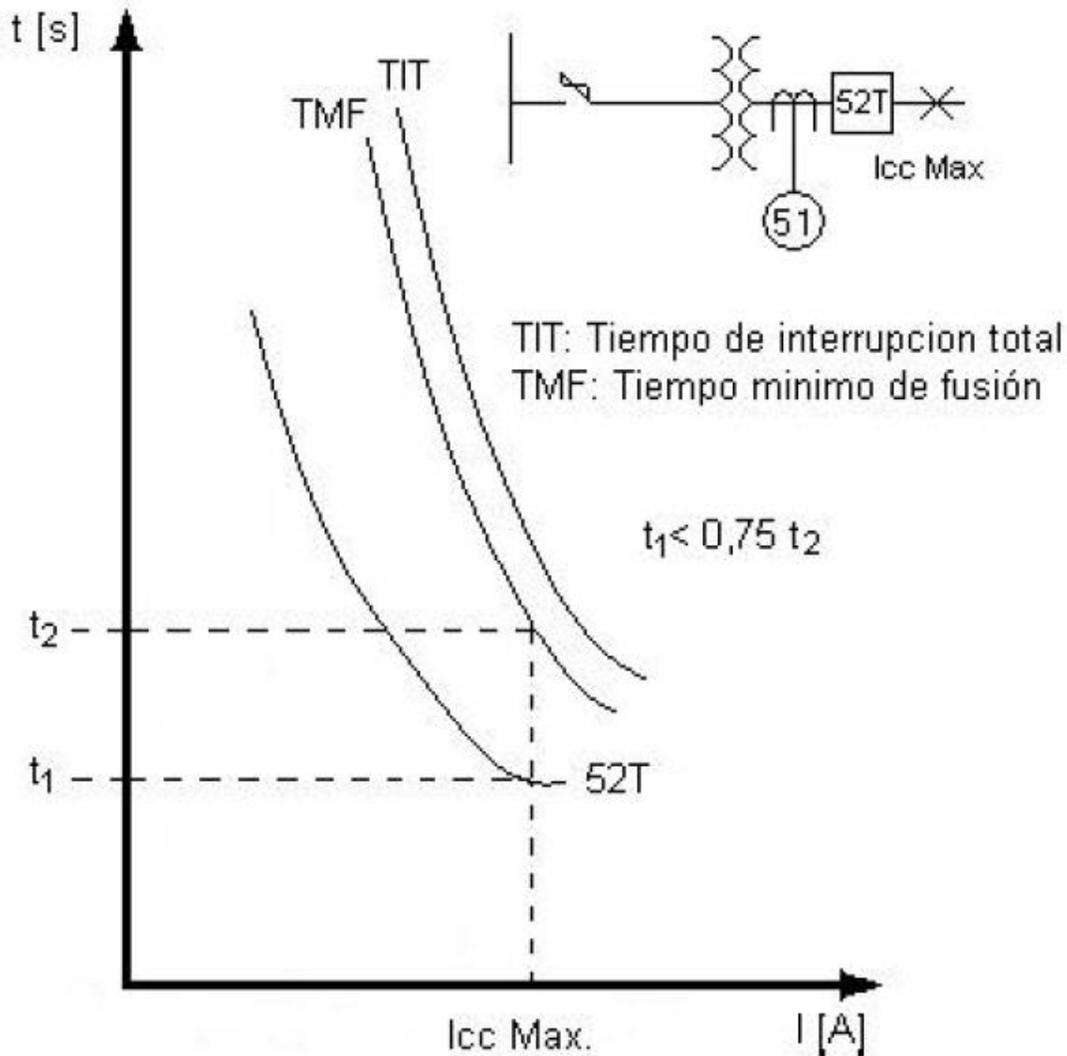


Figura 4.2 Relación fusible-relevador.

En este tipo de arreglo se ubica al relevador como protección de un circuito de distribución y al fusible como protección de un ramal sobre la línea de distribución. La condición entre tiempo de relevador y la curva de tiempo de interrupción total, debe ser de mínimo 0.3 segundos. Se toma en cuenta que la protección con fusible será del lado del alimentador, y considerando condiciones normales de operación como de sobrecarga y/o sobrecorriente. Se ajusta el relevador y si es



Capítulo 4 Protecciones



necesario se aplican factores que modifican la velocidad de respuesta del arreglo fusible relevador.

4.8 Criterio fusible-fusible.

Las protecciones más comunes en la red de distribución son los fusibles tipo T y K. Estos fusibles tienen una curva característica similar a los fusibles de baja tensión, sin embargo en los de alta tensión se presentan por cada dispositivo 2 curvas, una es el tiempo mínimo de fusión y la segunda es el tiempo de interrupción total de la falla. El tiempo mínimo de fusión relaciona la corriente con el tiempo mínimo al cual el fusible se funde y la curva de tiempo de interrupción total es el margen de tolerancia (en corriente) que soporta el fusible.

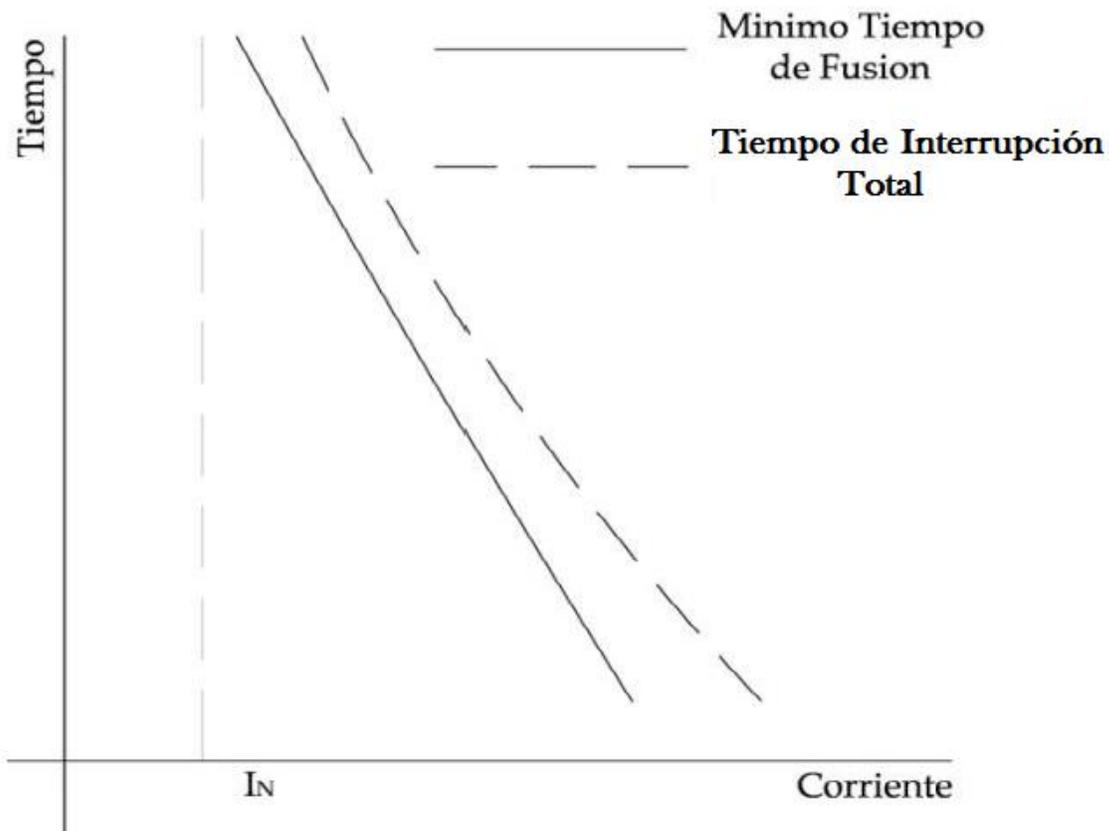


Figura 4.3 Curvas características de fusibles tipo K y T para alta y media tensión.

Se utiliza sobre una misma línea o red de distribución, El criterio establece que debe existir un tiempo de coordinación mínimo del 25% del tiempo de la curva característica tiempo mínimo de



Capítulo 4 Protecciones



fusión (TMF) de fusible de respaldo y la curva de tiempo de interrupción total (TIT) del fusible principal.

Expresión que permite estar entre el 30% y el 75% de coordinación de protecciones

$$\frac{t_1}{t_2} < 75\% \text{ Ec. (4.20)}$$

Donde

t_1 = tiempo máximo de abertura de fusible primario

t_2 = tiempo mínimo de fusión de fusible de respaldo

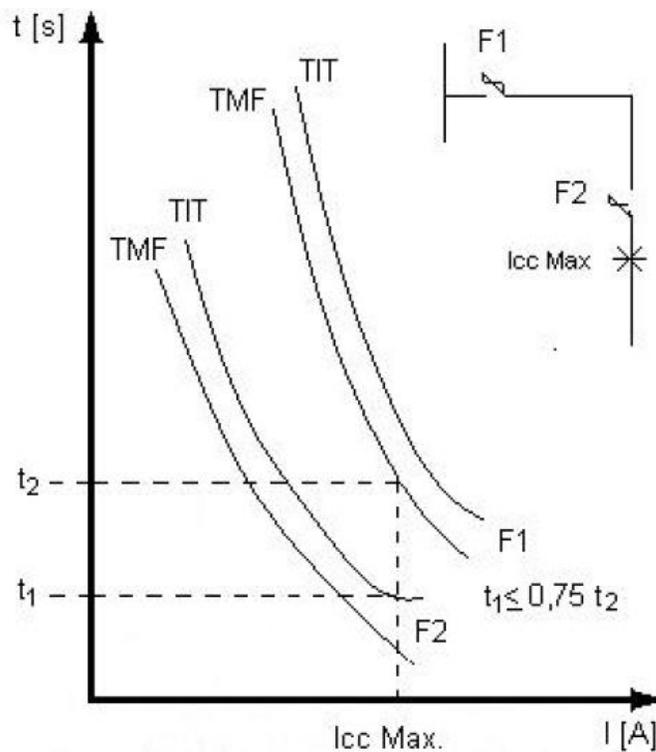


Figura 4.4 curvas de fusible principal y fusible de respaldo



Capítulo 4 Protecciones



4.9 Protecciones primarias con relevadores.

Protección de Bus B

Protección para el Bus B

$$I_{rel} = 1.3 \times I_N = 1.3 \times 836.7395 \text{ Amperes} = 1087.7613 \text{ Amperes}$$
$$RTC = 1200/5 = RTC = 240$$

Ajuste del relevador

$$I_{SEC} = \frac{I_{REL}}{RTC} = \frac{836.739}{240} = 3.4864 \text{ Amperes}$$

Corresponde TAP 3.5

La corriente de falla en el secundario es

$$I_{fSEC} = \frac{I_{CC}}{RTC} = \frac{5371.6655}{240} = 23.8819 \text{ Amperes}$$

El múltiplo del TAP es

$$M = \frac{I_{fSEC}}{TAP} = \frac{23.8819}{3.5} = 6.8$$

Elegimos para Bus B un relevador 51 con 54 ciclos con tiempo de 0.9 segundos, M de 6.8 y palanca de 3.

Protección para el Bus D

$$I_{rel} = 1.3 \times I_N = 1.3 \times 721.6878 \text{ Amperes} = 938.19418 \text{ Amperes}$$
$$RTC = 1000/5 = RTC = 200$$

Ajuste del relevador

$$I_{SEC} = \frac{I_{REL}}{RTC} = \frac{721.6878}{200} = 3.608 \text{ Amperes}$$

Corresponde TAP 4

La corriente de falla en el secundario es



Capítulo 4 Protecciones



$$I_{fSEC} = \frac{I_{CC}}{RTC} = \frac{12701.7058}{200} = 63.5085 \text{ Amperes}$$

El múltiplo del TAP es

$$M = \frac{I_{fSEC}}{TAP} = \frac{63.5085}{4} = 15.8772$$

Elegimos para Bus D un relevador 51 con 21.3 ciclos para un tiempo de 0.355 segundos, M de 15.8772 y palanca de 2.

Protección para el Bus G

$$I_{rel} = 1.3 \times I_N = 1.3 \times 555.1448 \text{ Amperes} = 721.6878 \text{ Amperes}$$
$$RTC = 800 / 5 = RTC = 160$$

Ajuste del relevador

$$I_{sEC} = \frac{I_{REL}}{RTC} = \frac{555.1448}{160} = 3.4696 \text{ Amperes}$$

Corresponde TAP 4

La corriente de falla en el secundario es

$$I_{fSEC} = \frac{I_{CC}}{RTC} = \frac{8937.8261}{160} = 55.86 \text{ Amperes}$$

El múltiplo del TAP es

$$M = \frac{I_{fSEC}}{TAP} = \frac{55.86}{4} = 13.965$$

Elegimos para Bus G un relevador 51 con 21.48 ciclos para un tiempo de 0.358 segundos, M de 13.965 y palanca de 2.



Capítulo 4 Protecciones



4.10 Protección de respaldo con relevadores

Coordinación de relevador 51B con relevador 51D.

Para realizar la coordinación tomamos el valor del corto circuito del Bus D y lo dividimos entre el RTC del relevador 51B, por lo que la falla de corriente en el secundario es

$$I_{fSEC} = \frac{12701.7058}{240} = 52.923 \text{ Amperes}$$

TAP del 51B es 1 igual a 3.5 y la palanca o dial es 3. El múltiplo es:

$$M = \frac{52.923}{3.5} = 15.1208$$

El tiempo de operación de este respaldo es de 0.51 segundos o 30.6 ciclos.

Coordinación de relevador 51B con relevador 51G.

Para realizar la coordinación tomamos el valor del corto circuito del Bus G y lo dividimos entre el RTC del relevador 51B, por lo que la falla de corriente en el secundario es

$$I_{fSEC} = \frac{8937.8261}{240} = 37.2409 \text{ Amperes}$$

TAP del 51B es 1 igual a 3.5 y la palanca o dial es 3. El múltiplo es:

$$M = \frac{37.24}{3.5} = 10.6402$$

El tiempo de operación de este respaldo es de 0.7 segundos o 42 ciclos.



Capítulo 4 Protecciones



DIAGRAMA DE PROTECCIONES PRIMARIAS Y RESPALDO

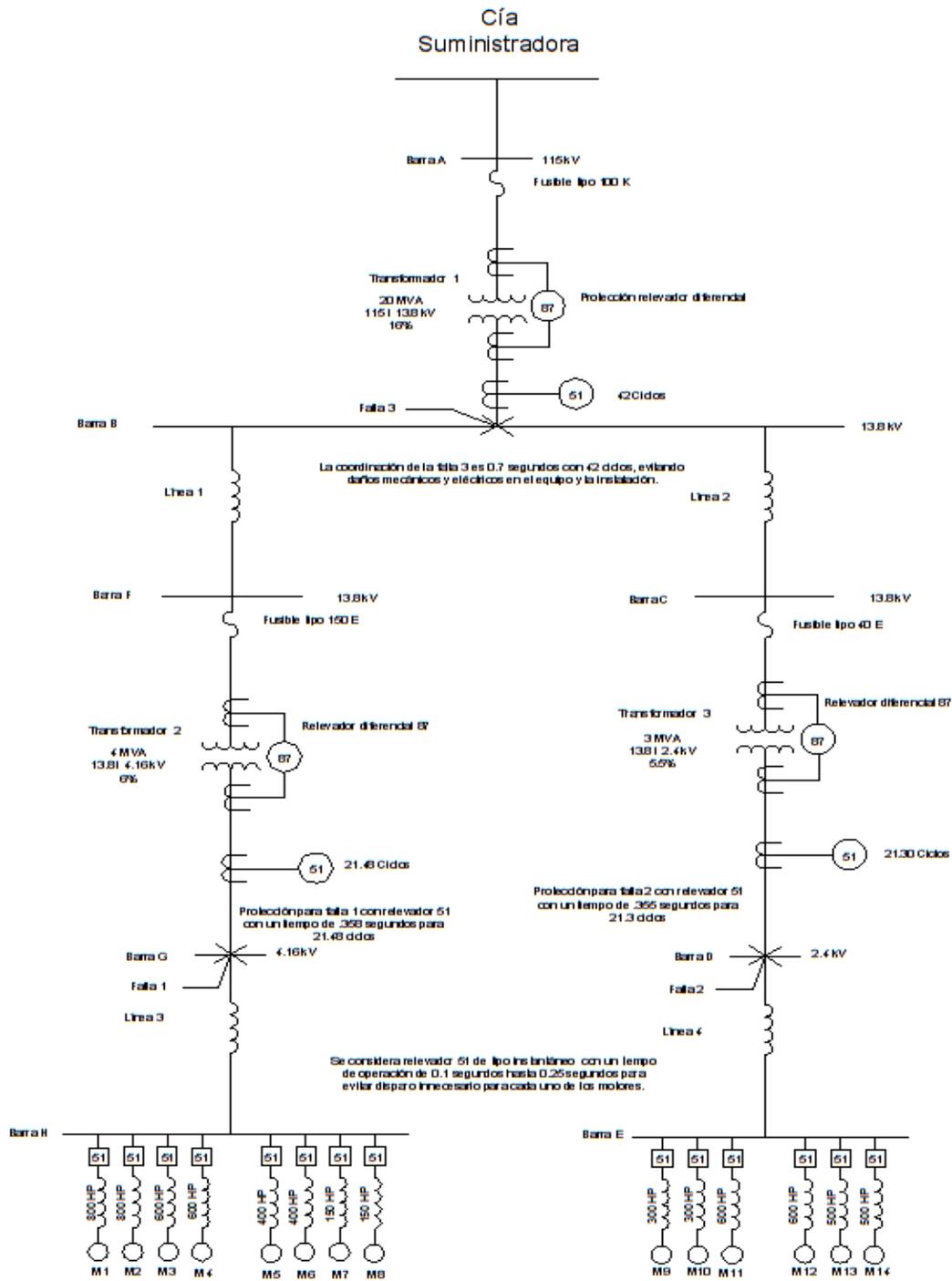


Figura 4.5 Tiempos de respuesta de las protecciones en las fallas indicadas.



Capítulo 4 Protecciones

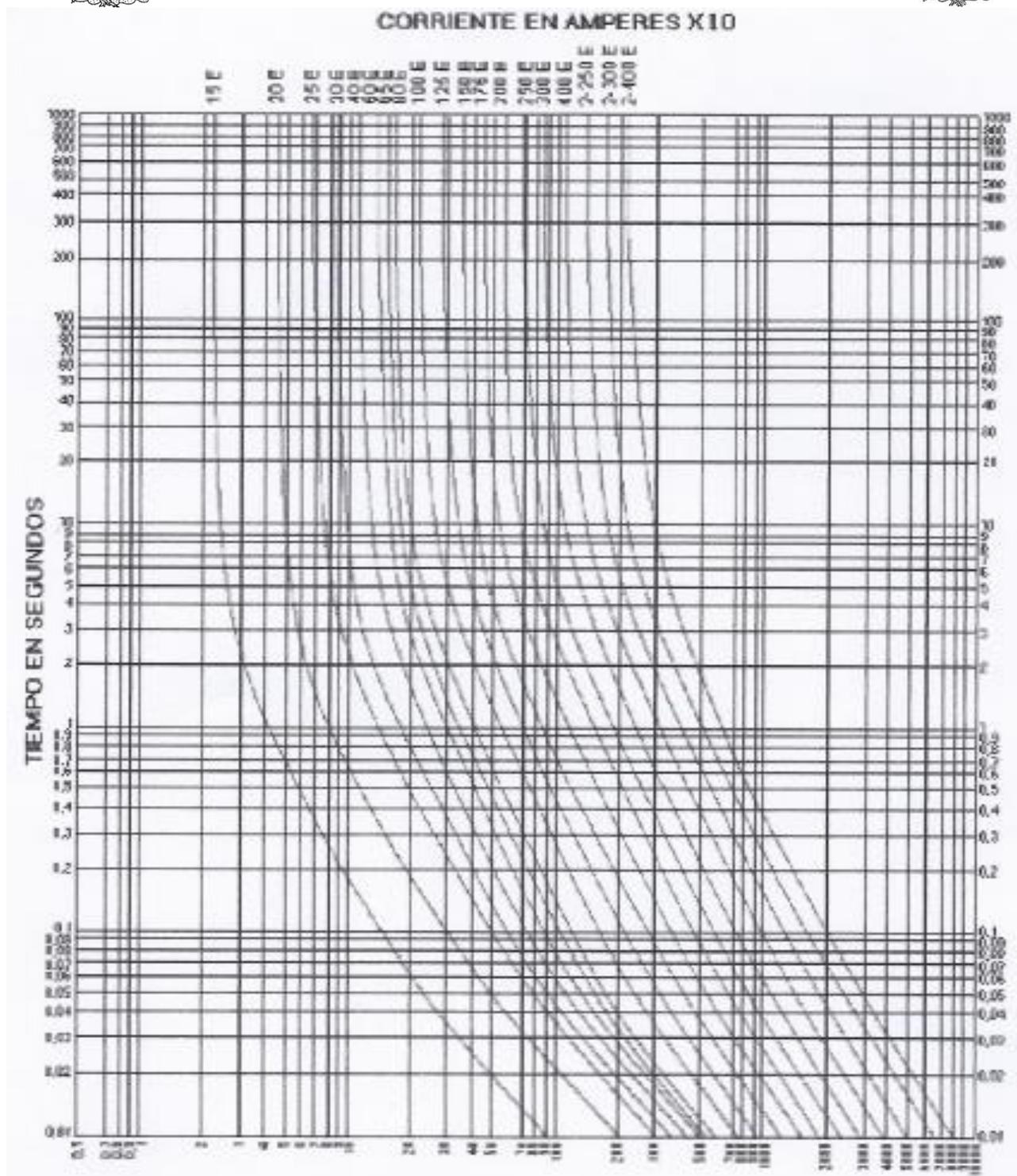


Figura 4.6 Curvas de los fusibles limitadores de corriente 15kV MT PROTELEC



Capítulo 4 Protecciones

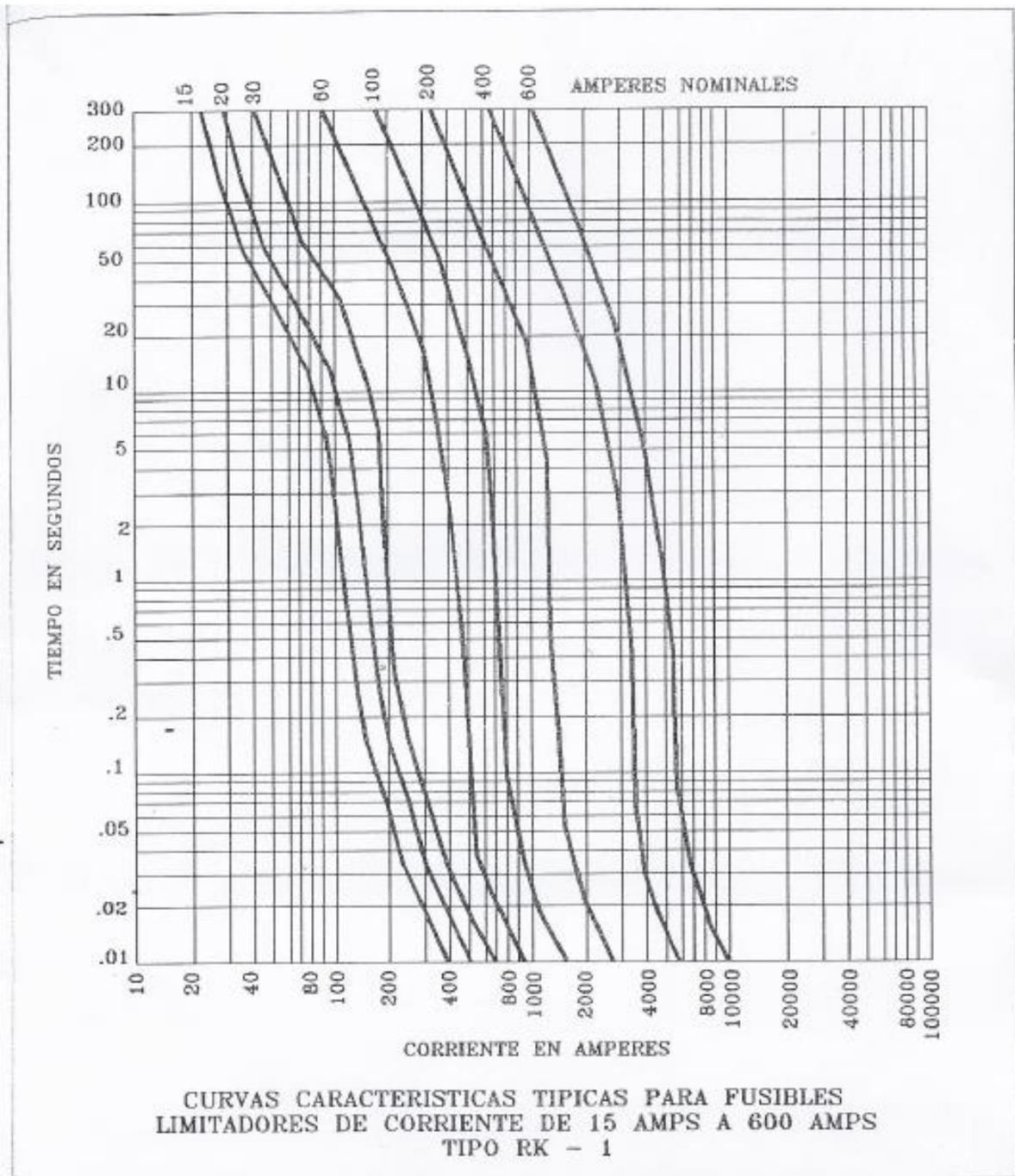


Figura 4.7 Curvas de fusible tipo RK



Conclusiones



- La instalación eléctrica cumple en general con estar protegida.
- Como consecuencia de la continuidad y calidad del servicio de energía eléctrica, garantiza la producción continua de asfalto.
- La condición de operación del sistema eléctrico está protegida así como cada uno de sus elementos y dispositivos, tanto como la seguridad de los operadores y técnicos de puesta en marcha y mantenimiento del sistema eléctrico.
- Con 42 ciclos máximo de retardo total hasta la fuente de la Compañía Suministradora; observando que la coordinación está contemplada con la filosofía de la protección primaria como primera defensa, que en caso de no actuar la protección de respaldo actúa como defensa definitiva, y así, evitar disparos innecesarios y operación satisfactoria.
- En este trabajo se utilizaron las normas vigentes de las instalaciones eléctricas. Es un proyecto que propone ser usado en repavimentación y pavimentación ya que es importante no sólo la fabricación y punto de entrega, sino también y de manera definitiva su aplicación en caliente en el suelo a asfaltar.



Índice de figuras

Capítulo 1 Conceptos básicos

Figura A Planta mezcladora de tambor tipo continua.....	4
Figura B Flujo de operación básica de una planta de dosificación.....	6
Figura C Presentación esquemática de una planta de asfalto.....	6
Figura 1.1 Conexión estrella de sistema trifásico a cuatro hilos.....	18
Figura 1.2 Representación de una conexión delta.....	19
Figura 1.3 Flujos mutuo y disperso en el núcleo de un transformador.....	23
Figura 1.4 Curva de magnetización del núcleo del transformador.....	25
Figura 1.5 Corriente de excitación de un transformador.....	26
Figura 1.6 Transformador real con carga conectada a su secundario.....	27
Figura 1.7 Modelo de un transformador real.....	28
Figura 1.8 Circuito modelo del rotor de un motor de inducción.....	33
Figura 1.9 Circuito modelo del rotor con los efectos de la frecuencia (deslizamiento).....	33
Figura 1.10 Circuito equivalente por fase de un motor de inducción.....	34

Capítulo 2 Instalación eléctrica de planta de asfalto

Figura 2.1 Representación en bloques de instalación eléctrica de media tensión.....	37
Figura 2.2 Láminas fusibles.....	39
Figura 2.3 Fusible tipo SMD-20.....	41
Figura 2.4 Representación de un transformador de instrumento.....	41
Figura 2.5 Representación de un relevador electromecánico.....	44
Figura 2.6 Conexión de TC y TP en una barra.....	45
Figura 2.7 Curvas de múltiplos de corriente contra tiempo en segundos.....	47
Figura 2.8 Curvas de relevadores de tiempo inverso.....	48



Índice de figuras



Figura 2.9 Representación de elemento diferencial.....	49
Figura 2.10 Representación de falla externa con respecto del elemento a proteger.....	49
Figura 2.11 Falla en zona protegida.....	50
Figura 2.12 Panel frontal de relevador microprocesado SEL 387.....	51
Figura 2.13 Panel posterior del relevador SEL 387.....	51
Figura 2.14 Panel frontal de señalización luminosa.....	52
Figura 2.15 Descripción de elemento que se alarma.....	53
Figura 2.16 Diagrama unifilar de la instalación eléctrica.....	59

Capítulo 3 Cálculo de corto circuito

Figura 3.1 Representación de componentes simétricas.....	64
Figura 3.2 Diagrama de impedancias de secuencia positiva y negativa.....	70
Figura 3.3 Diagrama de impedancias de secuencia cero.....	71

Capítulo 4 Protecciones

Figura 4.1 Curva típica de tiempo corriente de motor en operación.....	90
Figura 4.2 Relación fusible relevador.....	109
Figura 4.3 Curvas características de fusibles tipo K y T para alta y media tensión.....	110
Figura 4.4 Curvas de fusible principal y fusible de respaldo.....	111
Figura 4.5 Tiempos de respuesta de las protecciones en las fallas indicadas.....	115
Figura 4.6 Curvas de fusibles limitadores hasta 15 kV PROTELEC.....	116
Figura 4.7 Curvas de fusible tipo RK de hasta 600 amperes nominales.....	117



Índice de tablas



Capítulo 2 Instalación eléctrica de planta de asfalto

Tabla 2.1 Capacidad interruptiva SMD-20.....	40
Tabla 2.2 Magnetización de transformadores.....	54
Tabla 2.3 Factores de enfriamiento.....	54
Tabla 2.4 Letras de código de rotor bloqueado.....	55
Tabla 2.5 Valores de reactancia para el cálculo de interrupción y para el primer ciclo.....	56
Tabla 2.6 Reactancias típicas de máquinas trifásicas PU.....	56
Tabla 2.7 Capacidad de conducción de corriente para conductores de media tensión.....	57
Tabla 2.8 Impedancia de secuencia de conductores en Ω/ pies	58

Capítulo 3 Cálculo de corto circuito

Tabla 3.1 Valores en PU.....	69
Tabla 3.2 Corto circuito en los Bus.....	78

Capítulo 4 Protecciones

Tabla 4.1 Categoría de transformadores según kVA nominales.....	79
Tabla 4.2 Puntos de curva ANSI para transformadores.....	79
Tabla 4.3 Impedancia mínima por unidad con base en los kVA del transformador.....	80
Tabla 4.4 Factor ANSI según la conexión del transformador.....	80



Bibliografía

Viqueira, J. Redes eléctricas primera parte Tomo I, UNAM, 1970.

Viqueira, J. Redes eléctricas segunda parte Tomo II, UNAM, 1970.

Mason, R. El arte y la ciencia de la protección con relevadores, John Wiley and Sons.
1956.

Chapman, S. Máquinas eléctricas, 3ra. Ed., Mc Graw Hill, 2000.

Enríquez, G. El ABC de las instalaciones eléctricas industriales, Limusa, 2009.

Enríquez, G. Elementos de protección de sistemas eléctricos, Limusa, 2008.

Enríquez, G. Fundamentos de Protección de sistemas eléctricos, Limusa, 1998.

Norma oficial mexicana, NOM 001 Sede 2005, dirección general de distribución y abastecimiento de energía eléctrica y recursos nucleares. Impreso por talleres Luciano Estevez Tapia 2006.

Cedeño, U y Lorenzo Bautista, R. Manual de prácticas para el laboratorio de sistemas eléctricos de potencia II. Parte II: Análisis de corto circuito. UNAM.



Agradecimientos



A mi familia por su apoyo, cariño y consejos, que me acompañaron en esta tarea.

A mis maestros, gracias a todos y cada uno de ellos por su paciencia y brindarme los conocimientos para la realización de este trabajo.

A mi director de tesis Ing. Jorge Armando Pluma Rosales por toda su ayuda incondicional y creer en este proyecto.

A la UNAM por permitir mi desarrollo profesional.