

621.31
RAM
p.2



ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL

FACULTAD DE INGENIERÍA EN ELECTRICIDAD Y COMPUTACIÓN

Protección de Motores de Media Tensión Mediante Relés Utilizando

Microprocesadores



TESIS DE GRADO

Previa a la Obtención del Título de
INGENIERO EN ELECTRICIDAD
Especialidad: POTENCIA



Presentada por:

IVÁN REINALDO RAMÍREZ DELGADO

Guayaquil – Ecuador
2002

AGRADECIMIENTO

Al Ing. GUSTAVO BERMÚDEZ F.,

Director de Tesis, por su ayuda y
colaboración para la realización de
este Trabajo y,

A la empresa ELECTROGUAYAS S.A.

Central Termoeléctrica Trinitaria,

Por haberme permitido sus instalaciones
y facilitado información al respecto.

DEDICATORIA

A la Memoria de mi Padre:

Señor Doctor Nery Ramírez Jácome.

A mi Madre:

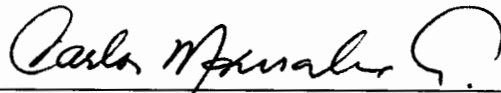
Señora Lcda. Margarita Delgado Mariscal.

A mi Esposa Gloria y a mis Hijos:

Iván Andrés y Miguel Ángel.

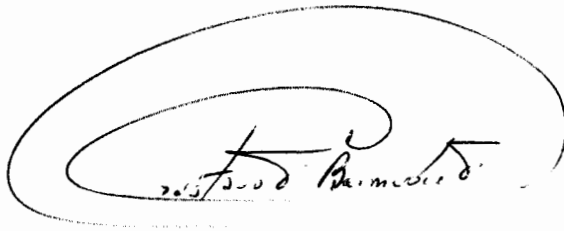


TRIBUNAL DE GRADO



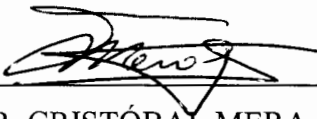
ING. CARLOS MONSALVE A.

Presidente del Tribunal



ING. GUSTAVO BERMÚDEZ F.

Director de Tesis



DR. CRISTÓBAL MERA G.

Miembro Principal



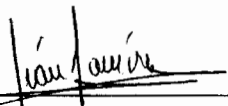
ING. ALBERTO HANZE B.

Miembro Principal

DECLARACIÓN EXPRESA

“La responsabilidad por los hechos, ideas y doctrinas expuestos en esta Tesis, me corresponde exclusivamente; y el patrimonio intelectual de la misma, a la ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL”.

(Reglamento de Exámenes y Títulos Profesionales de la ESPOL).



IVÁN R. RAMÍREZ DELGADO

RESUMEN

La presente Tesis trata de la protección de motores de mediana tensión mediante relés utilizando microprocesadores y de los ajustes necesarios que deben ser realizados a los motores de los equipos principales de una central de generación termoeléctrica y utilizando su aplicación a la Central de Generación Termoeléctrica “Trinitaria”.

En el capítulo uno se mencionan algunos aspectos generales de los motores, causa de anomalías en éstos; así como una descripción del relé analizando sus componentes elementales de protección, la manera de ajuste de los relés, la forma como operan y una descripción de las características de cada una de las unidades que conforman el relé.

En el capítulo dos se exponen las condiciones bajo las que se debe proteger a un motor, los aspectos generales influyentes para las diferentes condiciones. Se incluye la curva térmica del relé con la cual se compara la curva de calentamiento del motor para una constante de tiempo dada. Este capítulo cuenta con dos ejemplos elementales a manera de obtener los parámetros que servirán para ingresar valores en los ajustes de las protecciones, además describe los criterios generales utilizados en los ajustes de cada una de las unidades que componen el relé.

En el capítulo tres se presentan las características técnicas como capacidades, rangos de ajustes de las diferentes unidades del relé, temperatura permisible de trabajo, capacidades de los contactos, presión, temperatura, humedad, etc.; así como también

los elementos con los que se puede operar y controlar al relé como son micro-interruptores, pulsadores, led's de señalización, etc.

En el capítulo cuatro se explica el manejo de las principales opciones que presenta el relé como son secuencia de lecturas y secuencia de ajustes. Se detalla también las pruebas de rigor, así como también el mantenimiento al que debe estar sometido el relé a lo largo de toda su vida útil, por último en este capítulo se describe cómo identificar los errores y posibles reparaciones del relé dependiendo del grado de falla.

El capítulo cinco se refiere a la aplicación de los relés, los cuales y con la utilización de ciertos criterios descritos se procede a sus correspondientes ajustes; se describen las características elementales de las unidades que conforman un relé, se expone de una manera muy somera las funciones que realizan los motores a proteger. Se presenta todo el cálculo para el ajuste de las protecciones de cada una de las unidades de los relés y un cuadro con el resumen de los ajustes para los diferentes equipos.

En los apéndices se presenta una fotografía que presenta el aspecto de construcción y forma del relé. También se despliega cada uno de los numerales donde se debe ingresar los valores de ajustes de las unidades que conforman los relés aquí descritos y los datos característicos de los motores, los mismos que sirven para realizar los cálculos de los ajustes.

ÍNDICE GENERAL

	Pág.
RESUMEN.....	vi
ÍNDICE GENERAL.....	viii
ÍNDICE DE FIGURAS.....	xii
SIMBOLOGÍA.....	xiii
INTRODUCCIÓN.....	15
CAPÍTULO 1: GENERALIDADES.....	16
1.1. Unidad de configuración del relé.....	19
1.2. Unidad de protección térmica.....	20
1.3. Unidad de protección de secuencia positiva.....	26
1.4. Unidad de protección de secuencia negativa.....	27
1.5. Unidad de protección de secuencia cero.....	31
1.6. Unidad de protección de rotor bloqueado y arranque excesivamente largo.....	32
1.7. Unidad de protección de mínima intensidad.....	33
1.8. Unidad de control del número de arranques del motor.....	34
CAPÍTULO 2: UTILIZACIÓN DEL RELÉ.....	37
2.1. Condiciones para las que se requiere proteger un motor.....	37
2.2. Características de los motores de inducción.....	38
2.3. Características en el arranque del motor de inducción.....	38
2.4. Diagrama del circuito equivalente del motor de inducción.....	39

	Pág.
2.5. El motor de inducción en servicio.....	41
2.6. Sobrecarga del motor de inducción.....	44
2.7. Curvas térmicas del relé.....	44
2.8. Rango de aplicación del relé de protección.....	48
2.9. Criterios de aplicación de la protección de sobrecargas.....	49
2.10. Protección contra fallas entre fases.....	58
2.11. Protección contra fallas a tierra.....	58
2.12. Protección contra rotor bloqueado.....	59
2.13. Protección contra arranque en monofásico.....	60
2.14. Protección de motores contra trabajo de bombas en vacío.....	60
2.15. Protección contra arranques demasiado frecuentes.....	61
CAPÍTULO 3: ESPECIFICACIONES TÉCNICAS DEL RELÉ.....	62
3.1. Circuito de intensidad.....	62
3.2. Rangos de ajustes.....	63
3.3. Frecuencia.....	67
3.4. Contactos de salida.....	67
3.5. Contactos de alarma.....	67
3.6. Precisión.....	67
3.7. Rangos de temperatura.....	68
3.8. Humedad ambiente.....	68

	Pág.
3.9. Aislamiento.....	68
3.10. Pruebas de impulso.....	69
3.11. Alimentación.....	69
3.12. Peso.....	69
3.13. Aspectos de construcción.....	69
3.13.1. Uniones eléctricas y conexiones internas.....	70
3.13.2. Identificación.....	70
3.13.3. Dispositivos frontales.....	71
3.13.4. Señalizaciones externas.....	73
CAPÍTULO 4: MANEJO, MANTENIMIENTO Y PRUEBAS DEL RELÉ.....	74
4.1. Manejo del relé digital.....	75
4.2. Inspección visual.....	76
4.3. Consideraciones generales sobre la red de alimentación.....	76
4.4. Pruebas y mantenimiento del relé digital.....	77
4.5. Secuencia de lecturas.....	82
4.6. Secuencia de ajustes.....	90
4.7. Puesta a cero de imagen térmica.....	94
4.8. Reset del relé.....	94
CAPÍTULO 5: APLICACIÓN DE LOS RELÉS.....	97
5.1. Criterios utilizados en el ajuste de las protecciones.....	97



	Pág.
5.2. Características de los elementos de protección del relé.....	99
5.3. Funciones de los motores de mediana tensión de la Central Termoeléctrica Trinitaria.....	101
5.4. Configuración de los relés para protección de los motores de las bombas de agua de alimentación “A” y “B”	103
5.5. Configuración de los relés para protección de los motores de las bombas de agua de circulación “A” y “B”	110
5.6. Configuración de los relés para protección de los motores de las bombas de agua de extracción de condensado “A” y “B”	118
5.7. Configuración de los relés para protección de los motores de los ventiladores de tiro forzado “A” y “B”	126
5.8. Configuración del relé para protección del motor del ventilador de recirculación de gases.....	132
5.9. Resumen de ajustes de los relés de protección de los motores de mediana tensión de la Central Termoeléctrica Trinitaria.....	140
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	141
APÉNDICES.....	145
APÉNDICE A: Presentación del relé.....	146
APÉNDICE B: Valores a ingresar en los diferentes ajustes de las unidades del relé.....	148
APÉNDICE C: Diagrama trifilar y de protecciones típico de los motores de mediana tensión de la Central Termoeléctrica Trinitaria.....	151
APÉNDICE D: Tablas de datos característicos de los motores y máquinas a proteger.....	153
BIBLIOGRAFÍA.....	159

ÍNDICE DE FIGURAS

		Pág.
Figura 1-2-1	Curva térmica del relé para una constante de tiempo de 3 minutos.....	24
Figura 1-4-1	Familia de curvas de tiempo inverso de la unidad de secuencia negativa.....	30
Figura 2-4-1	Circuito equivalente del motor de inducción.....	40
Figura 2-5-1	Curva de constante de tiempo del calentamiento del motor de inducción.....	43
Figura 2-7-1	Curvas de diferentes dial del relé para una constante de tiempo de 3 minutos.....	47
Figura 2-9-1	Zona de disparo del relé.....	50
Figura 2-9-2	Zona de disparo – ejemplo 1.....	54
Figura 2-9-3	Zona de disparo – ejemplo 2.....	57
Figura 3-13-2-1	Placa frontal del relé.....	71

SIMBOLOGÍA

Bm:	Susceptancia de magnetización en circuito equivalente del motor
$\cos\varphi$:	Factor de potencia del motor de inducción
FS:	Factor de sobrecarga del motor
F0:	Estado del relé mostrado en pantalla
F1:	Imagen térmica en tanto por ciento del valor de disparo del relé mostrado en pantalla
F2:	Intensidad de secuencia positiva mostrado en pantalla
F3:	Intensidad de secuencia negativa mostrado en pantalla
F4:	Intensidad de secuencia cero mostrado en pantalla
F5:	Código de la unidad del relé que ha disparado
F6:	Intensidad de secuencia positiva que circulaba por el motor en el momento del disparo
F7:	Intensidad de secuencia negativa que circulaba por el motor en el momento del disparo
F8:	Intensidad de secuencia cero que circulaba por el motor en el momento del disparo
Gm:	Conductancia de magnetización del circuito equivalente del motor de inducción
I:	Intensidad circulante por el motor para la obtención de la curva de calentamiento
I_{ajus} :	Intensidad de ajuste del relé para protección de secuencia cero
$I_{ajus(pri)}$:	Intensidad de ajuste del relé para protección de secuencia cero referido al primario del T.I.
I_{arr} :	Intensidad de arranque del motor
I_{arrR} :	Intensidad de arranque del motor detectada por el relé
I_{arrt} :	Intensidad de arranque para el cálculo de τ_1
$I_{ccmín}$:	Intensidad de cortocircuito mínimo detectada en los transformadores de intensidad de fases
I_e :	Intensidad equivalente de estabilización del motor ($=I_{me}/I_s$)
I_{eq} :	Intensidad equivalente que entra al relé dadas I_1 e I_2
\bar{I}_{int} :	Intensidad de entrada de fase en circuito equivalente del motor de inducción
I_M :	Intensidad nominal del motor
I_m :	Intensidad nominal del motor detectada por el relé ($I_m=I_{eq}$)
I_{me} :	Intensidad a la que se estabiliza la temperatura del motor
I_{mg} :	Corriente de magnetización en circuito equivalente del motor de inducción
I_N :	Intensidad nominal del motor para la obtención de su curva de calentamiento
I_n :	Intensidad nominal del relé para protección de fases
I_{nGRN} :	Intensidad nominal del relé para protección de secuencia cero
I_{RB} :	Intensidad de rotor bloqueado del motor
I_s :	Intensidad de toma para ajustes del relé para protección de fases
I_{sob} :	Intensidad de sobrecarga admisible del motor detectada por el relé
I_{PVB} :	Intensidad de protección contra vacío de bombas
I_1 :	Intensidad de secuencia positiva que circula por el relé
I_2 :	Intensidad de secuencia negativa que circula por el relé
I_0 :	Intensidad de secuencia cero que circula por el relé
K:	Valor para el cálculo de la constante de tiempo de calentamiento del motor de inducción
K_1 :	Constante que sobre valora a la componente de secuencia negativa en el cálculo de I_{eq}
$R_{r(s)}$:	Resistencia del rotor referida al estator dependiente del deslizamiento en circuito equivalente
R_s :	Resistencia del estator en circuito equivalente del motor de inducción

R_{Ti} :	Relación de transformación del transformador de intensidad de fases
$r_{\bar{u}}$:	Relación de transformación del transformador de intensidad por neutro
Sl:	Deslizamiento en circuito equivalente del motor de inducción
T.I.	Transformador de intensidad
t:	Tiempo en el que circula corriente por motor para obtener su curva de calentamiento
t_d :	Tiempo de disparo del relé debido a calentamiento del motor
t_{RB} :	Tiempo máximo admisible de rotor bloqueado del motor de inducción
Vac:	Voltaje de corriente alterna
Vcc:	Voltaje de corriente continua
\bar{V}_{int} :	Voltaje en terminales en circuito equivalente del motor de inducción
X_r :	Reactancia de dispersión del rotor referida al estator en circ. equiv. del motor de inducción
X_s :	Reactancia de dispersión del estator en circuito equivalente del motor de inducción
Y_m :	Admitancia de magnetización en circuito equivalente del motor de inducción
Z_r :	Impedancia del rotor en circuito equivalente del motor de inducción
η :	Eficiencia del motor de inducción
θ :	Incremento de temperatura dada una corriente circulante por el motor
θ_i :	Temperatura intermedia en la curva de calentamiento del motor de inducción
θ_N :	Temperatura nominal en motor si intensidad que circula por motor es I_M
θ_0 :	Temperatura inicial en la curva de calentamiento del motor de inducción
θ_∞ :	Temperatura final en la curva de calentamiento del motor de inducción
τ :	Constante de tiempo dada curva de calentamiento del motor de inducción
τ_1 :	Constante de tiempo de calentamiento del motor detectada por el relé
τ_2 :	Constante de tiempo de enfriamiento del motor detectada por el relé

INTRODUCCIÓN

Dada la gran importancia que representa el funcionamiento de los motores eléctricos principales para la confiabilidad de una central de generación termoeléctrica, las protecciones eléctricas juegan un papel preponderante; además de la seguridad para la preservación de éstos.

La incorporación de los relés de estado sólido, en los cuales la medición o comparación de las cantidades eléctricas se la realiza por medio de una red estática diseñada para dar una señal de salida cuando se pasa a una condición crítica, ha superado a los sistemas de protección convencionales, por otro lado la confiabilidad siempre importante que brindan los relés estáticos junto con la reducción de los tiempos de operación ha dejado una brecha con pocas posibilidades de ser alcanzada por los relés electromecánicos, todo esto hace importante el conocer más acerca de los relevadores estáticos; además los relevadores estáticos llegan a lograr un rendimiento tan alto que pueden resultar despreciables las desviaciones prácticas con respecto a lo ideal.

En la presente tesis se trata la descripción, manejo, ajustes, operación y mantenimiento de los relés de protección marca General Electric–USA modelo MMC-1001D19G01C de los motores de mediana tensión (4160 voltios) con aplicación a la Central Termoeléctrica Trinitaria de propiedad de la empresa de generación de energía eléctrica ELECTROGUAYAS S.A., ubicada en la ciudad de Guayaquil-Ecuador.

CAPÍTULO 1

GENERALIDADES

Antes de proceder a la elección de la protección eléctrica adecuada para un motor, deben conocerse las intensidades y tiempos en condiciones de arranque y rotor bloqueado, así como el comportamiento térmico de la máquina en condiciones de equilibrio y desequilibrio en las tensiones de alimentación; adicionalmente se menciona a los relés electromecánicos y de estado sólido como clasificación general.

Intensidades anormales de funcionamiento del motor

Interesa detectar en un motor las sobre intensidades a que puede estar sometido y que de mantenerse pueden llegar a destruir el motor; estas condiciones anormales se traducen en el hecho de que el motor absorbe una corriente superior a la nominal.

Una solución adecuada para proteger al motor de esta condición es proporcionarle a éste una protección de sobrecarga térmica que limite el efecto de sobre temperatura al que pueda verse sometido.

Bloqueo del rotor

Un motor puede bloquearse y no poder arrancar debido a una carga excesiva, o en pleno funcionamiento por múltiples causas como por ejemplo daños en los cojinetes con lo que el motor absorbería una corriente elevada que equivale a la condición de

rotor bloqueado por lo cual el relé debe actuar para desconectar al motor inmediatamente.

No sólo por la magnitud de la corriente se puede distinguir el trabamiento del motor, sino también, por que la corriente persista durante un tiempo mayor al normal de arranque.

Calentamiento por desequilibrio en las tensiones de alimentación

Debido a desequilibrios en las tensiones de alimentación, aparece en los devanados del motor una componente de secuencia negativa en las corrientes lo que da como resultado un aumento de temperatura en los devanados del mismo.

Clasificación de los relés de protección

En términos generales los relés de protección se clasifican actualmente en: a) relés electromagnéticos y b) relés estáticos. Los relés electromagnéticos son los que para su funcionamiento utilizan el flujo magnético o la inducción para producir la fuerza que mediante las cantidades eléctricas operantes se deriva en el funcionamiento del relé. Los relés estáticos son aquellos en los que la medición o la comparación de las cantidades eléctricas se hace por medio de una red estática diseñada para dar una salida electrónica a un contacto de disparo.

Los relés de protección de los motores eléctricos utilizados para los propósitos de la Central de Generación Trinitaria son de tipo estáticos-modulares basados en

microprocesadores para su funcionalidad y son fabricados por la Empresa General Electric.

Principales tipos de fallas en los motores eléctricos

Las fallas en los motores pueden producirse por:

Causas externas: desequilibrio en las tensiones de alimentación, baja tensión, sobrecargas, arranques de manera monofásica, defectos por mal acoplamiento con la carga, etc.

Causas internas: falla en los cojinetes, fallas eléctricas internas como cortocircuitos entre espiras, fallas entre fases, fallas de fase a tierras, mal apriete de terminales, etc.

Descripción del relé

El relé tipo electrónico de estado sólido el cual su presentación se puede apreciar en el apéndice A, contiene una unidad de configuración de la frecuencia de la red y siete unidades para la protección de los motores, estas son:

- Unidad de configuración de la frecuencia de la red
- Unidad de protección térmica
- Unidad de protección contra fallas entre fases
- Unidad de protección de secuencia negativa

- Unidad de protección contra fallas a tierra
- Unidad de protección contra rotor bloqueado
- Unidad de protección contra mínima corriente
- Unidad de protección contra el número de arranques en un tiempo determinado.

Cada una de estas unidades tiene asignado un número en el relé del 0 al 7 correspondientemente al orden anterior, y a su vez cada unidad contiene varios numerales como subfunciones en los cuales habrá que ingresar los valores para el correspondiente ajuste del relé (la manera de realizar el ajuste de cada unidad del relé se detalla en la sección 4.6.), los valores a ingresar dependen de los parámetros y condiciones de trabajo del motor.

En el apéndice B se indica los valores de ajustes en las diferentes subfunciones de cada unidad de los relés.

La descripción detallada de las unidades y de cada uno de los ajustes del relé se describe en las secciones a continuación.

1.1. Unidad de configuración del relé

El relé está programado para trabajar con una frecuencia de 50 ó 60 Hz. Esta unidad permite seleccionar la frecuencia de operación conveniente.

Ajuste:

La unidad de configuración de la frecuencia de la red tiene asignado el número 0 (cero), su ajuste es:

0-1: Frecuencia de operación

Rango 50 – 60 Hz.

Necesariamente habrá que seleccionar la frecuencia de la red con la que trabajará el relé, para este caso se selecciona 60 Hz.

1.2. Unidad de protección térmica

El sistema de protección del relé proporciona protección térmica a partir de las intensidades de línea. La intensidad nominal del relé (I_n) se multiplica por el factor seleccionado por el usuario mediante los micro interruptores frontales para hallar la intensidad de toma (I_s). Las intensidades de secuencia positiva y negativa están dadas en múltiplos de I_s . Para ver la forma de selección de toma I_s ver la sección 3.13.3.

Descripción de la protección por imagen térmica

La unidad de imagen térmica mide las corrientes de dos de las tres fases del motor (como se observa en el diagrama trifilar y de protecciones del motor que se muestra en el apéndice C) ya que el relé utiliza solamente dos transformadores de corriente para la protección de imagen térmica y también para las otras unidades. Los dos

transformadores de línea del circuito protegido suministran las corrientes que van a alimentar a los transformadores internos del relé, los cuales reducen las intensidades a niveles adecuados. Estas intensidades son digitalizadas mediante un convertidor analógico – digital; todo el proceso posterior se realiza sobre los valores digitalizados en la electrónica interior del relé.

Un algoritmo calcula continuamente los valores de los componentes de secuencia positiva y negativa I_1 e I_2 . Posteriormente estos valores se combinan produciendo un efecto equivalente a:

$$I_{eq} = \sqrt{I_1^2 + K_1 I_2^2} \quad (1.1)$$



Donde K_1 es una constante que sobre valora el efecto de la componente I_2 de secuencia negativa y la selección puede ser con los valores: 1,2,3,4,5 ò 6, el valor de K_1 que se escoja dependerá de que tanto se quiere proteger al motor por el efecto de la secuencia negativa lo cual depende básicamente del desequilibrio de las tensiones de alimentación; se ha llegado a comprobar que un desequilibrio en la tensión de alimentación a un motor multiplicado por el cociente entre la corriente de arranque y la corriente normal de trabajo es directamente proporcional al desequilibrio en la corriente de alimentación al motor, por ejemplo si la corriente de arranque de un motor es 6 veces la de trabajo normal, un desequilibrio de 5% en la tensión de alimentación dará aproximadamente un 30% de desequilibrio en la corriente.

De acuerdo con lo anterior se escogerá K_1 de la siguiente manera:

desequilibrio en tensión de alimentación	Valor de K_f a seleccionar
1%	1
2%	2
3%	3
4%	4
5%	5
6%	6

Se incluye la secuencia negativa en la fórmula anterior por seguridad del motor ya que con I_2 en la fórmula se protege al motor de los efectos producidos por las corrientes desequilibradas, originadas por apertura de una fase, desequilibrio de fase o inversión de fases. Si las corrientes de líneas no están equilibradas utilizando las componentes simétricas se puede comprobar que se genera un flujo que gira con una velocidad sincrónica pero en sentido contrario al normal, este flujo produce en el rotor un calentamiento suplementario que se trasmite al estator produciendo el efecto de una sobrecarga de corta o larga duración.

La unidad de imagen térmica protege adicionalmente contra los arranques demasiados frecuentes (los cuales también aportan al calentamiento del motor), puesto que una vez que se ha producido un disparo del relé la salida de disparo permanece activa hasta que la temperatura disminuye por debajo del 80% del límite de disparo; esta temperatura es manejada en el relé por imagen térmica.

Modo de operación

La intensidad equivalente I_{eq} citada anteriormente es procesada mediante un algoritmo de imagen térmica para hallar la temperatura equivalente en cada instante.

Cuando la temperatura alcanza un valor límite se produce la actuación del relé y una indicación mediante un led (light emitting diode - diodo emisor de luz) color rojo de disparo, lo cual se puede ver en la parte frontal del relé.

El relé muestra constantemente en su pantalla el tanto por ciento del valor del disparo debido a la protección por imagen térmica, esta misma lectura expresa en tanto por ciento el límite de la temperatura a la que se estabilizaría el motor si se le aplicara una corriente trifásica simétrica igual al ajuste de la toma I_s . En la sección 4.1. se explicará cómo acceder a ésta y otras lecturas que brinda el relé.

La figura 1-2-1 muestra el tiempo de operación en función de la intensidad térmica equivalente de la curva de imagen térmica para una constante de tiempo $\tau = 3$ min. considerando que el motor arranca desde el estado frío.

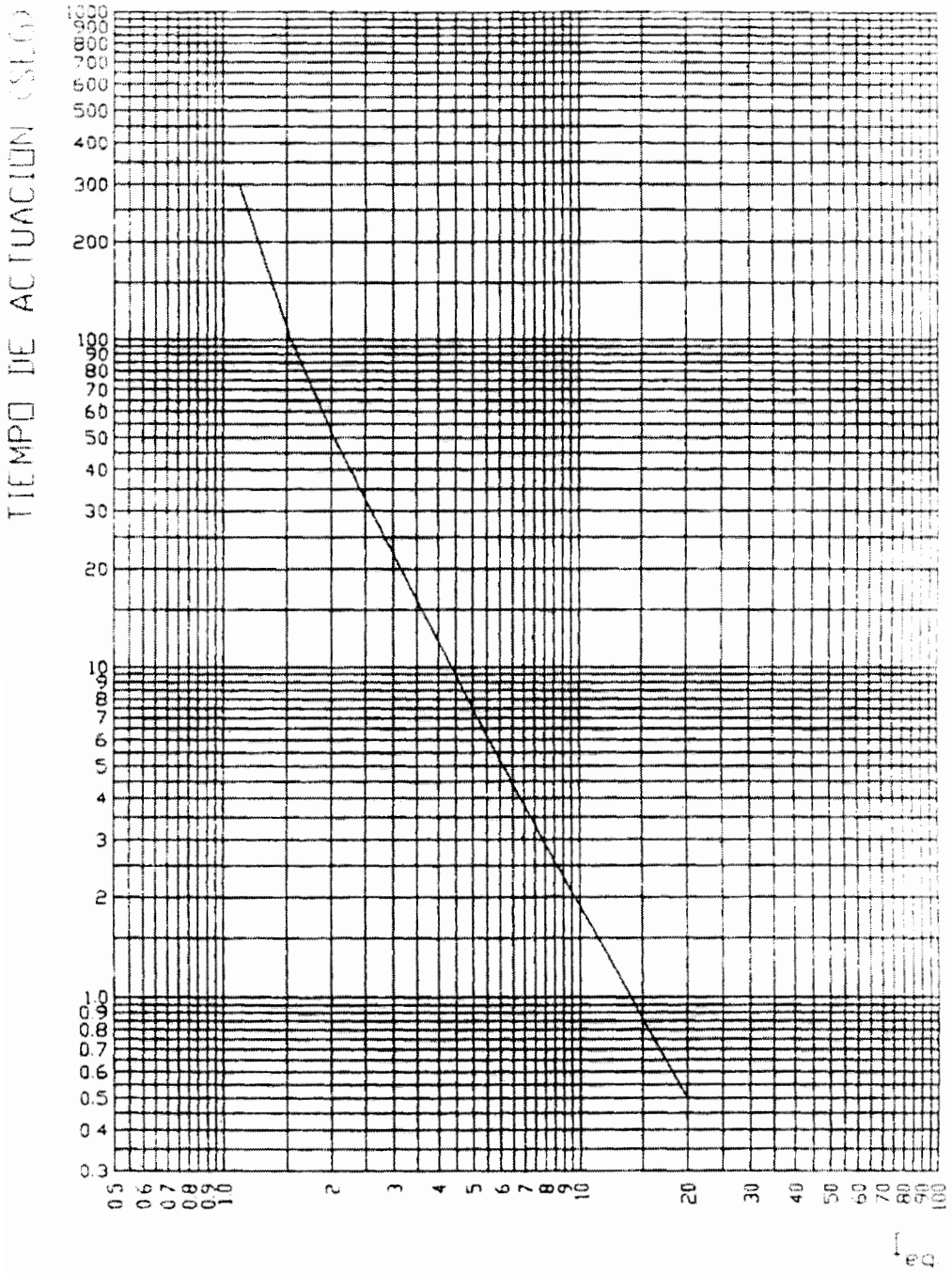


Figura 1-2-1: Curva térmica del relé para una constante de tiempo de 3 minutos.

Las constantes de tiempo relacionado con la curva de calentamiento del motor puede seleccionarse entre 3 y 60 minutos (rango del relé), con pasos de 3 minutos.

Los tiempos de operación superiores a la constante de tiempo $\tau = 3$ min. se obtienen multiplicando los tiempos correspondientes a 3 min. por un factor. Así por ejemplo, el tiempo correspondiente a $\tau = 6$ min. será 2 veces el correspondiente a $\tau = 3$ min.

Cuando se produce enfriamiento a motor parado, la constante de tiempo que se emplea es distinta a la que se emplearía para enfriamiento con motor en marcha debido a las propias características de las curvas de calentamiento y enfriamiento de las máquinas eléctricas.

Esta nueva constante de tiempo es ajustable de 1 a 6 veces la constante de tiempo de operación con motor en marcha o sea 1 a 6 veces la constante de calentamiento del motor. A efectos exclusivamente de selección de la constante de tiempo a emplear, el relé estima que el motor ha parado cuando la componente de secuencia positiva es menor que el 15% de la toma I_s .

Ajustes:

La unidad de imagen térmica tiene asignado el número 1.

Sus ajustes son:

1-1 : Constante de sobre valoración de la componente de secuencia negativa (K_I)

Rango: de 1 a 6 en pasos de 1.

Unidades: adimensional.

1-2 : Constante de tiempo (τ_I)

Rango: de 3 a 60 en pasos de 3.

Unidades: minutos.

1-3 : Constante de tiempo para enfriamiento a motos parado (τ_2)

Rango: de 1 a 6 en pasos de 1.

Unidades: veces τ_I .

Esta unidad puede ser inhabilitada si se desea, esto se logra programando un valor de 0 (cero) en el ajuste 1-2.

1.3. Unidad de protección de secuencia positiva

La componente de secuencia positiva calculada a partir de los datos digitalizados es comparada con el valor de arranque programado, si lo sobrepasa arranca el temporizador de la unidad de secuencia positiva. Cuando este temporizador alcanza el tiempo programado, se acciona el sistema de disparo del relé y una indicación mediante el led color rojo.

El arranque de la unidad se produce al 100% del valor programado, su reposición se produce al 90% del valor programado.

Ajustes:

La unidad de secuencia positiva tiene asignado el número 2. Sus ajustes son:

2-1 : Valor de arranque del instantáneo

Rango: de 3 a 11 en pasos de 1.

Unidades: veces I_s .

2-2 : Temporización

Rango: de 50 a 100 en pasos de 5.

Unidades: milisegundos.

Esta unidad puede ser inhabilitada si se desea; esto se logra programando un valor de 0 (cero) en el ajuste 2-1.

1.4. Unidad de protección de secuencia negativa

La unidad de secuencia negativa tiene dos modos de operación: como modo instantánea o como modo de curva de tiempo inverso. En este último modo la unidad sigue la familia de curvas de la figura 1-4-1. El relé no permite que los dos modos

estén activados al mismo tiempo, o sea que, si se selecciona el modo instantáneo automáticamente queda inhabilitado el modo de curva y viceversa.

Modo instantáneo

La componente de secuencia negativa calculada a partir de los datos digitalizados es comparada con el valor de arranque programado. Si lo sobrepasa, arranca el temporizador de la unidad de secuencia negativa. Cuando este temporizador alcanza el tiempo programado, se acciona el sistema de disparo del relé y una indicación mediante el led color rojo.

Modo de curva

Este modo sigue la familia de curvas de la figura 1-4-1. con el valor de operación que se seleccione se eliminan las intensidades a la izquierda de la curva (valor de corte) del valor programado.

El arranque de la unidad se produce al 105% del valor de corte programado; su reposición se produce al 90% del valor de corte programado.

Ajustes:

La unidad de secuencia negativa tiene asignado el número 3. Sus ajustes son:

3-1: Selección de modo de operación

1- Instantáneo.

2- Curva.

3-2: Valor de arranque del instantáneo

Rango: de 0.5 a 8 en pasos de 0.1.

Unidades: veces I_s .

3-3: Temporización del instantáneo

Rango: de 0.05 a 10 en pasos de 0.05.

Unidades: segundos.

3-4: Valor de corte de la curva

Rango: de 0.2 a 1 en pasos de 0.1.

Unidades: veces I_s .

3-5: Dial de la curva

Rango: de 0.05 a 1 en pasos de 0.05.

Unidades: adimensional.

Cada uno de los modos de funcionamiento puede inhabilitarse independientemente.

Para inhabilitar el modo instantáneo se programa un 0 (cero) en el ajuste 3-2; para inhabilitar el modo de curva se programa un 0 (cero) en el ajuste 3-5.

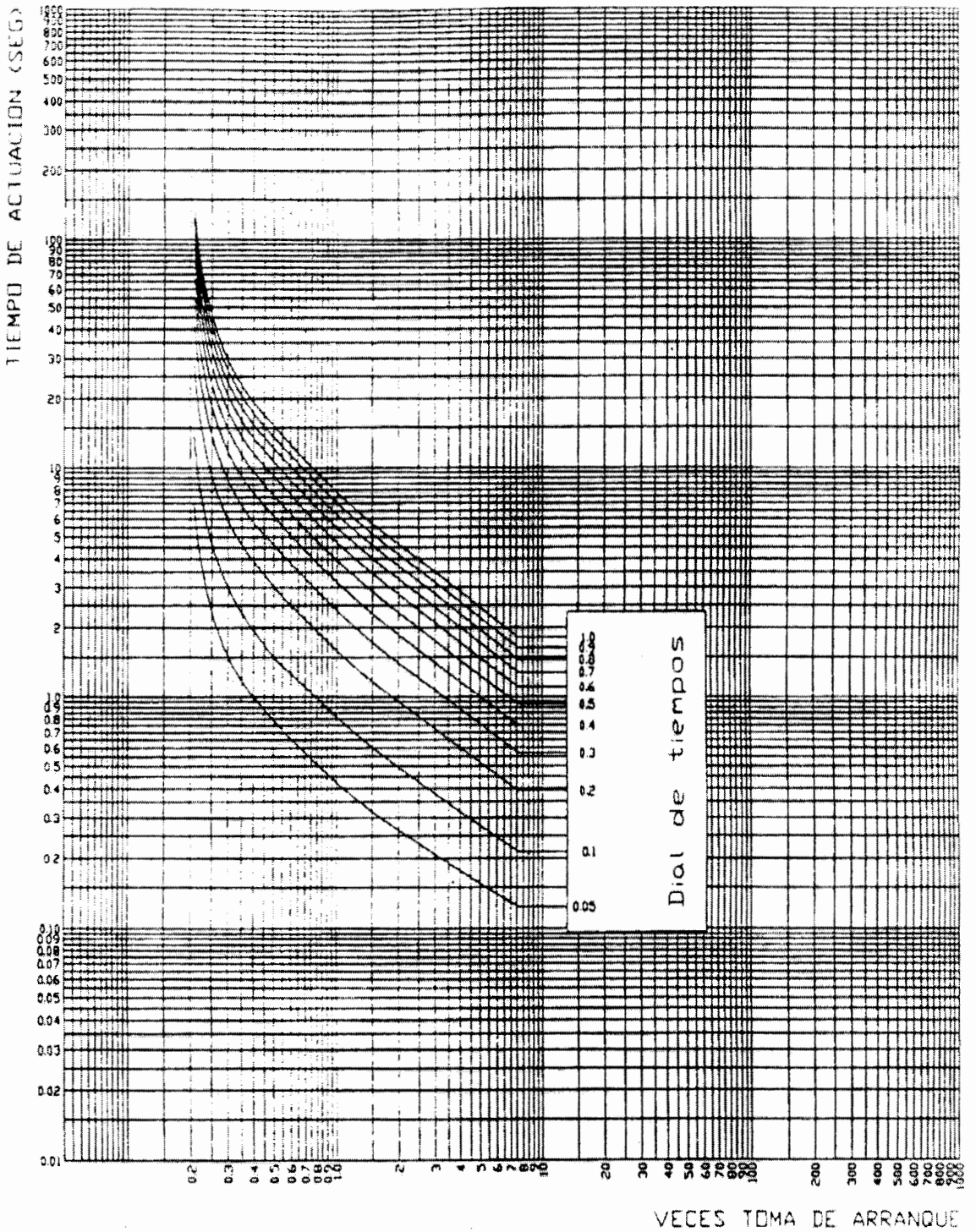


Figura 1-4-1: Familia de curvas de tiempo inverso de la unidad de secuencia negativa

1.5. Unidad de protección de secuencia cero

La componente de secuencia cero de las intensidades que utiliza el relé se obtiene a través del circuito del transformador de corriente tipo toroidal situado en el sistema de alimentación al motor.

Esta corriente, después de rectificadas, es digitalizada y comparada con el valor de arranque programado; si lo sobrepasa, arranca el temporizador de la unidad de secuencia cero, cuando este temporizador alcanza el tiempo programado, se acciona el sistema de disparo del relé y una indicación mediante el led color rojo.

El arranque de la unidad se produce al 100% del valor programado; su reposición se produce al 90% del valor programado.

La toma de neutro en este caso es 1 Amperio.

Ajustes:

La unidad de secuencia cero tiene asignado el número 4. Sus ajustes son:

4-1: Valor de arranque del instantáneo

Rango: de 0.06 a 0.24 en pasos de 0.01.

Unidades: veces la intensidad nominal de neutro (XI_{nGRN}).

4-2: Temporización

Rango: de 0.05 a 10 en pasos de 0.05.

Unidades: segundos.

Esta unidad puede ser inhabilitada si se desea; esto se logra programando un valor de 0 (cero) en el ajuste 4-1.

1.6. Unidad de protección de rotor bloqueado y arranque excesivamente largo

Cuando la componente de secuencia positiva de las intensidades de línea sobrepasa un valor programado, se pone en marcha un temporizador. Este temporizador deberá ser programado como mínimo a un tiempo un poco superior al del tiempo de arranque del motor, esto se hace para evitar que actúe el sistema de disparo del relé debido a arranques del motor.

Al arrancar el motor, si el rotor está bloqueado o por causa de la carga el tiempo de arranque es mayor al normal, se detectará una corriente mayor que la nominal al final del tiempo de arranque, esta es una condición anormal y por tanto se acciona el sistema de disparo del relé y una indicación mediante el led color rojo.

El arranque de la unidad se produce al 100% del valor programado; su reposición se produce al 90% del valor programado.

Ajustes:

La unidad de rotor bloqueado tiene asignado el número 5. Sus ajustes son.

5-1: Valor de arranque del instantáneo

Rango: de 1 a 4 en pasos de 0.1.

Unidades: veces I_s .

5-2: Temporización

Rango: de 1 a 60 en pasos de 1.

Unidades: segundos.

Esta unidad puede ser inhabilitada si se desea; esto se logra programando un valor de 0 (cero) en el ajuste 5-1.

1.7. Unidad de protección de mínima intensidad

Cuando la componente de secuencia positiva desciende por debajo de un valor programado pero tiene un valor superior al 15% del valor de la toma, arranca esta unidad y cuando el temporizador alcanza el tiempo programado se acciona el sistema de disparo del relé y una indicación mediante el led color rojo.

El arranque se produce cuando la intensidad es menor que el valor programado y mayor que el 15% de la toma. La unidad se repone si la intensidad asciende por encima del 110% del valor programado o desciende por debajo del 13.5% de la toma.

Ajustes:

La unidad de mínima intensidad tiene asignado el número 6. Sus ajustes son:

6-1: Valor de arranque del instantáneo

Rango: de 20 a 80 en pasos de 10.

Unidades: veces I_s en tanto por ciento.

6-2: Temporización

Rango: de 0.1 a 10 en pasos de 0.1.

Unidades: segundos.

Esta unidad puede ser inhabilitada si se desea; esto se logra programando un valor de 0 (cero) en el ajuste 6-1.

1.8. Unidad de control del número de arranques del motor

Esta unidad detecta los arranques del motor e impide que se produzcan más de un número programado de arranques en un tiempo dado. Los arranques detectados se introducen en una “ventana de tiempos” de duración programable. Por ejemplo, si la

duración de la “ventana” está programada en 20 minutos, un arranque permanece dentro de la “ventana” durante los veinte minutos siguientes al instante en que se detecta este arranque. Cuando en la “ventana” hay un número de arranques igual al programado, la unidad dispara si y sólo si el motor se para. Esta unidad nunca dispara cuando el motor está en marcha. La salida de disparo se indica mediante el led rojo.

Una vez producido el disparo, la salida de disparo permanecerá activa durante un tiempo mínimo programable por el usuario. Una vez transcurrido ese tiempo, habrá que dar reset al relé.

El número máximo de arranques que puede almacenarse en la “ventana de tiempos” es de 10. Si se produjeran más, el más antiguo sería borrado y el último producido ocuparía su lugar.

Ajustes:

La unidad de control de número de arranques tiene asignado el número 7. Sus ajustes son:

7-1: Duración de la ventana de tiempos

Rango: de 10 a 100 en pasos de 1.

Unidades: minutos.

7-2: Número de arranques permisibles

Rango: de 1 a 10 en pasos de 1.

Unidades: arranques.

7-3: Tiempo mínimo de activación del contacto de disparo

Rango: de 10 a 100 en pasos de 1.

Unidades: minutos.

Esta unidad puede ser inhabilitada si se desea; esto se logra programando un valor de 0 (cero) en el ajuste 7-2.

A efectos de la detección de arranques, se considera que el motor se ha parado cuando la intensidad de secuencia positiva disminuye por debajo de 0.15 veces la toma I_s y permanece allí por un período continuo de por lo menos 0.1 segundos. Se detecta un arranque cuando, estando el motor parado (de acuerdo con la definición anterior) la intensidad de secuencia positiva asciende de 0.15 a 0.70 veces la toma en menos de 0.1 segundos. Si asciende por encima de 0.15 y permanece allí por más de 0.1 segundos pero no cumple la condición de arranque, se considera que el motor está en marcha pero no cuenta como arranque.

CAPÍTULO 2

UTILIZACIÓN DEL RELÉ

Para contar con una correcta protección de motores es importante considerar cuidadosamente las condiciones externas e internas en las que trabaja el motor, así como sus características principales tales como: la potencia del motor, la tensión de operación, corriente de arranque y su duración, características de la carga, máximo tiempo que puede permanecer bloqueado el rotor y la intensidad de corriente que se tiene en esta condición.

2.1. Condiciones para las que se requiere proteger un motor

Básicamente son dos las razones por las que se requiere proteger a un motor:

Condiciones externas. Dependen fundamentalmente de las situaciones impuestas por la red donde esté instalado el motor y se puede clasificarlas como sigue:

- Tensiones desequilibradas en la red.
- Bajas tensiones de operación.
- Pérdida de una fase.
- Inversión de fases

Condiciones internas: Son producidas por fallas del propio motor y se pueden citar las siguientes:

- Fallos de rodamientos.
- Cortocircuitos internos.
- Efectos producido en el motor debido a la sobrecarga.
- Mal apriete de terminales.

2.2. Características de los motores de inducción

Un motor eléctrico de inducción se diferencia del resto de máquinas eléctricas motrices porque no necesita corriente de excitación en su rotor para funcionar.

La interacción entre un campo magnético debido a una corriente en el estator y otro campo inducido en el rotor es lo que ocasiona el giro. Existen dos tipos de motores de inducción: de rotor devanado y de jaula de ardilla, los motores a tratarse en la presente tesis se refieren a motores trifásicos de inducción tipo “jaula de ardilla”.

2.3. Características en el arranque del motor de inducción

Durante el arranque la impedancia del motor es pequeña debido a que el circuito equivalente de un motor de inducción en estas condiciones es muy similar al de un transformador con el devanado secundario en cortocircuito. Por este motivo, la corriente de arranque es típicamente de 4 a 8 veces la corriente nominal del motor,

asimismo, la duración del arranque depende del tipo y potencia del motor, existiendo por lo general valores de 5 hasta 60 segundos en promedio. La magnitud de la corriente de arranque permanece prácticamente constante durante el 90% del tiempo total de arranque, para luego decrecer rápidamente al valor de la corriente nominal o de carga en régimen permanente.

En el momento de la conexión del motor se produce un pico muy alto de corriente asimétrica que puede llegar a un valor de 2.5 veces la intensidad de arranque, pero que tiene una duración muy corta de aproximadamente dos ciclos por lo cual para asuntos de las protecciones eléctricas de los motores aquí expuestos no se considera.

2.4. Diagrama del circuito equivalente del motor de inducción

Conociendo que de hecho existe una acción de transformación eléctrica de voltajes y corrientes en el conjunto estator - rotor, resistencias y reactancias de estator y rotor, efecto de la impedancia de magnetización; además tomando como base el circuito equivalente del transformador se puede desarrollar el circuito equivalente del motor de inducción, tal circuito se puede apreciar en la figura 2-4-1 cuya mayor utilidad es mediante fórmulas sencillas realizar cálculos del par, factor de potencia y otras características del motor.

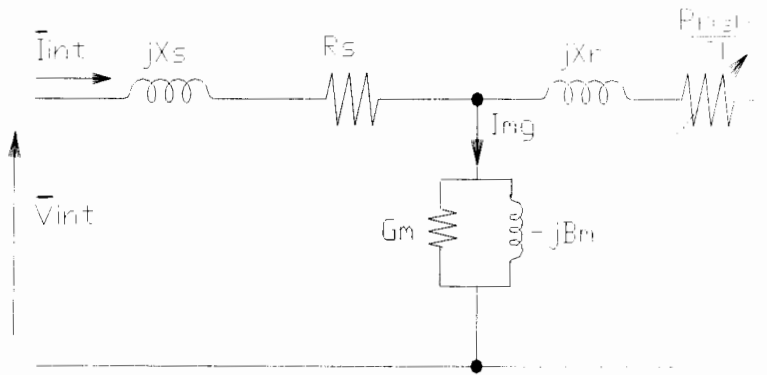


Figura 2-4-1: circuito equivalente del motor de inducción.

$$\bar{I}_{\text{int}} = \frac{\bar{V}_{\text{int}}}{R_s + jX_s + \frac{1}{\frac{1}{Z_r} + \bar{Y}_m}}$$

en donde:

$$Z_r = \frac{Rr(s)}{s} + jX_r \quad \text{y} \quad Y_m = G_m - jB_m$$

\bar{I}_{int} : Corriente del motor por fase

\bar{V}_{int} : Tensión en bornes del motor por fase

R_s : Resistencia de estator

X_s :	Reactancia de dispersión del estator
$R_{r(sl)}$:	Resistencia del rotor referida al estator dependiente del deslizamiento
X_r :	Reactancia de dispersión del rotor referida al estator
Z_r :	Impedancia del rotor
Y_m :	Admitancia de magnetización
G_m :	Conductancia de magnetización
B_m :	Susceptancia de magnetización
Sl :	Deslizamiento

2.5. El motor de inducción en servicio

Por condiciones de diseño y de optimización, un motor en régimen permanente de operación o servicio debe operar dentro de sus límites permisibles de calentamiento, por lo que es necesario evitar sobrecargas térmicas que puedan causar daños en el aislamiento, que es uno de los componentes más débiles del motor.

En régimen permanente, el motor se calienta siguiendo una ley exponencial hasta un valor final, debido a que se cede calor continuamente al entorno. Asimismo, en

operación normal las constantes de tiempo de enfriamiento de un motor son muy similares a las de calentamiento. Por otro lado, si el motor está completamente parado después de estar en servicio, las constantes de tiempo de enfriamiento pueden ser entre 4 y 6 veces mayores que las de calentamiento. Así pues, un motor tardará más tiempo en enfriarse si está parado; una causa de esto es que ya no cuenta con la ventilación del propio sistema de enfriamiento del motor.

Se denomina “constante de tiempo” de un motor y se representa por τ al tiempo necesario para que éste al pasar de una temperatura inicial θ_0 a una temperatura final θ_∞ adquiera el 63% (valor por definición) del incremento de la temperatura θ_∞ , es decir, el tiempo que tardará en alcanzar la temperatura intermedia θ_i , partiendo de la temperatura θ_0 donde:

$$\theta_i = \theta_0 + (\theta_\infty - \theta_0) \times 0.63$$

En la figura 2-5-1 se aprecia el comportamiento de temperatura del motor en función del tiempo.

Si θ_0 es el origen de temperaturas de un motor en un momento dado, el incremento de la temperatura viene dada por:

$$\theta = \theta_N \times (1 - e^{-(t/\tau)}) \times \left(\frac{I}{I_N} \right)^2$$

donde:

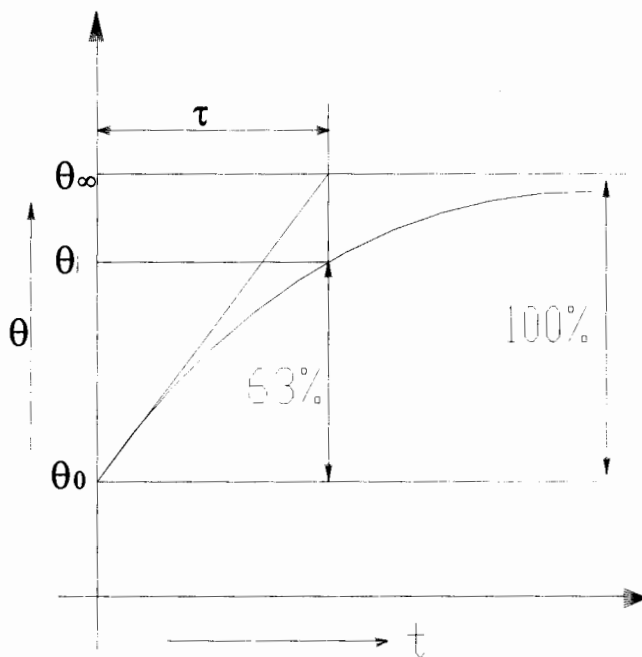


Figura 2-5-1: Curva de constante de tiempo del calentamiento del motor de inducción.

θ : Es el incremento de temperatura en un tiempo dado.

θ_N : Es la temperatura nominal (la que se alcanza si $I = I_N$).

I_N : Corriente nominal del motor para obtención de curva de calentamiento.

I : Corriente que circula por el motor para obtención de curva de calentamiento.

t : Tiempo de circulación de la corriente I .

τ : Constante de tiempo dada la curva de calentamiento de un motor.

2.6. Sobrecarga del motor de inducción

La condición de sobrecarga en un motor se produce principalmente en los siguientes casos:

- Por un arranque excesivamente largo.
- Por problemas mecánicos que dificulten la operación normal en el motor, causando un par superior al nominal.
- Por pérdida de tensión en una fase y su operación asimétrica.

2.7. Curvas térmicas del relé

La ecuación dada anteriormente para la temperatura es:

$$\theta = \theta_N \times \left(1 - e^{-(t/\tau)}\right) \times \left(\frac{I}{I_N}\right)^2$$

El relé utiliza una ecuación en la que el tiempo de disparo es función de la intensidad que circula por el motor, eliminando así toda referencia a temperaturas. La constante de tiempo del motor detectada por el relé recibe el nombre de τ_l .

Mediante varios micro interruptores situados en el frente del relé se programa una intensidad nominal. Si la intensidad que circula por el relé es superior a la intensidad nominal programada se producirá la actuación de relé mediante el disparo de la protección térmica al cabo de un tiempo que viene dado por la ecuación siguiente:

$$t_d = \tau_1 \times \ln\left(\frac{I^2}{(I^2 - 1)}\right)$$

donde:

t_d : Tiempo de disparo.

τ_1 : Constante de tiempo.

Esta ecuación es aplicable sólo si el relé parte del estado cero térmico, es decir, de una situación en la que circulaba por él una intensidad $I_e = 0$ Amp. Si por el contrario, el relé se había estabilizado en una situación en la que circulaba una corriente dada, menor que la nominal y en un momento dado la corriente aumenta hasta un valor superior al nominal, el tiempo de disparo a partir del momento en que se produce este incremento viene dado por la ecuación:

$$t_d = \tau_1 \times \ln\left(\frac{I^2 - I_e^2}{(I^2 - 1)}\right)$$

donde:

I_e : I_{me}/I_s

I_{me} : Intensidad a la que se estabiliza la temperatura del motor.

I_s : Intensidad de toma seleccionada para ajustes del relé

Y el resto de los símbolos tienen prácticamente el mismo significado que en la ecuación anterior. Los tiempos de disparo de algunas curvas de diferentes dial se muestran en la figura 2-7-1.

Por otra parte I_m (intensidad que circula por el motor que es detectada por el relé) se define de la forma siguiente:

$$I_m = \sqrt{I_1^2 + K_1 I_2^2}$$

siendo:

I_1 : Componente de secuencia positiva.

I_2 : Componente de secuencia negativa.

Estas ecuaciones representan las curvas teóricas sobre las que se basa el relé. La unidad de imagen térmica funciona de acuerdo a la curva de la figura 1-2-1, que sigue muy de cerca los valores teóricos.

A I_m se le llama también “intensidad térmica equivalente” I_{eq} .

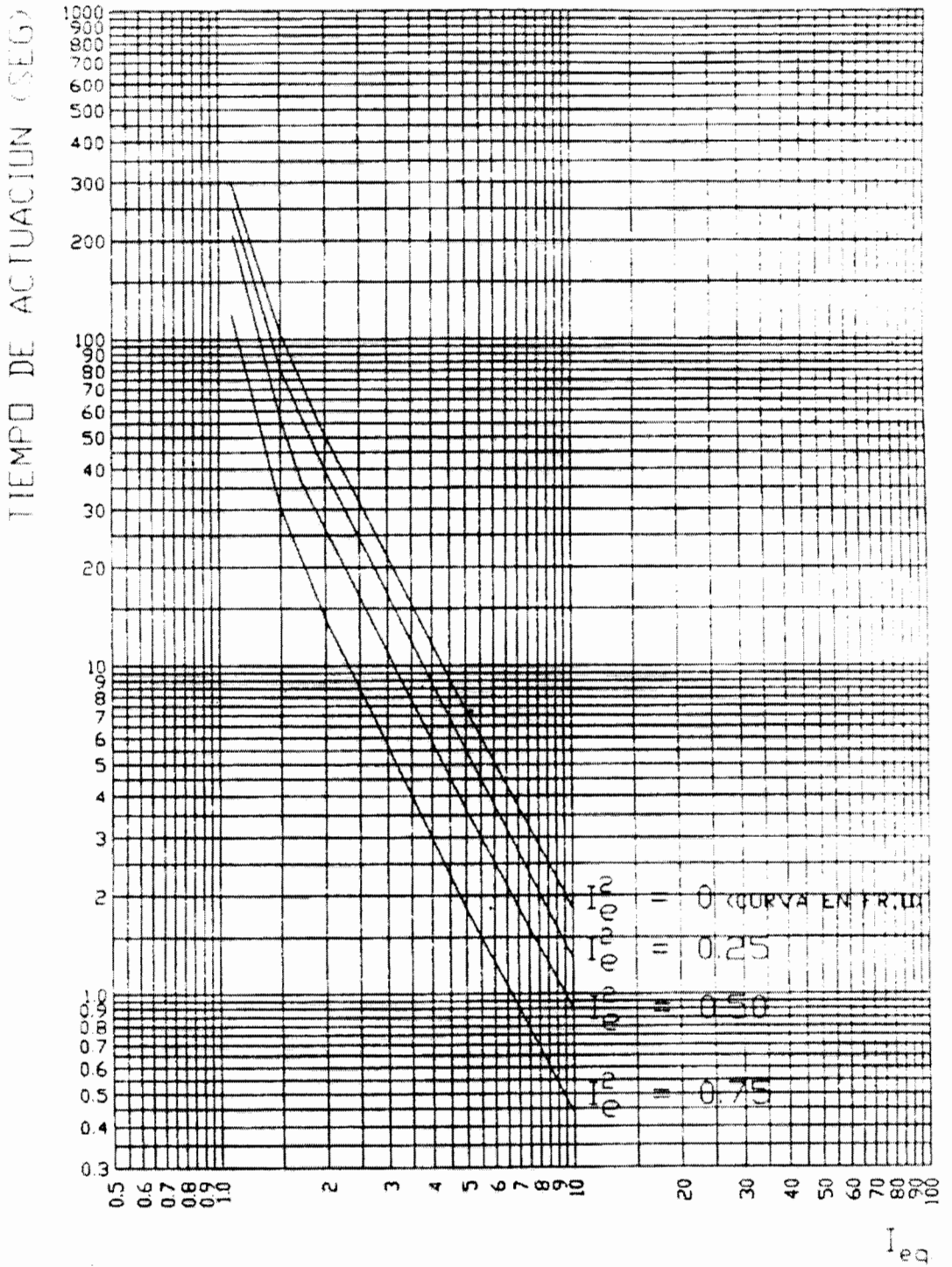


Figura 2-7-1: Curvas de diferentes dial del relé para una constante de tiempo de 3 minutos.

2.8. Rango de aplicación del relé de protección

El relé de protección digital protege al motor contra:

- ❑ Sobrecargas y exceso de temperatura, mediante la unidad de imagen térmica.
- ❑ Faltas entre fases, mediante la unidad de sobre intensidad instantánea de secuencia positiva.
- ❑ Bloqueo del rotor y arranque excesivamente largo, mediante una unidad de sobre intensidad de secuencia positiva independiente.
- ❑ Arranque monofásicamente, por medio de una unidad de sobre intensidad de secuencia negativa.
- ❑ Fallas a tierras, mediante una unidad de sobre intensidad de secuencia cero.
- ❑ Funcionamiento de bombas en ausencia de fluido, mediante una unidad de mínima intensidad.
- ❑ Arranques demasiado frecuentes, mediante una unidad de control de número de arranques.

2.9. Criterios de aplicación de la protección de sobrecargas

Para la correcta regulación del elemento térmico del relé, se debe seleccionar la intensidad de entrada (intensidad de toma del relé, I_s) y también la constante de tiempo térmica.

Todo motor eléctrico tiene una intensidad nominal (I_M), a la cual puede trabajar indefinidamente sin sufrir daños. Tiene también un valor de sobrecarga admisible que se lo llama factor de sobrecarga (FS) que se expresa en veces I_M . Con estos dos valores se puede delimitar el ajuste de la intensidad de entrada del relé.

El error en la medida del relé determina para una intensidad de toma dada, una zona en la que puede producirse el disparo. Puesto que el error del relé es de $\pm 5\%$ (ver sección 3.6), la zona de disparo se extiende desde $0.95I_s$ hasta $1.05I_s$, tal como se muestra en la siguiente figura 2-9-1.

El principal criterio a tener en cuenta para la protección de sobrecargas es el siguiente: La zona de disparo debe estar por debajo de la sobrecarga admisible por el motor. De tal modo se asegura que el relé disparará si la intensidad pasa del valor de sobrecarga admisible, con lo que el motor queda debidamente protegido.

El segundo criterio que se debe observar es: La zona de disparo debe estar por encima de la intensidad nominal. De esta forma se obtiene el máximo aprovechamiento de la capacidad de trabajo del motor.

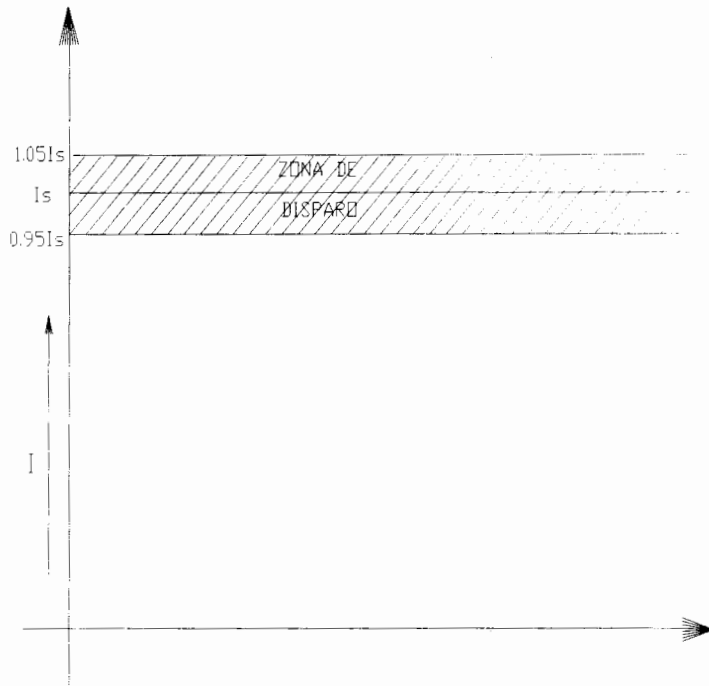


Figura 2-9-1: Zona de disparo del relé

Si las características del motor son tales que no es posible cumplir los dos criterios al mismo tiempo, el criterio principal tiene preferencia, que es el de proteger al motor contra sobrecargas y se debe resignar el perder una parte de la zona de trabajo admisible para el motor. A continuación se explica como se aplicarían estos criterios en dos casos concretos.

Además para el ajuste de la intensidad se requieren los siguientes datos:

FS : Factor de sobrecarga que equivale a la sobrecarga admisible del motor, por ejemplo si se admite una sobrecarga del 10%; entonces $FS = 1.1$

I_M : Intensidad nominal del motor a plena carga.

R_{TI} : Relación de transformación de los transformadores de intensidad (TI) de línea.

I_n : Intensidad nominal del relé (para protección de fases).

Ejemplo 1

Se supone un motor de:

Potencia: 408.5 KW

Tensión: 4160 V

Rendimiento: 0.96

Factor de potencia: $\cos\phi = 0.93$

Sobrecarga admisible (FS): 15%

Tiempo de arranque: 25 seg.

Tiempo máximo permisible de bloqueo del rotor: 40 seg.

Intensidad de arranque: 5 veces la nominal

Relación de transformación: 75/5

Intensidad nominal del relé: 5 A

Se calcula la intensidad nominal del motor:

$$Pot(W) = \sqrt{3} \times V \times I_M \times \eta \times \cos \varphi \quad (2.1)$$

$$I_M = \frac{408500}{0.96 \times 0.93 \times \sqrt{3} \times 4160}$$

$$I_M \approx 63.5 \text{ Amp}$$

Se transforma los valores de la corriente que circula por el motor a valores de lectura del relé, para lo cual se toma en cuenta la relación de transformación de los transformadores de corriente y la intensidad nominal del relé, se llama I_m a la intensidad nominal del motor detectada por el relé de protección.

$$I_m = \frac{I_M}{R_{TI} \times I_n} \quad (2.2)$$

Ahora, si se multiplica I_m por el factor de servicio y además se considera el error del 5% del relé se tiene la intensidad de sobrecarga detectada por el relé:

$$I_{sob} = \frac{I_M \times FS}{1.05 \times R_{TI} \times I_n} \quad (2.3)$$

por tanto, y para cumplir con el criterio principal la intensidad de sobrecarga admisible en el caso del ejemplo 1 tiene un valor de:

$$I_{sob} = \frac{63.5 \times 1.15}{1.05 \times \frac{75}{5} \times 5} = 0.9273$$

Al haber dividido el valor de la sobrecarga admisible del motor entre 1.05 se asegura que en el valor resultante se considere el error del relé, esto es $\pm 5\%$.

Por otro lado, para cumplir el segundo criterio y considerando el error del $\pm 5\%$ el cual da un margen de seguridad para la protección del motor la intensidad I_s debe ser igual o mayor que:

$$I_m = \frac{I_M}{0.95 \times R_{TI} \times I_n} \quad (2.4)$$

con lo cual para el ejemplo 1:

$$I_m = \frac{63.5}{0.95 \times \frac{75}{5} \times 5} = 0.891$$

Así pues, un valor seleccionado entre 0.891 y 0.9273 será el que debe programarse como I_s . Se selecciona 0.9, para lo cual se mueven todos interruptores del panel frontal a la izquierda excepto uno de los rotulados 0.4 y el rotulado 0.1 (ver figura 3-13-2-1 en la sección 3.13.2. en la que se aprecian estos micro interruptores con sus

respectivos valores a la derecha) lo que dará una suma de $(0.4 + 0.4 + 0.1) = 0.9$. En la siguiente figura 2-9-2 puede verse la zona de disparo para este ajuste.

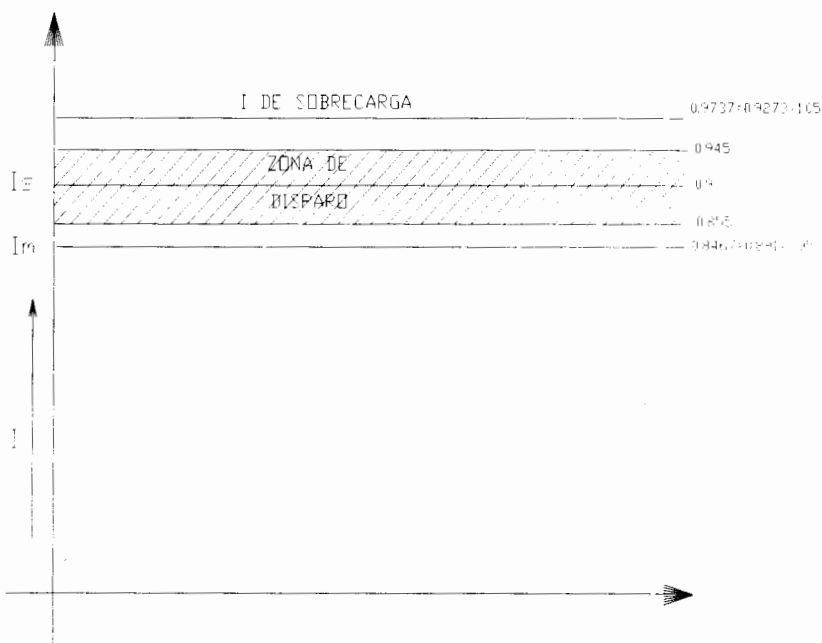


Figura 2-9-2: Zona de disparo - ejemplo 1

Ejemplo 2

Se supone un motor de:

Potencia: 3221.34 KW

Tensión: 4160 V

Rendimiento: $\eta = 0.92$

Factor de potencia: $\cos\phi = 0.89$

Sobrecarga admisible (FS): 10%

Relación de transformación: 600/5

Intensidad nominal del relé: 5A

Se calcula la intensidad nominal del motor:

$$Pot(W) = \sqrt{3} \times V \times I_M \times \eta \times \cos \varphi$$

$$I_M = \frac{3221340}{0.92 \times 0.89 \times \sqrt{3} \times 4160} \approx 546 \text{ Amp}$$

Utilizando la ecuación (2.3) la intensidad de sobrecarga admisible tiene un valor de:

$$I_{sob} = \frac{546 \times 1.1}{1.05 \times \frac{600}{5} \times 5} = 0.953$$

Y la intensidad nominal del motor detectada por el relé según la ecuación (2.4) es:

$$I_m = \frac{546}{0.95 \times \frac{600}{5} \times 5} = 0.9578$$

Es imposible cumplir con los dos criterios de la sección 2.9 al mismo tiempo, por lo que se da preferencia al primero; entonces la selección debe ser $I_s = 0.95$; para esto se mueven a la izquierda todos los interruptores del panel frontal excepto uno de los rotulados 0.4, el rotulado 0.1 y el rotulado 0.05, lo que nos da una suma de (0.4 + 0.4

+ 0.1 + 0.05) = 0.95. En la siguiente figura 2-9-3 puede verse que la zona de disparo ocupa parte de la zona de trabajo.

Para efectuar en el relé el ajuste de la constante de tiempo, el fabricante debe proporcionar el tiempo que el motor tarda en llegar a la máxima temperatura admisible con una intensidad dada, y mediante la fórmula:

$$K = I^2 t \quad (2.5)$$

se calcula la constante de tiempo a emplear, suponiendo que en el motor del ejemplo 1 este tiempo es de 240 segundos por ejemplo a 150 Amp.

$$I = 150 \times \frac{5}{75} = 10$$

$$K = 10^2 \times 240 = 24000$$

En la curva básica del relé correspondiente a $\tau_I = 3$ minutos figura 1-2-1, se selecciona el punto correspondiente a 5 veces la toma ($5I_{eq}$), valor considerado como corriente de arranque, a este punto corresponde un tiempo de actuación de 7.35 segundos.

$$I_{arr} = \text{veces} I_M \times I_s \times I_n \quad (2.6)$$

$$I = 5 \times 0.95 \times 5 = 23.75 \text{ Amp}$$

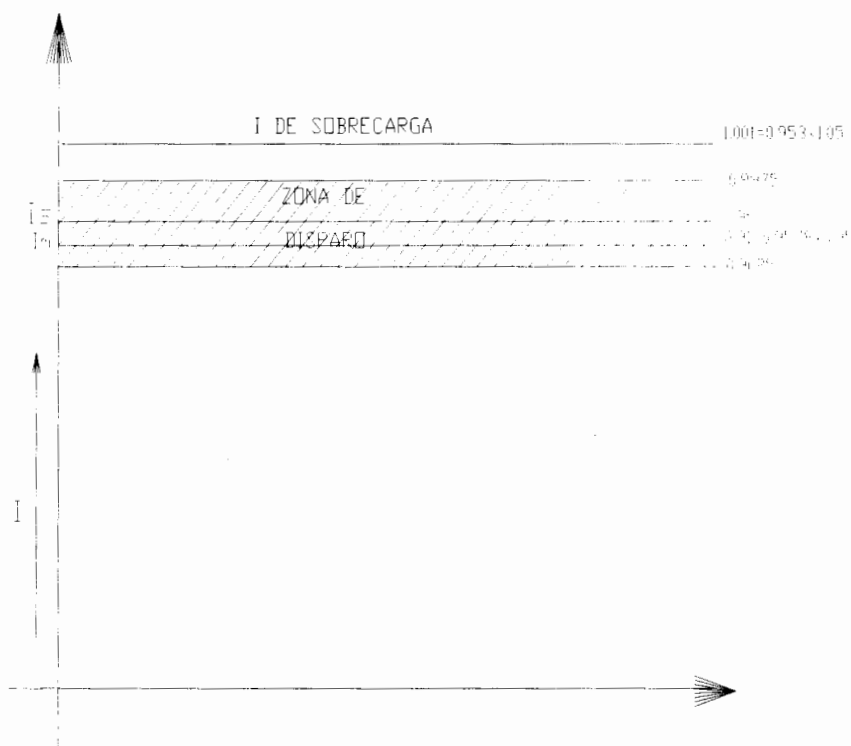


Figura 2-9-3: Zona de disparo de relé.

Con lo cual el valor de K_{180} (constante de referencia del motor) es:

$$I^2 t = 23.75^2 \times 7.35 = 4146$$

se puede decir que con la ecuación:

$$K/K_{180} = \tau/\tau_{180} = \tau_1 \quad (2.7)$$

en donde τ_1 significa cuantas veces debe ajustarse la constante de tiempo con respecto al valor por defecto del relé. Para el caso del ejemplo 1 se tiene:

$$K/K_{180} = \tau_1/\tau_{180} = 24000/4146 = 5.7887$$

y la constante de tiempo a la que debe ajustarse el motor es 5.7887 veces mayor que la mínima.

$$\tau_1 = 5.7887 \times 180 = 1042 = 17.36 \text{ min}$$

la más cercana es claramente $\tau_l = 18$ minutos, que será la que se seleccione.

2.10. Protección contra fallas entre fases

En caso de tener un cortocircuito en los terminales de un motor, la intensidad de falla es generalmente mayor que cualquier intensidad normal, incluida la de arranque. En general, con una temporización entre 50 y 100 mseg. como la que permite el relé, la intensidad de arranque de la protección de secuencia positiva debe seleccionarse menor que el 50% de la magnitud de la corriente de cortocircuito mínimo, pero mayor del 160% de la intensidad en el arranque. Entonces se tendrá la ecuación:

$$\frac{1.6 \times I_{arr}}{R_{TI} \times I_n \times 0.95} < I_1 < \frac{I_{cc \text{ min}}/2}{R_{TI} \times I_n \times 1.05} \quad (2.8)$$

2.11. Protección contra fallas a tierra

Como criterio general, para el ajuste de la unidad de secuencia cero debe tomarse el valor por encima de la intensidad capacitiva a tierra del conjunto motor-cable de fuerza, esta corriente es menor que un amperio para el caso de los motores descritos

en esta Tesis; ahora tomando como referencia un amperio y dividiéndolo para la relación de transformación del transformador de corriente de neutro se tiene:

$$\frac{1Amp}{\frac{20}{1}} = 0.05Amp$$

en vista que el valor mínimo de ajuste del relé para la unidad de secuencia cero es 0.06 Amp, entonces 0.06 será el ajuste de esta unidad en los relés.

$$I_{ajus(pri)} = I_{ajus} \times r_{ii} = 0.06 \times \frac{20}{1} = 1.2Amp \quad (2.9)$$

2.12. Protección contra rotor bloqueado

Un motor con el rotor bloqueado está en una situación peligrosa debido a la gran cantidad de calor generado, que no puede disiparse con la rapidez necesaria.

En general, no es posible distinguir esta condición de la de arranque normal sólo con la intensidad. Es preciso medir también el tiempo que la intensidad está presente para ver si es mayor que el tiempo de arranque normal del motor.

La intensidad de rotor bloqueado estará entre:

$$\frac{I_M \times FS}{R_{TI} \times I_n \times 0.95} < I_{RB} < \frac{I_{arr}}{R_{TI} \times I_n \times 1.05} \quad (2.10)$$

Para el ajuste del tiempo, se toma el caso del ejemplo 1, en la que se debe programar un valor entre 25 y 40 segundos como lo indican los datos del fabricante; un ajuste de 30 segundos sería adecuado.

2.13. Protección contra arranque en monofásico

La unidad instantánea de secuencia negativa protege al motor contra desequilibrios en la tensión de entrada. Puede optarse entre operación instantánea o bien según las curvas de tiempo inverso de la figura 1-4-1.

En estos casos se usará la operación instantánea y se ajustará al mínimo valor, esto es:

$$I_2 = 0.5 \times I_s \quad (2.11)$$

2.14. Protección de motores contra trabajo de bombas en vacío

Para prevenir los daños que se producen en las bombas cuando trabajan en vacío, el relé va provisto de una unidad de mínima intensidad. Esta unidad supervisa constantemente el valor de la componente de secuencia positiva. Si decrece por debajo de un valor programado se produce una señal de disparo, excepto si la intensidad decrece por debajo del límite del 15% de la toma. El disparo puede temporizarse de 0.1 a 10 seg.

Se realizarán los ajustes de esta unidad en 20% del ajuste de la unidad térmica I_s .

$$I_{PVB} = 0.2 \times I_s \quad (2.12)$$



2.15. Protección contra arranques demasiado frecuentes

Para evitar los daños que se podrían producir en el motor por efecto de calor acumulativo debido a un número excesivo de arranques en un corto espacio de tiempo, el relé incorpora una unidad de control de número de arranques. Esta unidad impide que se produzca un número de arranques mayor que el programado durante un tiempo dado, también programable. Si esta unidad dispara, la salida de disparo permanece activa durante un tiempo mínimo programable, para asegurar al motor un período de recuperación.

CAPÍTULO 3

ESPECIFICACIONES TÉCNICAS DEL RELÉ

Cuando se instala un relé se debe tener muy en cuenta factores como: precisión, características de tiempo, métodos de ajuste, etc. Pero sobre todo el relé debe ser confiable para lo cual se requiere que se maneje adecuadamente las características propias e inherentes del relé para su óptimo manejo, ajuste, operación y mantenimiento.

3.1. Circuito de intensidad

Intensidades nominales

Se tiene una intensidad nominal de 5 Amp. para el circuito de los elementos de protección de fases y 1 Amp. para el circuito de los elementos de protección de fallas a tierra.

Capacidades térmicas en salida de contactos del relé

Considerando una intensidad nominal del relé de 5 Amp. Se tiene:

Continuamente: $2 \times I_n$.

Durante 3 seg.: $50 \times I_n$.

Durante 1 seg.: $100 \times I_n$.

Cargas

Se tiene:

$I_n = 5$ Amp; se tiene hasta una carga de 0.3 VA sobre los dos transformadores de corriente para protección de fases del motor.

$I_{nGRN} = 1$ Amp; se tiene hasta una carga de 0.3 VA sobre el transformador toroidal de corriente.

3.2. Rangos de ajustes

En el capítulo 1 se había mencionado acerca de los parámetros que se manejan para el ajuste de las unidades del relé, en esta sección se resumen los rangos de cada una de las unidades del relé.

Unidad de imagen térmica

Intensidades de las tomas (I_s)

Desde 0.40 hasta $1.55 \times I_n$ en pasos de $0.05 \times I_n$.

Constante de tiempo (τ_I)

De 3 a 60 min. en pasos de 3 min.

Constante de tiempo para enfriamiento a motor parado (τ_2)

Valores de: 1, 2, 3, 4, 5 ó 6 veces τ_1 .

Constante de sobre valoración de secuencia negativa (K_I)

Valores discretos de: 1, 2, 3, 4, 5 y 6.

Unidad de secuencia positiva

Rango

Desde 3 a 11 veces la corriente seleccionada en la toma de la unidad de imagen térmica en pasos de 1.

Tiempo de operación

Temporizado de 50 a 100 mseg. en pasos de 5 mseg.

Unidad de secuencia negativa en modo instantáneo

Rango

Desde 0.5 a 8 veces la corriente seleccionada en la toma de la unidad de imagen térmica en pasos de 0.1.

Tiempo de operación

Temporizado de 0.05 a 10 seg. en pasos de 0.05 seg.

Unidad de secuencia negativa en modo de curva

Curvas de la figura 1-4-1 cortada en un valor seleccionado entre 0.2 y 1.0 veces la toma en pasos de 0.1.

Unidad de secuencia cero

Rango

Desde 0.06 a 0.24 veces el valor nominal de la unidad de secuencia cero (I_{nGRN}) en pasos de 0.01.

Intensidad nominal

Se tiene como intensidad nominal de neutro: 1 Amp.

Tiempo de operación

Temporizado de 0.05 a 10 seg. en pasos de 0.05 seg.

Unidad de rotor bloqueado

Rango

Desde 1 a 4 veces la corriente seleccionada en la toma de la unidad de imagen térmica en pasos de 0.1.

Tiempo de operación

Temporizado de 1 a 60 seg. en pasos de 1 seg.

Unidad de mínima intensidad

Rango

Desde el 20% al 80% de la corriente seleccionada en la toma de la unidad de imagen térmica en pasos de 10%.

Tiempo de operación

Temporizado de 0.1 a 10 seg. en pasos de 0.1 seg.

Unidad de control del número de arranques

Ventana de tiempos

De 10 a 100 minutos en pasos de 1 minuto.

Rango

Desde 1 a 10 arranques en pasos de 1.

Tiempo mínimo con disparo activo

De 10 a 100 minutos en pasos de 1 minuto.

3.3. Frecuencia

Únicamente 50 ó 60 Hz. programable por el usuario, (en el caso de esta Tesis se usa 60 Hz.) ver sección 1.1.

3.4. Contactos de salida

Capacidad de cierre: 3000 W resistivos durante 0.2 seg. con su máximo de 30 Amp y 300 Vcc.

Capacidad de corte: 50 W resistivos con 2 Amp. y 300 Vcc. máximo.

Capacidad continua: 5 Amp. con 300 Vcc. máximo.

3.5. Contactos de alarma

Capacidad de cierre: 35 Amp. de corriente continua durante 30 seg. y 250V de corriente continua máximo.

Capacidad de corte: 25 W inductivo y 250 V de corriente continua máximo.

Capacidad continua: 3 Amp.

3.6. Precisión

Valor de operación: con un $\pm 5\%$.

Tiempo de operación: $\pm 5\%$ ó bien 0.025 seg., el que ocurra primero. El tiempo correspondiente a 0.025 seg. está guardado en la memoria interna del relé.

3.7. Rangos de temperatura

Las condiciones favorables de temperatura con las que debe encontrarse el relé son:

Rango operativo: -10°C a $+55^{\circ}\text{C}$

Rango de almacenamiento: -40°C a $+65^{\circ}\text{C}$

3.8. Humedad ambiente

Puede trabajar hasta con el 95% de humedad en el ambiente sin que exista condensación en el relé.

3.9. Aislamiento

Entre cada terminal y chasis: 2000 Vac durante 1 min. a la frecuencia industrial.

Entre circuitos independientes: 2000 Vac durante 1 min. a la frecuencia industrial.

Entre terminales de cada circuito de salida: 1000 Vac durante 1 min. a la frecuencia industrial.

3.10. Pruebas de impulso

En fábrica se aplica a los circuitos de entrada de corriente del relé una condición de sobrevoltaje correspondiente a 5 KV de pico durante 50 μ seg. Esta prueba es importante para simular descargas en el circuito de entrada y observar el comportamiento del relé.

3.11. Alimentación

La alimentación eléctrica para este relé es de 125 V. de corriente continua, con un consumo menor de 1.5 W.

3.12. Peso

Peso neto aproximado del relé incluida su caja protectora y bornera adaptada es de: 4Kgs.

3.13. Aspectos de construcción

La caja del relé es de chapa de acero. La tapa frontal es de material plástico y se ajusta a la caja del relé haciendo presión sobre una junta de goma situada en toda la periferia del relé, lo que produce un cierre hermético que impide la entrada de polvo o impurezas que puedan afectar las condiciones favorables de trabajo de éste.

3.13.1. Uniones eléctricas y conexiones internas

La unión de los cables exteriores se hace en los dos bloques de terminales montados en la parte posterior de la caja. Cada bloque contiene bornes de terminales con base para tornillos de 4 mm. de diámetro para darle mayor firmeza a las conexiones.

Todas las entradas de intensidades van sobre un bloque de terminales, situado en la parte posterior. Este bloque tiene capacidad para soportar las corrientes secundarias de los transformadores de intensidad. Los conductores internos de entrada de intensidad son de mayor sección que el resto de cables de las conexiones interiores del relé. Tanto los cables de conexiones internas como externas deben tener la menor longitud posible para minimizar la carga resistiva que soportan los transformadores de intensidad. Las conexiones se hacen a través de terminales encajados a presión. Los cables de intensidad de entrada van formando un manajo separado de los demás cables con el fin de minimizar los efectos de acoplamiento de campos magnéticos asociados a las intensidades de entrada, especialmente sobre los conductores internos de señales débiles.

3.13.2. Identificación

Los bloques de terminales para conexiones con los transformadores de corriente y de contactos de salida van identificados por una letra situada en la placa posterior. Existen dos bloques plenamente identificados "A" y "B" que sirve justamente para evitar confusiones al hacer el conexionado de los cables externos. La forma de la placa del relé se presenta en la siguiente figura 3-13-2-1.

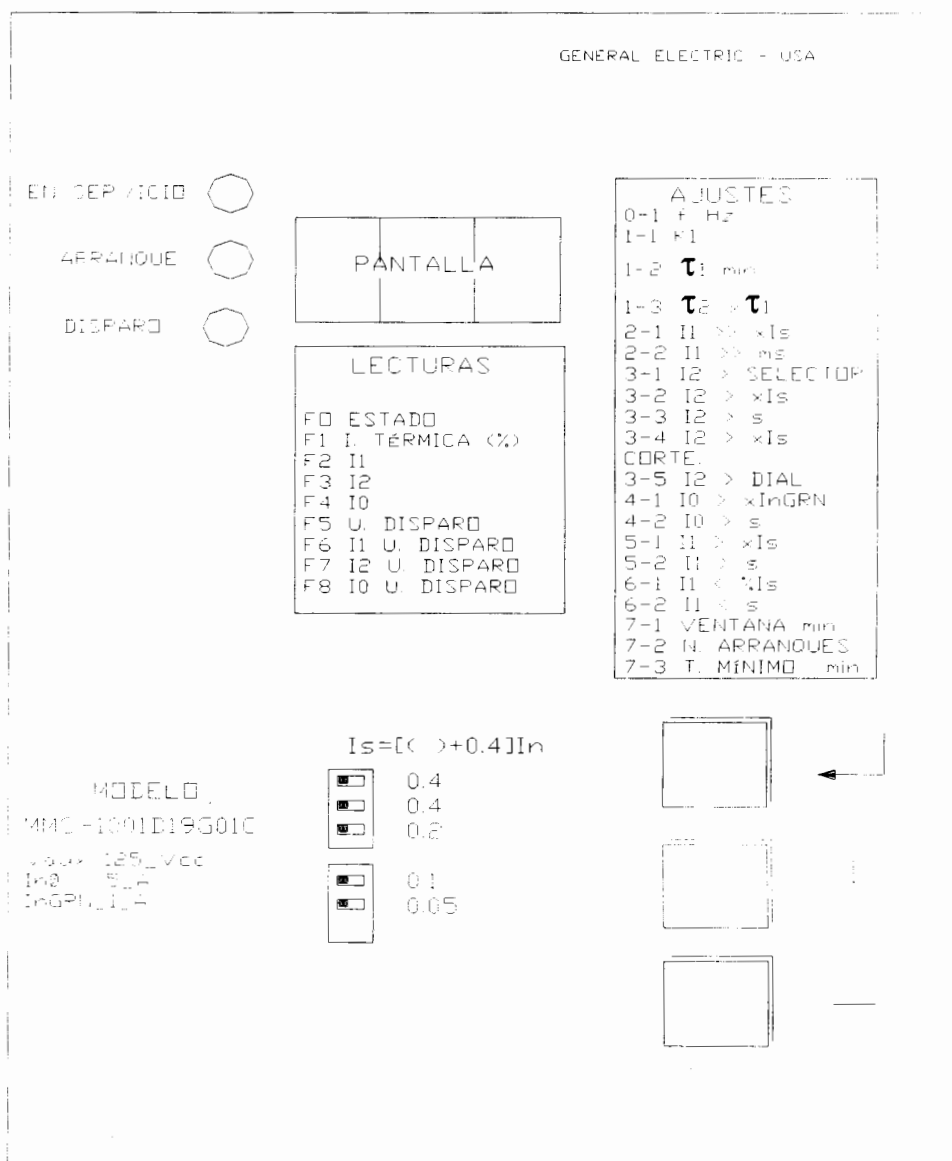


Figura 3-13-2-1: Placa frontal del relé

3.13.3. Dispositivos frontales

En el frente del relé y sobre su placa frontal, según se muestra en la figura 3-13-2-1 van situados los elementos de ajuste y señalización siguiente:

Selección de toma para la corriente del relé

Es el elemento con el que se selecciona la intensidad mínima de operación del relé. Consta de cinco micro interruptores los cuales llevan un número a su derecha. Los interruptores están abiertos cuando se encuentran a la izquierda, y cerrados cuando se encuentran a la derecha. La intensidad de la toma a la que está ajustado el relé (I_s) será el producto de la intensidad nominal de fases (I_n) por 0.4 más la suma de las cantidades escritas a la derecha de cada micro interruptor que se encuentre cerrado. Descrito esto en una fórmula se tendrá:

$$I_s = [(\text{)} + 0.4] \times I_n$$

Ejemplo: ajustar un relé de $I_n = 5$ Amp para una I_s de 4.5 Amp. Para ello y dado que $5 \times 0.9 = 4.5$, se debe cerrar los micro interruptores necesarios para formar la cantidad de 0.5, que sumado a la fija de 0.4 nos dará 0.9; se consigue esto cerrando los micro interruptores rotulados 0.4 y 0.1 y abriendo todos los demás.

El rango de intensidad es:

$$I_s \text{ desde } 0.40 \text{ hasta } 1.55 \times I_n \text{ en pasos de } 0.05 \times I_n.$$

Pulsadores y pantalla

El relé dispone de tres pulsadores para control de todos los ajustes y consulta de operaciones del relé. Asimismo, dispone de una pantalla con tres dígitos claramente

visibles y luminosos para suministrar información al usuario. La operación de estos elementos se explica con más detalle en la sección 4.6.

3.13.4. Señalizaciones externas

El relé dispone de tres led's en el frente la función de cada uno de ellos se describe a continuación:

- Led “en servicio” (superior) es de color verde e indica que el relé está operativo, tiene alimentación eléctrica adecuada y está listo para realizar su función.
- Led “arranque de protección” (intermedio) es de color rojo e indica que se ha producido la actuación de alguna unidad de protección.
- Led “disparo de protección” (inferior) es de color rojo también e indica que se ha producido el disparo de alguna unidad. Este led permanece encendido hasta que es reconocida la actuación del relé y será apagado por el usuario mediante un reset (ver sección 4.6.) si al relé se le retira la tensión auxiliar, y al volver a aplicarla, la información de actuación de disparo o de alarma que pudiese tener el relé se perderá; por aquello se debe alimentar al relé con una fuente de tensión muy confiable.

CAPÍTULO 4

MANEJO, MANTENIMIENTO Y PRUEBAS DEL RELÉ

Este relé se suministra dentro de un embalaje especial que lo protege debidamente durante el transporte, siempre que éste se haga en condiciones normales.

Inmediatamente después de recibir el relé, se deberá comprobar si aquel presenta algún signo de haber sufrido deterioro durante el transporte, si resulta evidente que el relé ha sido dañado por mal trato éste no estará en condiciones de servicio.

Para desembalar el relé es necesario primeramente leer las instrucciones del fabricante, teniendo cuidado de no perder los tornillos, accesorios y hojas técnicas que se suministran dentro de la caja.

Si el relé no va a ser instalado inmediatamente, es conveniente almacenarlo en su embalaje de origen, en un lugar seco y libre de polvo.

Se recomienda que una vez recibido el relé se hagan de forma inmediata una inspección visual y las pruebas de instalación que se indican en la sección 4.4. para asegurarse de su buen estado.

Estas pruebas se pueden realizar como pruebas de instalación y de recepción, según criterio del usuario puesto que por lo general se tienen procedimientos diferentes para pruebas de instalación y de recepción, si embargo en este capítulo se indican las pruebas elementales que se pueden realizar al relé.

Si las pruebas realizadas, indican que el relé no funciona correctamente debe comunicarse a la Fábrica. Debido a su carácter digital, en principio el relé no requiere modificaciones del calibrado; solamente de sus correspondientes ajustes.

4.1. Manejo del relé digital

El relé se ajusta mediante un teclado formado por tres pulsadores situados en el frente. Estos pulsadores están alineados verticalmente y comenzando por el superior que se lo denominan “ENTER”, luego el pulsador identificado con el signo “+” y por último el pulsador identificado con el signo “-”. El pulsador “ENTER” está representado por una flecha (ver figura 3-13-2-1). El relé suministra información mediante una pantalla de tres dígitos y tres led’s, todos situados en su parte frontal. Los led’s están alineados en vertical y están rotulados, comenzando por el superior y hacia abajo estos indican: “EN SERVICIO”, “ARRANQUE” y “DISPARO”. Con la tapa puesta sólo el pulsador ENTER es accesible desde el exterior, esto para evitar que ocasionalmente se altere el ajuste del relé.

El relé puede encontrarse es dos situaciones:

Secuencia de Lecturas: proporciona información sobre el estado del relé, valores de las componentes simétricas, registros del último disparo, etc. Para su operación sólo se requiere el pulsador ENTER.

Secuencia de Ajustes: permite consultar y cambiar los ajustes de operación del relé, así como inhabilitar las unidades que se solicite; para lo cual se requiere intervenir en

los tres pulsadores, y para esto habrá que retirar necesariamente la tapa frontal del relé.

Además de estas secuencias, pueden realizarse dos operaciones con el teclado: Puesta a cero de Imagen Térmica y reset del relé. Se tratará con más detalle estas operaciones más adelante en las secciones: 4.7. y 4.8.

4.2. Inspección visual

Es de mucha importancia chequear visualmente el relé puesto que algún deterioro que se pase por alto podría repercutir en situaciones anómalas de funcionamiento de éste, para esto se debe considerar lo siguiente:

- Comprobar que el modelo indicado en la placa corresponde a los datos del pedido.
- Desembalar el relé y comprobar que no existan partes rotas y que no hay signos de que el relé haya sufrido deterioro durante el transporte.
- Comprobar mediante inspección visual que no haya indicios de que el relé ha estado en contacto con líquidos o humedad.

4.3. Consideraciones generales sobre la red de alimentación

Todos los dispositivos que funcionan con corriente alterna están influenciados por la frecuencia. Puesto que una forma de onda no senoidal es el resultado de una onda de

frecuencia fundamental más una serie de armónicos de esta onda fundamental, se deduce que los dispositivos que funcionan con corriente alterna (entre ellos los relés) están influenciados por la forma de onda aplicada, por lo tanto cuando se realicen las pruebas de recepción o instalación se deberá utilizar una red cuya forma de onda no contenga armónicos en el mayor grado posible, aunque para esto el relé cuenta con filtros electrónicos.

Los amperímetros y cronómetros utilizados para realizar las pruebas deben estar calibrados y su precisión debe ser igual o mejor que la del relé. La red utilizada en las pruebas debe permanecer estable, principalmente en los niveles próximos a la intensidad de arranque de pruebas así como durante el tiempo en el que el relé opera según la curva que se prueba.

Es importante destacar que la precisión con que se realicen las pruebas depende de la red de alimentación y de los instrumentos utilizados. Las pruebas funcionales realizadas con alimentación o instrumentos inadecuados son útiles para comprobar que el relé funciona correctamente; pero solamente para verificar sus características de forma aproximada

4.4. Pruebas y mantenimiento del relé digital

Los equipos de protección tienen una característica especial y es que durante el mayor tiempo de su vida útil permanecen sin operar, desde este punto de vista representa un problema las pruebas de las protecciones debido a que operan solamente en las fallas y en condiciones normales realizar una prueba no es necesariamente lo más realista.

Además algún defecto en el equipo de pruebas de protección puede pasar fácilmente inadvertido; por todo esto es esencial realizar un mantenimiento regular con el fin de evitar o predecir sus posibles fallas.

El equipo ideal de prueba de protecciones combina un confiable funcionamiento con su simplicidad, pero cuando hay imperativos económicos es necesario sacrificar la simplicidad por un mantenimiento más intenso, como es el ejemplo de los motores principales de una Central de generación de energía eléctrica.

Ahora se describen algunos principios guía que pueden aplicarse para las pruebas y mantenimiento:

Clasificación de las pruebas de relés

Principalmente las pruebas más importantes son para demostrar que:

1. El relé trabaja correctamente para despejar una falla; y
2. El relé permanezca inoperante ante fallas externas a su zona de protección.

Por lo tanto debe planificarse un programa de pruebas. En general las pruebas que deben efectuarse son las siguientes:

- I Pruebas de fábrica.
- II Pruebas de instalación.

III Pruebas periódicas de mantenimiento.

Pruebas de fábrica

Es responsabilidad del fabricante realizar pruebas antes de que el relé sea aceptado e instalado, estas pruebas consisten básicamente en inyección de corriente primaria y luego de inyección de corriente secundaria, todo esto mediante un banco de pruebas. Además el control de calidad en fábrica incluye muchas otras pruebas, que varían desde los materiales hasta los efectos del impacto y la vibración, la resistencia a la corrosión atmosférica, los efectos de la temperatura, el hermetismo de las cajas, etc.

Pruebas de instalación

Con estas pruebas se verifica el funcionamiento del equipo de protección bajo condiciones de falla, el objetivo principal es comprobar que el equipo está instalado correctamente y que esté listo para funcionar y dar el servicio que se espera.

Las pruebas de instalación que se efectúan en sitio de utilización pueden resumirse como sigue:

- a). Revisión del diagrama de conexiones eléctricas. Para esto son muy útiles los diagramas esquemáticos que indican números, bornes, etc.
- b). Realización de la inspección general del equipo, así como su estado físico.

- c). Medición de la resistencia de aislamiento y verificación de la continuidad de los cables. La resistencia de aislamiento de los circuitos de intensidad de entrada puede ser con 500 V. de corriente continua durante un minuto.
- d). Comprobación de los transformadores de corriente en cuanto a polaridad, relación de transformación, aislamiento y curva de magnetización.
- e). Comprobación de los transformadores de potencial (si los hubiere) en cuanto a polaridad, relación de transformación, aislamiento y secuencia de fases.
- f). Prueba e inyección de corriente secundaria.
- g). Verificación del equipo por inyección de corriente primaria para comprobar su comportamiento frente a fallas externas.
- h). Verificación de los circuitos de alarma y de disparo desde el relé hasta el panel de señalización.

Pruebas periódicas de mantenimiento

Luego de instalado el relé de protección es muy importante el mantenimiento periódico. Existen agentes que perjudicarían el normal funcionamiento del equipo como son por ejemplo: la humedad, el polvo, la corrosión de los conductores, alta resistencia entre los contactos de los relevadores. Debido a que estos equipos poco tiempo pasan en operación, tales problemas podrían presentarse y pasar

desapercibido, además que los cables de conexionado pueden aflojarse; entonces resulta muy importante realizar un mantenimiento periódico al relé.

Las pruebas de mantenimiento comprenden inspección general de las condiciones físicas del relé, revisión de conexionado, comprobación de fusibles, pruebas de inyección secundaria de los relés y pruebas de funcionamiento de circuito de disparo del interruptor del motor protegido, también se debe probar los circuitos para la indicación y alarma. Los programas de mantenimiento comprenden también los medios para el disparo ocasional de los disyuntores; porque al final de cuentas el objetivo es verificar que esté en perfectas condiciones el mecanismo de disparo de dichos disyuntores.

La programación y los registros de los datos de las pruebas es de gran importancia. En la hoja de vida del relé debe especificarse exactamente cada una de las pruebas e inspección que se requiere con sus respectivas fechas.

A continuación se da un programa de mantenimiento típico:

a). *Observación continua*. Los siguientes puntos deben realizarse de una manera continua, por lo tanto se requiere de una persona capacitada:

i). Supervisión de las indicaciones del panel frontal.

ii). Supervisor del voltaje de alimentación del relevador.

iii). Supervisión del circuito de alimentación.

Inspección diaria. Los led's y los indicadores de los relevadores deben realizarse en cada turno del personal de operación.

Una vez por semana. Verificación de bornes y cableado adyacente al relé para detectar posible sulfatación de los terminales y bornes, Supervisión del circuito del transformador de corriente, esto es que los cables no tengan daños e inspección visual de los aisladores de las barras alimentadoras a los motores.

Pruebas trimestrales. Pruebas de los canales de disparo sin actuar sobre ningún interruptor. Para esta prueba debe tenerse mucho cuidado.

Semestralmente. Inspección, pruebas de disparo del interruptor que maneja el relé, pruebas de la resistencia de aislamiento revisión de la conexión a tierra del relé y revisión y medición del sistema de alimentación del relé.

Anualmente. Pruebas de inyección secundaria y pruebas de la resistencia de aislamiento de terminales de bornes a masa, utilizando una tensión adecuada.

4.5. Secuencia de lecturas

Como se había mencionado anteriormente en la sección 4.1 el relé puede estar en secuencia de lecturas o en secuencia de ajustes, normalmente el relé se encuentra en secuencia de lecturas.

Cuando el relé se encuentra en secuencia de lecturas se pueden leer ocho funciones cada una de las cuales da una información diferente numeradas del 0 al 8 y precedidas de la letra F (función), las cuales se describen a continuación:

F0: Estado del relé mostrado en pantalla.

F1: Imagen térmica en tanto por ciento del valor de disparo.

F2: Intensidad de secuencia positiva mostrado en pantalla.

F3: Intensidad de secuencia negativa mostrado en pantalla.

F4: Intensidad de secuencia cero mostrado en pantalla.

F5: Código de unidad del relé que ha disparado.

F6: Intensidad de secuencia positiva que circulaba por el motor en el momento del disparo.

F7: Intensidad de secuencia negativa que circulaba por el motor en el momento del disparo.

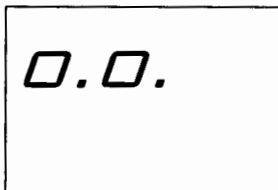
F8: Intensidad de secuencia cero que circulaba por el motor en el momento del disparo.

Normalmente el relé muestra la función F1. Para leer cualquiera de las otra funciones simplemente se presiona la tecla “ENTER” y se pasa de F1 a F2 y así sucesivamente, luego de F8 pasará nuevamente a F1.

A continuación se indica el detalle de cada una de las funciones:

F0 : Estado del relé

El estado del relé viene dado por un código de dos dígitos, situado a la izquierda de la pantalla. Para distinguirlo de otras lecturas, los dos puntos decimales correspondientes están encendidos. Así, un código de estado de 00 (lo cual indica que todo está correcto) se representa por:



Los códigos de estado del relé son:

00: Todo está correcto.

01: Fallo de ajustes. Los ajustes almacenados son incorrectos.

02: Error de funcionamiento. La medición de corriente es defectuosa.

08: Fallo generalizado.

80: Fallo de ROM. La memoria de programa ha fallado.

81: Fallo de escritura a EEPROM.

Los errores cuya primera cifra es 0 (cero) pueden ser corregir por el usuario. Los errores cuya primera cifra es un ocho indican fallos de la electrónica del relé y requieren que la reparación sea realizada por especialistas.

F1: Imagen térmica

Esta lectura proporciona el valor calculado de la imagen térmica en tanto por ciento respecto al valor de disparo. Cuando este valor llega a 100 se produce el disparo. La pantalla puede representar hasta un valor de 999. Si el cálculo de imagen térmica llegara al 1000%, sobrepasando así la capacidad de la pantalla, aparecerá el mensaje OFL (Overflow):



OFL

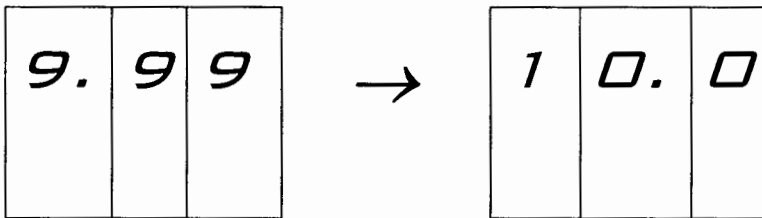
Este mensaje no significa que el valor interno de la imagen térmica no siga aumentando, solo que la pantalla ya no es capaz de representarlo. Cuando deje de

circular corriente, el valor tendrá que bajar de nuevo a 999 antes de que el mensaje OFL desaparezca.

Cuando la representación interna de la imagen térmica es mayor que el espacio destinado a almacenarla, su valor ya no se incrementa, sino que permanece bloqueado hasta que deja de circular corriente y comienza el enfriamiento.

F2: Intensidad de Secuencia Positiva

Esta lectura muestra la Intensidad de Secuencia Positiva que circula por el motor en cada momento en veces la toma (xI_s). La representación se hace con precisión variable, donde el número de decimales que muestra la pantalla depende del valor de la lectura. Como ejemplo, véase el paso de 9.99 a 10.0 veces la toma.



F3: Intensidad de Secuencia Negativa

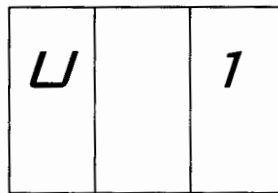
Esta lectura muestra la Intensidad de Secuencia Negativa que circula por el motor en cada momento en veces la toma (xI_s). La representación se hace con precisión variable, donde el número de decimales que muestra la pantalla depende del valor de la lectura.

F4: Intensidad de Secuencia Cero

Esta lectura muestra la Intensidad de Secuencia Cero que circula por el motor en cada momento en veces la toma de neutro (xI_{nGRN}). La representación se hace con precisión constante de dos decimales.

F5: Código de unidad asociada con el último disparo

Esta lectura muestra el código de la unidad que ha causado el último disparo. En caso de que más de una unidad haya ordenado disparar al relé, se registrará la primera que lo haya ordenado, la forma cómo se observa en la pantalla del relé esta indicación, por ejemplo un disparo por la unidad 1 (Imagen Térmica) es:



Como puede verse, a la izquierda aparece la letra U (Unidad), el dígito del centro está en blanco y en el de la derecha aparece el código de la unidad que ha disparado. Si no hubiese ninguna registrada, la pantalla mostraría U 0. Esta información, se conserva aunque al relé se le retire la tensión auxiliar y así podrá ser observada por el usuario cuando se le aplique nuevamente la tensión.

F6: Intensidad de Secuencia Positiva del último disparo

Esta lectura muestra la intensidad de Secuencia Positiva que circulaba por el motor cuando se produjo el último disparo en veces la toma (xI_s). La representación es la misma que la de F2 (Intensidad de Secuencia Positiva). Esta información se conserva aunque al relé se le retire la tensión auxiliar y así podrá ser observada por el usuario cuando se aplique nuevamente la tensión.

F7: Intensidad de secuencia negativa del último disparo

Esta lectura muestra la Intensidad de Secuencia Negativa que circulaba por el motor cuando se produjo el último disparo en veces la toma (xI_s). La representación es la misma de F3 (Intensidad de Secuencia Negativa). Esta información se conserva aunque al relé se le retire la tensión auxiliar y puede ser observada por el usuario cuando se aplique nuevamente la tensión.

F8: Intensidad de Secuencia Cero del último disparo

Esta lectura muestra la Intensidad de Secuencia Cero que circulaba por el motor cuando se produjo el último disparo en veces la toma de neutro (xI_{nGRN}). La representación es la misma de F4 (Intensidad de Secuencia Cero). Esta información se conserva aunque al relé se le retire la tensión auxiliar y puede ser observada por el usuario cuando se le aplique nuevamente la tensión.

En la secuencia de lecturas normalmente se muestra en la pantalla la lectura por defecto. Esta lectura puede ser una cualquiera entre F0 y F4. Cuando se aplica tensión

auxiliar al relé aparece en la pantalla la lectura por defecto, y a ella se vuelve automáticamente desde cualquier función de la Secuencia de Lecturas o de la Secuencia de Ajustes si transcurren dos minutos sin que se pulse ninguna tecla.

La selección de la lectura por defecto la realiza automáticamente el relé de acuerdo a las unidades de protección que estén activas. Para que la lectura asociada a una unidad sea la lectura por defecto, es preciso que todas las unidades con número inferior estén inhabilitadas.

Las lecturas asociadas a las unidades son:

Unidad	Lectura
1 (imagen térmica):	F1 (% de imagen térmica)
2 (secuencia positiva):	F2 (componente de secuencia positiva)
3 (secuencia negativa):	F3 (componente de secuencia negativa)
4 (falla a tierra):	F4 (componente homopolar)
5 (rotor bloqueado):	F2 (componente de secuencia positiva)
6 (intensidad mínima):	F2 (componente de secuencia positiva)
7 (número de arranques):	F2 (componente de secuencia positiva)

Por ejemplo, si la unidad 1 está activa, la unidad por defecto será F1, sin importar cómo estén las demás unidades. Si se desactiva esta unidad dando un valor cero al ajuste 1-2 y la unidad 2 está activa, la lectura por defecto será F2. Si las unidades 1, 2, y 3 están inactivas y la 4 activa, la lectura por defecto será F4, etc. Cuando todas las unidades están inactivas, la lectura por defecto es F0, estado del relé.

4.6. Secuencia de ajustes

La Secuencia de ajustes es el estado del relé en el cual se pueden modificar los ajustes de las distintas unidades de éste, así como habilitar o inhabilitar las unidades que se requiera. La secuencia de ajustes necesita el uso de los tres pulsadores frontales, por lo que necesariamente hay que retirar la tapa frontal del relé.

Si en cualquier punto de la secuencia de ajustes transcurren dos minutos sin que se pulse ninguna tecla, el relé volverá a la secuencia de lecturas, y dentro de ella a la lectura por defecto.

Para entrar en secuencia de ajustes se debe estar en secuencia de lecturas; es indiferente en que punto de ella se esté. La entrada se efectúa pulsando la tecla “-” mientras se mantiene pulsada “ENTER”, la operación con detalle es la siguiente: suponiendo que se está en F2 notando el valor de la componente de secuencia positiva, por ejemplo 1.25 veces la toma, la pantalla muestra el valor de la componente de secuencia positiva, 1.25 veces la toma. Ahora se pulsa “ENTER” y manteniéndola pulsada aparecerá el código de la siguiente función F3.

Estando en cualquier secuencia de lecturas, manteniendo pulsado "ENTER" se pulsa la tecla "-". La pantalla cambia y aparece la lectura 1-1. Esto es lo que se observará siempre que se entre a secuencia de ajustes. El número de la izquierda muestra la unidad y el de la derecha el ajuste. Así pues, 1-1 significa Unidad 1, ajuste 1; la unidad 1 es Imagen Térmica y el ajuste 1 es la constante de sobre valoración de la componente de secuencia negativa. Si se quiere ver o modificar el valor de ese ajuste se pulsa la tecla "ENTER" (sin mantener pulsado) y aparecerá el valor que en este momento tiene el ajuste, que para este caso se supone (por ejemplo) es 3. El valor del ajuste parpadeará. Siempre que en la pantalla aparezca el valor de un ajuste lo hará parpadeando.

Luego para salir de la secuencia de ajustes y por ende volver a la secuencia de lecturas se pulsán por un instante al mismo tiempo las teclas "+" y "-"; no importa en que orden se pulsén con tal que las dos estén pulsadas al mismo tiempo. Esto lleva nuevamente a la secuencia de lecturas, pero no al mismo punto por donde se entró. Siempre que se salga de la secuencia de ajustes se irá al estado normal del relé, es decir, la lectura por defecto. En este caso se ha supuesto que sea (por ejemplo) F1.

El relé consta de una unidad de configuración de la frecuencia y siete unidades de protección como se describe a continuación:

Como ejemplo, se programará la unidad de secuencia negativa como curva de tiempo inverso, con valor de corte de $0.3 \times I_s$ y dial 0.75. Se ha supuesto que el valor original del ajuste 3-4 era $0.2 \times I_s$ y el del ajuste 3-5 era 0.80.

Se entra en secuencia de ajustes de la forma ya explicada, con lo que aparecerá en pantalla 1-1. Este ejemplo requiere que se cambien los ajustes 3-1, 3-4, y 3-5. Para llegar a ellos, se pulsa repetidamente la tecla “+” hasta que aparezca en la pantalla el código que se desea, en este caso 3-1. La selección de ajustes es circular, de forma que si se pulsa “+” cuando se tiene en pantalla el último ajuste se pasa al primero, y si se pulsa “-” cuando se tiene en pantalla el primer ajuste se pasa al último.

Una vez con el ajuste 3-1 en pantalla, se pulsa “ENTER” y aparecerá, parpadeando, el valor del ajuste. Se supone que es 1, es decir, que está seleccionado el modo instantáneo. Para cambiarlo a 2 (curva) se pulsa la tecla “+”. En la pantalla aparecerá el valor 2. Para aceptarlo se pulsa “ENTER” y aparece automáticamente el código 3-1 de nuevo. Con esto el valor del valor 3-1 ha cambiado de 1 a 2.

Este proceso es el mismo para cualquier ajuste que se quiera cambiar. Seleccionar el código del ajuste que se quiera cambiar, cuando el código aparezca en la pantalla pulsar “ENTER” y aparecerá el valor actual del ajuste en la pantalla, con las teclas “+” y “-” se incrementa y disminuye respectivamente el valor del ajuste hasta que el valor deseado aparece en la pantalla. En ese momento se pulsa “ENTER” y el nuevo valor del ajuste es aceptado.

Si en la pantalla aparece el valor máximo permitido para ese ajuste, la pulsación de “+” no producirá ningún efecto. Lo mismo ocurriría si en la pantalla aparece el valor mínimo permitido para ese ajuste y se pulse la tecla “-”.

Si se mantiene pulsada la tecla “+” o la “-”, el valor del ajuste se incrementa o disminuye de forma automática cinco veces por segundo. Para evitar pulsaciones indeseables, la primera repetición tarda medio segundo en producirse.

Este mecanismo de incremento o decremento sólo funciona en el cambio del valor del ajuste, y no en la selección del código de ajuste. En la selección del código de ajuste hay que pulsar y soltar “+” o “-” para cada incremento o decremento del código.

Después de cambiar un ajuste, éste se actualiza en el momento en que se pulsa “ENTER”. Cuando un ajuste cambia, toda la unidad a la que pertenece se re inicializa. El resto de unidades no se ven afectadas por el cambio y siguen funcionando normalmente. Sin embargo, en el momento en que se pulsa “ENTER” todas las protecciones quedan “congeladas” en el estado en que se encuentren por el tiempo que se tarden en procesar el nuevo ajuste (entre 0.08 y 0.1 segundos). Una vez re inicializada la unidad correspondiente, todas se ponen en marcha nuevamente. El cambio de ajustes puede realizarse en cualquier momento, aunque se recomienda hacerlo con el motor fuera de servicio.

Si el valor del ajuste no ha variado la unidad no se re inicializa, aunque se hayan pulsado las teclas “+” y “-”.

La re inicialización de la unidad cuyos ajustes han cambiado es completa, incluyendo la eliminación del arranque o disparo si se hubiesen producido.

4.7. Puesta a cero de imagen térmica

El relé va dotado de un sistema para poner a cero la unidad de imagen térmica, permitiendo así que las pruebas se hagan para las curvas en frío. Para poner a cero la imagen térmica se debe estar en la secuencia de lecturas, en cualquier punto de ella, se pulsa “ENTER” aparecerá en la pantalla el código de la lectura que se trate, retirando la tapa frontal del relé y manteniendo pulsado “ENTER”, se pulsa al mismo tiempo la tecla “+”. La imagen térmica vuelve a cero y el relé vuelve a su estado fundamental, mostrando en la pantalla el valor de la lectura por defecto.

4.8. Reset del relé

La operación de RESET consiste en, estando en secuencia de lecturas, pulsar “ENTER” y mantenerlo pulsado durante tres segundos. Los efectos de esta operación son distintos según el relé esté operando normalmente o se encuentre en estado de error. Lo cual se describe a continuación:

El relé en operación normal:

El relé vuelve a la lectura por defecto, el led de DISPARO se apaga y las intensidades del último disparo se borran, excepto si en ese momento la salida de disparo está activa. En este caso, el RESET tiene el único resultado de volver a la lectura por defecto.

El relé en situación de error:

Cuando el relé detecta durante su operación un fallo de funcionamiento, muestra en la pantalla el código de error correspondiente con “parpadeo”, apaga el led de EN SERVICIO y activa la salida (led) de ALARMA DE EQUIPO (RELÉ). Si en estas condiciones se produce un RESET, el relé procederá a una re inicialización completa del software, permitiendo así reanudar el funcionamiento si las causas de error han desaparecido.

A continuación se exponen con detalle los códigos de error y su significado.

Código 01 - Error de ajustes

Al comienzo del programa, el relé carga los ajustes de EEPROM. Si los ajustes almacenados no pasan alguno de los controles a los que son sometidos por el propio relé, se produce un error de ajustes. Este error es reparable por el usuario, para lo cual se debe programar de nuevo todos los ajustes del relé.

Código 02 - Error de funcionamiento

Si este error se produce, muy probablemente el relé se habrá re inicializado por sí solo. En caso de que no lo haya hecho, el problema debería solucionarse con un RESET, o en el peor de los casos, apagando el relé y encendiéndolo de nuevo. Si tampoco así se consigue eliminar el error, el relé necesita reparación.

Código 08 - Fallo generalizado

Fallo general del software. Se aplican los mismos criterios que para el código 02 - (Error de funcionamiento) expuesto anteriormente, aunque se debe a causas distintas.

Código 80 - Fallo de ROM

El contenido de la memoria de programa se ha deteriorado. Es preciso reemplazarla.

Código 81 - Fallo de escritura EEPROM

La memoria no volátil se ha deteriorado y ya no es capaz de almacenar los ajustes. Es preciso reemplazarla.

CAPÍTULO 5

APLICACIÓN DE LOS RELÉS

Los relés digitales son muy útiles para la protección de motores especialmente para los que revisten mayor importancia en el proceso de generación termoeléctrica de la Central Trinitaria ya que protegen a éstos de muchas anomalías que se pudieren presentar por diferentes motivos sean estos internos o externos al motor.

Por otra parte, para un óptimo ajuste de los relés se consideran a continuación algunos criterios generales.

5.1. Criterios utilizados en el ajuste de las protecciones

Se considera conveniente utilizar para esta aplicación de los relés algunos criterios generales descritos a continuación:

- En general, se estima en un 5% el error suma correspondiente a relés de protección y transformadores de intensidad.
- La unidad cero (0) se ajustará a 60 Hz en todos los relés.
- No se considera el pico de corriente en el instante inicial, esto es aproximadamente 2 ciclos.
- Se consideran las características de rotor bloqueado para la protección del motor.

- Los elementos instantáneos se ajustan a 1.6 veces la I_{arr} (intensidad de arranque del motor), con el fin de cubrir los valores de tolerancia en el arranque del motor de inducción.
- La mínima intensidad de cortocircuito del sistema es 16056 Amp.
- El factor de sobrecarga de los motores (FS) se considera 1.0 por seguridad de los mismos.
- Los elementos instantáneos de secuencia negativa se ajustan inicialmente al mínimo valor posible del cálculo, y en caso necesario se subirá su ajuste al mínimo valor inmediato y que no produzca disparo en los arranques.
- La unidad de protección de mínima corriente se utiliza solamente en motores que accionan bombas para prevenir los daños que se producirían si éstas trabajan en vacío; por lo tanto no se la utilizará en protección de motores que accionan ventiladores.
- Para el ajuste de la unidad de imagen térmica la zona de disparo del relé debe estar por debajo de la sobrecarga admisible y a su vez por encima de la intensidad nominal del motor, de no cumplirse ambos prevalecerá lo primero.
- La constante de sobre valoración de la componente de secuencia negativa (K_I): se selecciona $K_I = 2$ en todos los casos ya que prácticamente no llega al 2% el desequilibrio de los valores de voltaje en el sistema.

- La constante de tiempo para enfriamiento a motor parado (τ_2): se toma $\tau_2 = 3 \times \tau_1$ debido a que según los datos prácticamente en todos los motores la constante de tiempo de enfriamiento es tres veces la de calentamiento.
- Se realiza solamente el cálculo de los ajustes de las protecciones de uno de cada equipo doble, dado que sus parámetros nominales son similares, por ejemplo son dos motor-bomba de agua de alimentación; sin embargo se realiza solamente el cálculo de uno. Entonces los ajustes de los relés de los equipos dobles serán los mismos.
- Para el ajuste de la unidad de secuencia cero se toma como referencia la corriente capacitiva a tierra del conjunto motor-cable de fuerza, lo cual para todos los casos es 0.06 Amp. como se describe en la sección 2.11.

5.2. Características de los elementos de protección del relé

Para la protección de motores alimentados con 4160 V se ha utilizado el relé de protección de motores modelo MMC-1001D19G01C fabricado por General Electric.

Este relé realiza las siguientes funciones básicas:

protección térmica (49)

Ajustable entre 0.4 y 1.55 veces I_n en escalones de $0.05 \times I_n$. Selección de curvas de funcionamiento en función de la constante de tiempo τ_1 , regulable entre 3 y 60 minutos, en escalones de 3 min.

Sobre valoración de la secuencia negativa K_I de 1 a 6 (adimensional).

Constante de tiempo de enfriamiento τ_2 ajustable de 1 a 6 veces la constante de tiempo de calentamiento.

Protección contra secuencia negativa (46)

Puede funcionar como instantáneo con temporización o según curva de tiempo inverso.

En modo instantáneo, permite un ajuste entre $0.5xI_s$ a $8xI_s$ con temporización de 0.05 a 10 seg. en pasos de 0.05 seg.

En modo de tiempo inverso, es ajustable según la familia de curvas de la figura 1-4-1 sección 1.4., con selección para valores de corte en el arranque entre $0.2 - 1.0xI_s$.

Protección contra fallas entre fases (50)

Ajustable entre 3 y 12 veces el valor elegido para la protección térmica, temporización ajustable entre 50 - 100 mseg., en pasos de 5 mseg.

Protección frente a fallas a tierra (51N)

Ajustable entre 0.06 y $0.24 I_{nGRN}$ en donde $I_{nGRN} = 1 \text{ Amp}$.

Temporización de 0.05 a 10 seg. ajustable en pasos de 0.05 seg.



Protección contra rotor bloqueado (51LR)

Ajustable entre 1 y 4 veces el valor elegido para el ajuste térmico en pasos de $0.05xI_s$.

Temporización entre 1 y 60 seg. en pasos de 1 seg.

Unidad de mínima corriente (37)

Ajustable entre 20 y 80% de la I_n con una temporización entre 0.1 y 10 seg. ajustable en pasos de 0.1 seg.

Unidad de protección contra arranques sucesivos (66)

Permite un número de arranques de 1 a 10 en un periodo de tiempo ajustable entre 10 y 100 min.

Tiempo de bloqueo al finalizar el número de arranques fijado, ajustable entre 10 y 100 min, en pasos de 1 min.

5.3. Funciones de los motores de mediana tensión de la Central Termoeléctrica Trinitaria

Motor-bomba de agua de alimentación "A" y "B".- Este grupo tiene como función la aportación de agua al domo de la caldera para la generación de vapor con la energía de presión necesaria para vencer las pérdidas hidráulicas del vapor durante su proceso de sobrecalentamiento a través de los bancos de tubos de caldera y realizar la expansión del mismo durante su paso a través de las etapas de la turbina.

Motor-bomba de agua de circulación "A" y "B".- Este grupo tiene por objetivo suministrar al condensador el caudal de agua necesario para la eliminación de la carga térmica (intercambio de calor vapor-líquido) que contiene el vapor de escape de turbina, con lo cual se produce su condensación.

Motor-bomba de agua de extracción de condensado "A" y "B".- Este grupo tiene la función de extraer el condensado del pozo del condensador y descargarlo con la presión necesaria para vencer las pérdidas hidráulicas durante su paso a través de los calentadores de baja presión del ciclo así como también aportar con el cabezal de descarga para elevar el fluido hasta el tanque de alimentación de agua a caldera, el cual está ubicado en la parte más alta de la sala de máquinas para garantizar el NPSH (Net Positive Suction Head - cabezal de succión positiva neta) requerido por la bomba de alimentación.

Motor-ventilador de tiro forzado "A" y "B".- Este grupo tiene como propósito tomar aire de la atmósfera y suministrarlo en una cantidad necesaria para lograr la combustión en el hogar de la caldera.

Motor-ventilador de recirculación de gases.- Este equipo tiene como finalidad controlar la temperatura de vapor recalentado cuando la Unidad está a bajas cargas mediante la inyección de gases calientes en la parte inferior del hogar modificando de esta manera la distribución de temperaturas dentro de la caldera mediante la disminución de la transferencia de calor por radiación ya que disminuye la temperatura del hogar e incrementando la transferencia de calor por convección

debido al incremento de temperatura de los gases en la zona del banco de tubos del recalentador de la caldera.

5.4. Configuración de los relés para protección de los motores de las bombas de agua de alimentación “A” y “B”

Cálculo de ajustes y configuración del relé

Tomando en cuenta los datos de la tabla 1 del apéndice D:

ajuste : UNIDAD 0

0-1: 60 Hz

Unidad de imagen térmica

– Usando las ecuaciones (2.3) y (2.4):

$$I_{sob} = \frac{575 \times 1.00}{1.05 \times \frac{600}{5} \times 5} = 0.913$$

$$I_m = \frac{575}{0.95 \times \frac{600}{5} \times 5} = 1.0088$$

$$I_m \leq I_s \leq I_{sob}$$

$$1.0088 \leq I_s \leq 0.913$$

El valor más conservador es $I_s = 0.90$

Para efectuar el ajuste de la constante de tiempo:

$$I = \frac{I_M}{R_{TI}} = \frac{575}{\frac{600}{5}} = 4.7917 \text{ Amp}$$

de la ecuación (2.5) y considerando la τ_I de la tabla 1 del apéndice D:

$$K = I^2 \times t = 4.7917^2 \times 45 \times 60 = 61993$$

de la ecuación (2.6)

$$I_{arrt} = 5.49 \times I_s \times I_n = 5.49 \times 0.9 \times 5 = 24.705$$

$$K_{180} = I_{arr}^2 \times t = 24.705^2 \times 6 = 3662$$

de la ecuación (2.7)

$$K/K_{180} = \tau / \tau_{180} = 61993/3662 = 16.92$$

la constante de tiempo a la que debe ajustarse el relé es 16.92 veces mayor que la mínima, luego:

$$\tau_1 = 16.92 \times 180 = 3046 \text{ seg} = 50.76 \text{ min}$$

el valor discreto de ajuste del relé, más próximo al valor calculado es $\tau_I = 51 \text{ min}$.

Los demás ajustes de la unidad térmica son:

- $K_I = 2.$

- $\tau_2 = 3 \times \tau_I$

Ajuste: UNIDAD 1

1-1:	2 (constante de sobre valoración de secuencia negativa)
1-2:	51 min. (constante de tiempo de calentamiento)
1-3:	$3 \times \tau_I$ (constante de tiempo de enfriamiento)

Protección contra fallas entre fases. Unidad de secuencia positiva (50)

De la ecuación (2.8):

$$I_1 < \frac{I_{cc \min} / 2}{R_{TI} \times I_n \times 1.05} = \frac{16056 / 2}{\frac{600}{5} \times 5 \times 1.05} = 12.74$$

$$I_1 > \frac{1.6 \times I_{arr}}{R_{TI} \times I_n \times 0.95} = \frac{1.6 \times 3157}{\frac{600}{5} \times 5 \times 0.95} = 8.86$$

Por tanto,

$$8.86 < I_1 < 12.74$$

como el ajuste de la unidad se realiza en número de veces la intensidad de ajuste de la unidad térmica, $I_s = 0.9$ luego,

$$9.84 \times I_s < I_1 < 14.16 \times I_s$$

se elige $I_1 = 10 \times I_s$, con una temporización de 50 mseg.

Ajuste: UNIDAD 2

2-1:	$10 \times I_s$ (arranque instantáneo)
2-2:	50 mseg. (temporización)

Protección contra arranque en monofásico. Unidad de secuencia negativa (46)

En este caso se elegirá el modo instantáneo, ajustando la protección al valor mínimo de ajuste como intensidad de arranque tal como se indica en la ecuación (2.11) $I_2 = 0.5 \times I_s$, y, como temporización 0.05 seg.

En este caso:

$$I_2 = 0.5 \times I_s = 0.5 \times 0.9 = 0.45$$

$$I_2 = 0.5 \times I_s \times R_{II} \times I_n = 0.5 \times 0.9 \times \frac{600}{5} \times 5 = 270 \text{ Amp}$$

Ajuste: UNIDAD 3

3-1:	1 (modo instantáneo)
3-2:	$0.5 \times I_s$ (arranque instantáneo)
3-3:	0.05 seg. (temporización)
3-5:	0 (modo de curva inhabilitada)

Protección contra fallas a tierra. Unidad de secuencia cero (51N).

Por lo descrito en la sección 2.11 y por la ecuación (2.9):

$$I_{ajus(pri)} = I_{ajus} \times r_{ti} = 0.06 \times 20/1 = 1.2 \text{ Amp}$$

$$I_{nGRN} = 1 \text{ Amp.}$$

I_{nGRN} : intensidad nominal del relé para protección de secuencia cero

$$I_0 > \frac{I_{ajus}}{I_{nGRN}} = \frac{0.06}{1} = 0.06$$

Se ajusta $I_0 = 0.06 \times I_{nGRN}$ temporizado a 0.05 seg.

Ajuste: UNIDAD 4

4-1:	0.06 (arranque instantáneo)
4-2:	0.05 seg. (temporización)

Protección contra rotor bloqueado y arranque excesivamente largo (51LR)

De la ecuación (2.10):

$$I_{sob} = \frac{I_M \times FS}{R_{TT} \times I_n \times 0.95} = \frac{575 \times 1.00}{\frac{600}{5} \times 5 \times 0.95} = 1.01$$

$$I_{arrR} = \frac{I_{arr}}{R_{TT} \times I_n \times 1.05} = \frac{3157}{\frac{600}{5} \times 5 \times 1.05} = 5.01$$

Por tanto,

$$1.01 < I_{RB} < 5.01$$

Como el ajuste de la unidad se realiza en el número de veces la intensidad de ajuste de la unidad térmica $I_s = 0.9$ luego,

$$1.12 \times I_s < I_{RB} < 5.57 \times I_s$$

se elige $I_{RB} = 1.2 \times I_s$, y $t_{RB} = 20$ seg.

Ajuste: UNIDAD 5

5-1:	$1.2 \times I_s$ (arranque instantáneo)
5-2:	20 seg. (temporización)

Protección contra descebado de bombas. Unidad de mínima intensidad (37)

Por lo descrito en la sección 2.14 y según la ecuación (2.12):

temporizado a 5 seg.

Ajuste: UNIDAD 6

6-1:	20 (arranque instantáneo)
6-2:	5 seg. (temporización)

Protección contra arranques demasiado frecuente. Unidad de control del número de arranques.

Ajuste periodo de tiempo en que se producen los arranques:

Tiempo total para el número de arranques = 30 min.

Número de arranques permisibles en este periodo = 1

Tiempo mínimo de activación del contacto de disparo (tiempo de bloqueo al nuevo arranque) = 30 min.

Ajuste: UNIDAD 7

7-1:	30 (ventana de tiempo)
7-2:	1 (número de arranques)
7-3:	30 (tiempo de bloqueo)

5.5. Configuración de los relés para protección de los motores de las bombas de agua de circulación "A" y "B"

Cálculo de ajustes y configuración del relé

Tomando en cuenta los datos de la tabla 2 del apéndice D:

ajuste : UNIDAD 0

0-1: 60 Hz

Unidad de imagen térmica

– Usando las ecuaciones (2.3) y (2.4):

$$I_{sob} = \frac{175.5 \times 1.00}{1.05 \times \frac{180}{5} \times 5} = 0.9286$$

$$I_m = \frac{175.5}{0.95 \times \frac{180}{5} \times 5} = 1.026$$

$$I_m \leq I_s \leq I_{sob}$$

$$1.026 \leq I_s \leq 0.9286$$

El valor más conservador es $I_s = 0.90$

Para efectuar el ajuste de la constante de tiempo:

$$I = \frac{I_M}{R_{Ti}} = \frac{175.5}{\frac{180}{5}} = 4.875 \text{ Amp}$$

de la ecuación (2.5) y considerando la τ_I de la tabla 2 del apéndice D:

$$K = I^2 \times t = 4.875^2 \times 45 \times 60 = 64167$$

de la ecuación (2.6)

$$I_{arr\tau} = 5.2 \times I_s \times I_n = 5.2 \times 0.9 \times 5 = 23.4$$

$$K_{180} = I_{arr}^2 \times t = 23.4^2 \times 7 = 3833$$

de la ecuación (2.7)

$$K/K_{180} = \tau / \tau_{180} = 64167/3833 = 16.74$$

la constante de tiempo a la que debe ajustarse el relé es 16.74 veces mayor que la mínima, luego:

$$\tau_1 = 16.74 \times 180 = 3013.2 \text{seg} = 50.22 \text{min}$$

el valor discreto de ajuste del relé, más próximo al valor calculado es $\tau_1 = 51 \text{ min.}$

Los demás ajustes de la unidad térmica son:

- $K_1 = 2.$
- $\tau_2 = 3 \times \tau_1$

Ajuste: UNIDAD 1

1-1:	2 (constante de sobre valoración de secuencia negativa)
1-2:	51 min. (constante de tiempo de calentamiento)

1-3:	$3 \times \tau_I$ (constante de tiempo de enfriamiento)
------	---

Protección contra fallas entre fases. Unidad de secuencia positiva (50)

De la ecuación (2.8):

$$I_1 < \frac{I_{cc \min} / 2}{R_{TI} \times I_n \times 1.05} = \frac{16056/2}{\frac{180}{5} \times 5 \times 1.05} = 42.48$$

$$I_1 > \frac{1.6 \times I_{arr}}{R_{TI} \times I_n \times 0.95} = \frac{1.6 \times 912.6}{\frac{180}{5} \times 5 \times 0.95} = 8.54$$

Por tanto,

$$8.54 < I_1 < 42.48$$

como el ajuste de la unidad se realiza en número de veces la intensidad de ajuste de la unidad térmica, $I_s = 0.9$ luego,

$$9.49 \times I_s < I_1 < 47.2 \times I_s$$

se elige $I_I = 10 \times I_s$, con una temporización de 50 mseg.

Ajuste: UNIDAD 2

2-1:	$10 \times I_s$ (arranque instantáneo)
2-2:	50 mseg. (temporización)

Protección contra arranque en monofásico. Unidad de secuencia negativa (46)

En este caso se elegirá el modo instantáneo, ajustando la protección al valor mínimo de ajuste como intensidad de arranque tal como se indica en la ecuación (2.11) $I_2 = 0.5 \times I_s$ y, como temporización 0.05 seg.

En este caso:

$$I_2 = 0.5 \times I_s = 0.5 \times 0.9 = 0.45$$

$$I_2 = 0.5 \times I_s \times R_{II} \times I_n = 0.5 \times 0.9 \times \frac{180}{5} \times 5 = 81 \text{ Amp}$$

Ajuste: UNIDAD 3

3-1:	1 (modo instantáneo)
3-2:	$0.5 \times I_s$ (arranque instantáneo)
3-3:	0.05 seg. (temporización)

3-5:	0 (modo de curva inhabilitada)
------	--------------------------------

Protección contra fallas a tierra. Unidad de secuencia cero (51N).

Por lo descrito en la sección 2.11 y por la ecuación (2.9):

$$I_{ajus(pri)} = I_{ajus} \times r_{ti} = 0.06 \times 20/1 = 1.2 \text{ Amp}$$

$$I_{nGRN} = 1 \text{ Amp.}$$

I_{nGRN} : intensidad nominal del relé para protección de secuencia cero

$$I_0 > \frac{I_{ajus}}{I_{nGRN}} = \frac{0.06}{1} = 0.06$$

Se ajusta $I_0 = 0.06 \times I_{nGRN}$ temporizado a 0.05 seg.

Ajuste: UNIDAD 4

4-1:	0.06 (arranque instantáneo)
4-2:	0.05 seg. (temporización)

Protección contra rotor bloqueado y arranque excesivamente largo (51LR)

De la ecuación (2.10):

$$I_{sob} = \frac{I_M \times FS}{R_{TI} \times I_n \times 0.95} = \frac{175.5 \times 1.00}{\frac{180}{5} \times 5 \times 0.95} = 1.026$$

$$I_{arrR} = \frac{I_{arr}}{R_{TI} \times I_n \times 1.05} = \frac{912.6}{\frac{180}{5} \times 5 \times 1.05} = 4.83$$

Por tanto,

$$1.026 < I_{RB} < 4.83$$

Como el ajuste de la unidad se realiza en el número de veces la intensidad de ajuste de la unidad térmica $I_s = 0.9$ luego,

$$1.14 \times I_s < I_{RB} < 5.37 \times I_s$$

se elige $I_{RB} = 1.2 \times I_s$, y $t_{RB} = 50$ seg.

Ajuste: UNIDAD 5

5-1:	1.2 x I_s (arranque instantáneo)
5-2:	50 seg. (temporización)

Protección contra descebado de bombas. Unidad de mínima intensidad (37)

Por lo descrito en la sección 2.14 y según la ecuación (2.12):

temporizado a 5 seg.

Ajuste: UNIDAD 6

6-1:	20 (arranque instantáneo)
6-2:	5 seg. (temporización)

Protección contra arranques demasiado frecuente. Unidad de control del número de arranques.

Ajuste periodo de tiempo en que se producen los arranques:

Tiempo total para el número de arranques = 10 min.

Número de arranques permisibles en este periodo = 2

Tiempo mínimo de activación del contacto de disparo (tiempo de bloqueo al nuevo arranque) = 100 min.

Ajuste: UNIDAD 7

7-1:	10 (ventana de tiempo)
7-2:	2 (número de arranques)
7-3:	100 (tiempo de bloqueo)

5.6. Configuración de los relés para protección de los motores de las bombas de agua de extracción de condensado “A” y “B”

Cálculo de ajustes y configuración del relé

Tomando en cuenta los datos de la tabla 3 del apéndice D:

ajuste : UNIDAD 0

0-1: 60 Hz

Unidad de imagen térmica

– Usando las ecuaciones (2.3) y (2.4):

$$I_{sob} = \frac{47.1 \times 1.00}{1.05 \times \frac{75}{5} \times 5} = 0.60$$

$$I_m = \frac{47.1}{0.95 \times \frac{75}{5} \times 5} = 0.661$$

$$I_m \leq I_s \leq I_{sob}$$

$$0.661 \leq I_s \leq 0.60$$

El valor más conservador es $I_s = 0.60$

Para efectuar el ajuste de la constante de tiempo:

$$I = \frac{I_M}{R_{TI}} = \frac{47.1}{75/5} = 3.14 \text{ Amp}$$

de la ecuación (2.5) y considerando la τ_I de la tabla 3 del apéndice D:

$$K = I^2 \times t = 3.14^2 \times 40 \times 60 = 23663$$

de la ecuación (2.6)

$$I_{arr\tau} = 5.45 \times I_s \times I_{nr} = 5.45 \times 0.6 \times 5 = 16.35$$

$$K_{180} = I_{arr}^2 \times t = 16.35^2 \times 6 = 1604$$

de la ecuación (2.7)

$$K/K_{180} = \tau / \tau_{180} = 23663/1604 = 14.75$$

la constante de tiempo a la que debe ajustarse el relé es 14.75 veces mayor que la mínima, luego:

$$\tau_1 = 14.75 \times 180 = 2655 \text{seg} = 44.25 \text{ min}$$

el valor discreto de ajuste del relé, más próximo al valor calculado es $\tau_1 = 45 \text{ min.}$

Los demás ajustes de la unidad térmica son:

- $K_1 = 2.$
- $\tau_2 = 3 \times \tau_1$

Ajuste: UNIDAD 1

1-1:	2 (constante de sobre valoración de secuencia negativa)
1-2:	45 min. (constante de tiempo de calentamiento)
1-3:	$3 \times \tau_1$ (constante de tiempo de enfriamiento)

Protección contra fallas entre fases. Unidad de secuencia positiva (50)

De la ecuación (2.8):

$$I_1 < \frac{I_{cc\min}/2}{R_{TI} \times I_n \times 1.05} = \frac{16056/2}{\frac{75}{5} \times 5 \times 1.05} = 101.94$$

$$I_1 > \frac{1.6 \times I_{arr}}{R_{TI} \times I_n \times 0.95} = \frac{1.6 \times 257}{\frac{75}{5} \times 5 \times 0.95} = 5.77$$

Por tanto,

$$5.77 < I_1 < 101.94$$

como el ajuste de la unidad se realiza en número de veces la intensidad de ajuste de la unidad térmica, $I_s = 0.6$ luego,

$$9.62 \times I_s < I_1 < 169.9 \times I_s$$

se elige $I_1 = 10 \times I_s$, con una temporización de 50 mseg.

Ajuste: UNIDAD 2

2-1:	$10 \times I_s$ (arranque instantáneo)
2-2:	50 mseg. (temporización)

Protección contra arranque en monofásico. Unidad de secuencia negativa (46)

En este caso se elegirá el modo instantáneo, ajustando la protección al valor mínimo de ajuste como intensidad de arranque tal como se indicó en la ecuación (2.11) $I_2 = 0.5 \times I_s$ y, como temporización 0.05 seg.

En este caso:

$$I_2 = 0.5 \times I_s = 0.5 \times 0.6 = 0.30$$

$$I_2 = 0.5 \times I_s \times R_{TI} \times I_n = 0.5 \times 0.6 \times \frac{75}{5} \times 5 = 22.5 \text{ Amp}$$

Ajuste: UNIDAD 3

3-1:	1 (modo instantáneo)
3-2:	$0.5 \times I_s$ (arranque instantáneo)
3-3:	0.05 seg. (temporización)
3-5:	0 (modo de curva inhabilitada)

Protección contra fallas a tierra. Unidad de secuencia cero (51N).

Por lo descrito en la sección 2.11 y por la ecuación (2.9):

$$I_{ajus(pri)} = I_{ajus} \times r_{fi} = 0.06 \times 20/1 = 1.2 \text{ Amp}$$

$$I_{nGRN} = 1 \text{ Amp.}$$

I_{nGRN} : intensidad nominal del relé para protección de secuencia cero

$$I_0 > \frac{I_{ajus}}{I_{nGRN}} = \frac{0.06}{1} = 0.06$$

Se ajusta $I_0 = 0.06 \times I_{nGRN}$ temporizado a 0.05 seg.

Ajuste: UNIDAD 4

4-1:	0.06 (arranque instantáneo)
4-2:	0.05 seg. (temporización)

Protección contra rotor bloqueado y arranque excesivamente largo (51LR)

De la ecuación (2.10):

$$I_{sob} = \frac{I_M \times FS}{R_{TI} \times I_n \times 0.95} = \frac{47.1 \times 1.00}{\frac{75}{5} \times 5 \times 0.95} = 0.661$$

$$I_{arrR} = \frac{I_{arr}}{R_{TI} \times I_n \times 1.05} = \frac{257}{\frac{75}{5} \times 5 \times 1.05} = 3.263$$

Por tanto,

$$0.661 < I_{RB} < 3.263$$

Como el ajuste de la unidad se realiza en el número de veces la intensidad de ajuste de la unidad térmica $I_s = 0.6$ luego,

$$1.102 \times I_s < I_{RB} < 5.44 \times I_s$$

se elige $I_{RB} = 1.2 \times I_s$, y $t_{RB} = 35$ seg.

Ajuste: UNIDAD 5

5-1:	1.2 x I_s (arranque instantáneo)
5-2:	35 seg. (temporización)

Protección contra descebado de bombas. Unidad de mínima intensidad (37)

Por lo descrito en la sección 2.14 y según la ecuación (2.12):

temporizado a 5 seg.

Ajuste: UNIDAD 6

6-1:	20 (arranque instantáneo)
------	---------------------------

6-2:	5 seg. (temporización)
------	------------------------

Protección contra arranques demasiado frecuente. Unidad de control del número de arranques.


Ajuste periodo de tiempo en que se producen los arranques:

Tiempo total para el número de arranques = 10 min.

Número de arranques permisibles en este periodo = 2

Tiempo mínimo de activación del contacto de disparo (tiempo de bloqueo al nuevo arranque) = 100 min.

Ajuste: UNIDAD 7

7-1:	10 (ventana de tiempo)	
7-2:	2 (número de arranques)	
7-3:	100 (tiempo de bloqueo)	

5.7. Configuración de los relés para protección de los motores de los ventiladores de tiro forzado “A” y “B”

Cálculo de ajustes y configuración del relé

Tomando en cuenta los datos de la tabla 4 del apéndice D:

ajuste : UNIDAD 0

0-1: 60 Hz

Unidad de imagen térmica

– Usando las ecuaciones (2.3) y (2.4):

$$I_{sob} = \frac{169.8 \times 1.00}{1.05 \times \frac{200}{5} \times 5} = 0.8086$$

$$I_m = \frac{169.8}{0.95 \times \frac{200}{5} \times 5} = 0.894$$

$$I_m \leq I_s \leq I_{sob}$$

$$0.894 \leq I_s \leq 0.8086$$

El valor más conservador es $I_s = 0.80$

Para efectuar el ajuste de la constante de tiempo:

$$I = \frac{I_M}{R_{TI}} = \frac{169.8}{200/5} = 4.245 \text{ Amp}$$

de la ecuación (2.5) y considerando la τ_I de la tabla 4 del apéndice D:

$$K = I^2 \times t = 4.245^2 \times 44 \times 60 = 47573$$

de la ecuación (2.6)

$$I_{arr\tau} = 4.60 \times I_s \times I_n = 4.60 \times 0.8 \times 5 = 18.4$$

$$K_{180} = I_{arr}^2 \times t = 18.4^2 \times 9.5 = 3216$$

de la ecuación (2.7)

$$K/K_{180} = \tau / \tau_{180} = 47573/3216 = 14.79$$

la constante de tiempo a la que debe ajustarse el relé es 14.79 veces mayor que la mínima, luego:

$$\tau_1 = 14.79 \times 180 = 2662 \text{ seg} = 44.37 \text{ min}$$

el valor discreto de ajuste del relé, más próximo al valor calculado es $\tau_I = 45 \text{ min}$.

Los demás ajustes de la unidad térmica son:

- $K_I = 2$.

$$- \tau_2 = 3 \times \tau_1$$

Ajuste: UNIDAD 1

1-1:	2 (constante de sobre valoración de secuencia negativa)
1-2:	45 min. (constante de tiempo de calentamiento)
1-3:	$3 \times \tau_1$ (constante de tiempo de enfriamiento)

Protección contra fallas entre fases. Unidad de secuencia positiva (50)

De la ecuación (2.8):

$$I_1 < \frac{I_{cc\min}/2}{R_{TI} \times I_n \times 1.05} = \frac{16056/2}{\frac{200}{5} \times 5 \times 1.05} = 38.23$$

$$I_1 > \frac{1.6 \times I_{arr}}{R_{TI} \times I_n \times 0.95} = \frac{1.6 \times 781.1}{\frac{200}{5} \times 5 \times 0.95} = 6.58$$

Por tanto,

$$6.58 < I_1 < 38.23$$

como el ajuste de la unidad se realiza en número de veces la intensidad de ajuste de la unidad térmica, $I_s = 0.8$ luego,

$$8.22 \times I_s < I_1 < 47.79 \times I_s$$

se elige $I_1 = 9 \times I_s$, con una temporización de 50 mseg.

Ajuste: UNIDAD 2

2-1:	9 x I_s (arranque instantáneo)
2-2:	50 mseg. (temporización)

Protección contra arranque en monofásico. Unidad de secuencia negativa (46)

En este caso se elegirá el modo instantáneo, ajustando la protección al valor mínimo de ajuste como intensidad de arranque tal como se indica en la ecuación (2.11) $I_2 = 0.5 \times I_s$ y, como temporización 0.05 seg.

En este caso:

$$I_2 = 0.5 \times I_s = 0.5 \times 0.8 = 0.40$$

$$I_2 = 0.5 \times I_s \times R_{T1} \times I_n = 0.5 \times 0.8 \times \frac{200}{5} \times 5 = 80 \text{ Amp}$$

Ajuste: UNIDAD 3

3-1:	1 (modo instantáneo)
------	----------------------

3-2:	$0.5 \times I_s$ (arranque instantáneo)
3-3:	0.05 seg. (temporización)
3-5:	0 (modo de curva inhabilitada)

Protección contra fallas a tierra. Unidad de secuencia cero (51N).

Por lo descrito en la sección 2.11 y por la ecuación (2.9):

$$I_{ajus(pri)} = I_{ajus} \times r_{ti} = 0.06 \times 20/1 = 1.2 \text{ Amp}$$

$$I_{nGRN} = 1 \text{ Amp.}$$

I_{nGRN} : intensidad nominal del relé para protección de secuencia cero

$$I_0 > \frac{I_{ajus}}{I_{nGRN}} = \frac{0.06}{1} = 0.06$$

Se ajusta $I_0 = 0.06 \times I_{nGRN}$ temporizado a 0.05 seg.

Ajuste: UNIDAD 4

4-1:	0.06 (arranque instantáneo)
4-2:	0.05 seg. (temporización)

Protección contra rotor bloqueado y arranque excesivamente largo (51LR)

De la ecuación (2.10):

$$I_{sob} = \frac{I_M \times FS}{R_{TI} \times I_n \times 0.95} = \frac{169.8 \times 1.00}{\frac{200}{5} \times 5 \times 0.95} = 0.894$$

$$I_{arrR} = \frac{I_{arr}}{R_{TI} \times I_n \times 1.05} = \frac{781.1}{\frac{200}{5} \times 5 \times 1.05} = 3.72$$

Por tanto,

$$0.894 < I_{RB} < 3.72$$

Como el ajuste de la unidad se realiza en el número de veces la intensidad de ajuste de la unidad térmica $I_s = 0.8$ luego,

$$1.12 \times I_s < I_{RB} < 4.65 \times I_s$$

se elige $I_{RB} = 1.2 \times I_s$, y $t_{RB} = 30$ seg.

Ajuste: UNIDAD 5

5-1:	$1.2 \times I_s$ (arranque instantáneo)
5-2:	30 seg. (temporización)

Protección contra arranques demasiado frecuente. Unidad de control del número de arranques.

Ajuste periodo de tiempo en que se producen los arranques:

Tiempo total para el número de arranques = 10 min.

Número de arranques permisibles en este periodo = 2

Tiempo mínimo de activación del contacto de disparo (tiempo de bloqueo al nuevo arranque) = 100 min.

Ajuste: UNIDAD 7

7-1:	10 (ventana de tiempo)
7-2:	2 (número de arranques)
7-3:	100 (tiempo de bloqueo)

5.8. Configuración del relé para protección del motor del ventilador de recirculación de gases

Cálculo de ajustes y configuración del relé

Tomando en cuenta los datos de la tabla 5 del apéndice D:

ajuste : UNIDAD 0

0-1: 60 Hz

Unidad de imagen térmica

– Usando las ecuaciones (2.3) y (2.4):

$$I_{sob} = \frac{31.6 \times 1.00}{1.05 \times \frac{75}{5} \times 5} = 0.401$$

$$I_m = \frac{31.6}{0.95 \times \frac{75}{5} \times 5} = 0.444$$

$$I_m \leq I_s \leq I_{sob}$$

$$0.444 \leq I_s \leq 0.401$$

El valor más conservador es $I_s = 0.40$

Para efectuar el ajuste de la constante de tiempo:

$$I = \frac{I_M}{R_{TI}} = \frac{31.6}{75/5} = 2.11 \text{ Amp}$$

de la ecuación (2.5) y considerando la τ_I de la tabla 5 del apéndice D:

$$K = I^2 \times t = 2.11^2 \times 40 \times 60 = 10685$$

de la ecuación (2.6)

$$I_{arrt} = 5.26 \times I_s \times I_n = 5.26 \times 0.4 \times 5 = 10.52$$

$$K_{180} = I_{arr}^2 \times t = 10.52^2 \times 7 = 775$$

de la ecuación (2.7)

$$K/K_{180} = \tau / \tau_{180} = 10685/775 = 13.79$$

la constante de tiempo a la que debe ajustarse el relé es 13.79 veces mayor que la mínima, luego:

$$\tau_1 = 13.79 \times 180 = 2482.2 \text{ seg} = 41.37 \text{ min}$$

el valor discreto de ajuste del relé, más próximo al valor calculado es $\tau_1 = 42 \text{ min}$.

Los demás ajustes de la unidad térmica son:

- $K_I = 2$.
- $\tau_2 = 3 \times \tau_1$

Ajuste: UNIDAD 1

1-1:	2 (constante de sobre valoración de secuencia negativa)
------	---

1-2:	42 min. (constante de tiempo de calentamiento)
1-3:	3 x τ_l (constante de tiempo de enfriamiento)

Protección contra fallas entre fases. Unidad de secuencia positiva (50)

De la ecuación (2.8):

$$I_1 < \frac{I_{cc\min}/2}{R_{Tl} \times I_n \times 1.05} = \frac{16056/2}{\frac{75}{5} \times 5 \times 1.05} = 101.94$$

$$I_1 > \frac{1.6 \times I_{arr}}{R_{Tl} \times I_n \times 0.95} = \frac{1.6 \times 166.2}{\frac{75}{5} \times 5 \times 0.95} = 3.73$$

Por tanto,

$$3.73 < I_1 < 101.94$$

como el ajuste de la unidad se realiza en número de veces la intensidad de ajuste de la unidad térmica, $I_s = 0.4$ luego,

$$9.325 \times I_s < I_1 < 254.85 \times I_s$$

se elige $I_l = 10 \times I_s$, con una temporización de 50 mseg.

Ajuste: UNIDAD 2

2-1:	$10 \times I_s$ (arranque instantáneo)
2-2:	50 mseg. (temporización)

Protección contra arranque en monofásico. Unidad de secuencia negativa (46)

En este caso se elegirá el modo instantáneo, ajustando la protección al valor mínimo de ajuste como intensidad de arranque tal como se indica en la ecuación (2.11) $I_2 = 0.5 \times I_s$ y, como temporización 0.05 seg.

En este caso:

$$I_2 = 0.5 \times I_s = 0.5 \times 0.4 = 0.20$$

$$I_2 = 0.5 \times I_s \times R_{II} \times I_n = 0.5 \times 0.4 \times \frac{75}{5} \times 5 = 15 \text{ Amp}$$

Ajuste: UNIDAD 3

3-1:	1 (modo instantáneo)
3-2:	$0.5 \times I_s$ (arranque instantáneo)
3-3:	0.05 seg. (temporización)

3-5:	0 (modo de curva inhabilitada)
------	--------------------------------

Protección contra fallas a tierra. Unidad de secuencia cero (51N).

Por lo descrito en la sección 2.11 y por la ecuación (2.9):

$$I_{ajus(pri)} = I_{ajus} \times r_{ti} = 0.06 \times 20/1 = 1.2 \text{ Amp}$$

$$I_{nGRN} = 1 \text{ Amp.}$$

I_{nGRN} : intensidad nominal del relé para protección de secuencia cero

$$I_0 > \frac{I_{ajus}}{I_{nGRN}} = \frac{0.06}{1} = 0.06$$

Se ajusta $I_0 = 0.06 \times I_{nGRN}$ temporizado a 0.05 seg.

Ajuste: UNIDAD 4

4-1:	0.06 (arranque instantáneo)
4-2:	0.05 seg. (temporización)

Protección contra rotor bloqueado y arranque excesivamente largo (51LR)

De la ecuación (2.10):

$$I_{sob} = \frac{I_M \times FS}{R_{TI} \times I_n \times 0.95} = \frac{31.6 \times 1.00}{\frac{75}{5} \times 5 \times 0.95} = 0.44$$

$$I_{arrR} = \frac{I_{arr}}{R_{TI} \times I_n \times 1.05} = \frac{166.2}{\frac{75}{5} \times 5 \times 1.05} = 2.11$$



Por tanto,

$$0.44 < I_{RB} < 2.11$$

Como el ajuste de la unidad se realiza en el número de veces la intensidad de ajuste de la unidad térmica $I_s = 0.4$ luego,

$$1.1 \times I_s < I_{RB} < 5.275 \times I_s$$

se elige $I_{RB} = 1.2 \times I_s$, y $t_{RB} = 55$ seg.

Ajuste: UNIDAD 5

5-1:	$1.2 \times I_s$ (arranque instantáneo)
5-2:	55 seg. (temporización)

Protección contra arranques demasiado frecuente. Unidad de control del número de arranques.

Ajuste periodo de tiempo en que se producen los arranques:

Tiempo total para el número de arranques = 10 min.

Número de arranques permisibles en este periodo = 2

Tiempo mínimo de activación del contacto de disparo (tiempo de bloqueo al nuevo arranque) = 100 min.

Ajuste: UNIDAD 7

7-1:	10 (ventana de tiempo)
7-2:	2 (número de arranques)
7-3:	100 (tiempo de bloqueo)

5.9. Resumen de ajustes de los relés de protección de los motores de mediana tensión de la Central Termoeléctrica Trinitaria

Ajustes:		Motor de bomba de agua de alimentación	Motor de bomba de agua de circulación	Motor de bomba de extracción de condensado	Motor de ventilador de tiro forzado	Motor de ventilador de recirculación de gases
		Is	0.9	0.9	0.6	0.8
Unidades/Cualidades						
Frecuencia Industrial de trabajo (red)						
0-1	Hz	60	60	60	60	60
Protección de Imagen Térmica						
1-1	K1	2	2	2	2	2
1-2	minutos	51	51	45	45	42
1-3	veces t1 (tau 1)	3	3	3	3	3
Protección contra fallas entre fases						
2-1	veces Is	10	10	10	9	10
2-2	mseg	50	50	50	50	50
Protección contra secuencia negativa						
3-1	modo operac.: 1 inst. / 2 curva	1	1	1	1	1
3-2	veces Is	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
3-3	seg	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05
3-4	veces Is (corte)	inhabilitada	inhabilitada	inhabilitada	inhabilitada	inhabilitada
3-5	dial	0	0	0	0	0
Protección contra fallas a tierra						
4-1	veces InGRN	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06
4-2	seg	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05
Protección contra rotor bloqueado						
5-1	veces Is	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2
5-2	seg	20	50	35	30	55
Protección contra mínima intensidad						
6-1	% Is	20	20	20	0	0
6-2	seg	5	5	5	inhabilitada	inhabilitada
Protección del número de arranques						
7-1	ventana de tiempo	30	10	10	10	10
7-2	número de arranques	1	2	2	2	2
7-3	tiempo de bloqueo	30	100	100	100	100

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Resulta primordial salvaguardar a los motores de las máquinas principales de las centrales de generación termoeléctrica, esto lleva a poner más énfasis en la selección de los relés de protecciones eléctricas que van a realizar esta tarea.

Aunque los relés electrónicos digitales presentan ciertas desventajas frente a los relés electromagnéticos convencionales como son: la dependencia de una fuente auxiliar de alimentación (batería interna), dependencia de la confiabilidad de un mayor número de pequeños componentes electrónicos, baja capacidad de sobrecarga en un tiempo corto, variación de las características operativas con la temperatura y con el paso de los años; los relés electrónicos digitales expuestos en la presente Tesis presentan grandes ventajas como son: respuesta rápida dada su característica digital, alta resistencia al choque y a las vibraciones, rápido restablecimiento y ausencia de sobredisparo ya que no existe la inercia mecánica, poco mantenimiento, bajo consumo de energía, método eficiente para calcular la curva térmica de calentamiento del motor, etc.; a todo esto sumado un cuidadoso estudio para sus correspondiente ajustes y pruebas funcionales, para luego implementar y ejecutar un buen programa de supervisión y mantenimiento dará como resultado gran confiabilidad y protección a los motores.

Utilizar un modelo térmico para la protección de motores trifásicos de inducción presenta ventajas sobre la protección que utiliza las curvas tiempo-corriente ya que en

este último método de protección la curva térmica límite del motor es variable y difícil de determinar.

Los relés que se utilizan para proteger a los motores aquí expuestos utilizan un modelo térmico que toma en cuenta los procesos de calentamiento durante el arranque considerando la temperatura inicial, régimen de funcionamiento normal, régimen de carga variable y constante, desequilibrios de tensiones, situaciones de arranque-paro y el proceso de enfriamiento que resulta de la desconexión del motor; con todo esto la curva térmica del motor será más exacta y por lo tanto más discriminatoria la actuación del relé. Para este modelo térmico el relé utiliza un algoritmo que procesa los valores reales eficaces de corrientes y voltajes.

Estos relés electrónicos-digitales proporcionan protecciones a los motor tales como: protección térmica, cortocircuitos entre fases, cortocircuitos entre fases y tierra, protección contra rotor bloqueado, protección contra desequilibrio o inversión de intensidades, protección de mínima intensidad y control del número de arranques con lo cual está cubierto un amplio campo de situaciones perjudiciales para un motor eléctrico. Cabe indicar que para la protección de número de arranques permitidos en un tiempo determinado se ha seguido lo recomendado por el fabricante del motor, y los motores en los que el fabricante no indica ninguna recomendación al respecto el ajuste se lo ha realizado acorde a las necesidades operativas de la Central, claro está sin tratar de afectar al motor.

Los motores a proteger en la Central son trifásicos de inducción a 4160 volts, sin embargo estos relés sirven también para otros tipos de motores eléctricos. A pesar que el relé de protección cuenta con un sistema de fácil manipulación para su correspondiente ajuste debe hacerlo el personal asignado a esta labor los cuales deben ser preferiblemente ingenieros o tecnólogos debidamente capacitados.

En el sistema de protecciones se utiliza el método de dos transformadores de corriente en las fases R y T, pero lo más recomendable es contar con un sistema de mediciones con un transformador de corriente en cada fase; no obstante la fase S cuenta con un instrumento analógico de medición de corriente con lo cual de alguna manera se tiene un control del comportamiento del amperaje en esta fase.

Los protocolos de pruebas en fábrica por supuesto que deben ser exigidos para luego realizar las pruebas de funcionamiento en sitio, para esto último los equipos para realizar las pruebas como cronómetros o fuentes de alimentación deben ser lo más precisos posible a pesar que los relés no necesitan coordinación de protecciones entre ellos.

Se debe tener extremo cuidado al realizar el mantenimiento de los relés que impliquen desconexiones ya que un error en la reconexión puede repercutir en la pérdida del motor y además todo el peligro que implica el que un relé de protección eléctrica no actúe en una central de generación de energía.

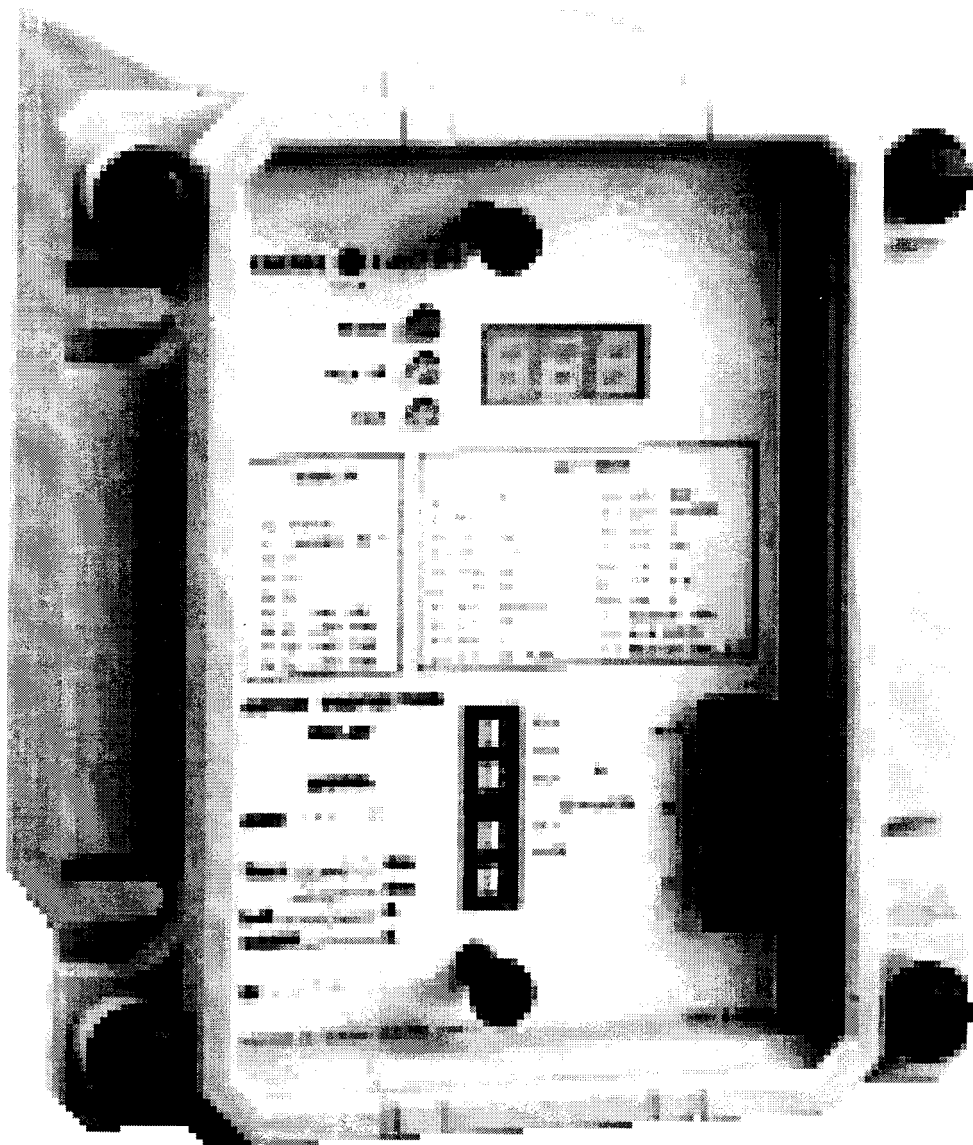
Se recomienda por último, tener siempre energizado con alimentación auxiliar confiable (tensión segura) al relé de protección eléctrica aquí expuesto a pesar que el

motor al que protege se encuentre fuera de servicio; o si se ha tenido desenergizado por un largo periodo de tiempo al relé se deben revisar sus ajustes nuevamente.

APÉNDICES

APÉNDICE A:

Presentación del relé



APÉNDICE B:

Valores a ingresar en los diferentes ajustes de las unidades del relé

Unidad 0: configuración de frecuencia de trabajo de la red (50 ò 60 Hz.)

Ajuste 0-1: *ingresar valor*

Unidad 1: Imagen térmica

Ajuste 1-1: *ingresar valor*

Ajuste 1-2: *ingresar valor*

Ajuste 1-3: *ingresar valor*

Unidad 2: Instantáneo de secuencia positiva

Ajuste 2-1: *ingresar valor*

Ajuste 2-2: *ingresar valor*

Unidad 3: Secuencia negativa

Ajuste 3-1: *ingresar valor*

Ajuste 3-2: *ingresar valor*

Ajuste 3-3: *ingresar valor*

Ajuste 3-4: *ingresar valor*

Ajuste 3-5: *ingresar valor*

Unidad 4: Instantáneo de secuencia cero

Ajuste 4-1: *ingresar valor*

Ajuste 4-2: *ingresar valor*

Unidad 5: Rotor bloqueado

Ajuste 5-1: *ingresar valor*

Ajuste 5-2: *ingresar valor*

Unidad 6: Mínima intensidad

Ajuste 6-1: *ingresar valor*

Ajuste 6-2: *ingresar valor*

Unidad 7: Control del número de arranques

Ajuste 7-1: *ingresar valor*

Ajuste 7-2: *ingresar valor*

Ajuste 7-3: *ingresar valor*

APÉNDICE C:

Diagrama trifilar y de protecciones típico de los motores de mediana tensión de la Central Termoeléctrica Trinitaria

APÉNDICE D:

Tablas de datos característicos de los motores y máquinas a proteger

Tabla 1

Datos de la bomba de agua de alimentación

Fabricante:	INGERSOLL- DRESSER
Tipo:	SEGMENTOS MULTI ETAPAS (10)
Modelo:	6x14WxH-10
Caudal de bombeo:	505 m ³ /h
Altura manométrica:	2040 mcl
Peso específico relativo del agua a 167°C:	0.9122 Kg/dm ³
Velocidad nominal:	3580 rpm.

Datos del motor de la bomba de agua de alimentación

Marca:	AEG, Alemania
Potencia nominal:	3615 KW
Voltaje nominal:	4160 V. en estrella
Corriente nominal:	575.0 Amp.
Velocidad nominal:	3588 rpm
Factor de potencia:	0.92
Eficiencia:	96.5%
Frecuencia:	60 Hz
Torque de salida:	9616 Nm
Peso aproximado:	12000 Kg
Intensidad de arranque ($5.49 \times I_n$):	3157 Amp.
Tiempo de arranque:	10 seg.
Tiempo de rotor bloqueado:	20 seg.
Factor de servicio:	1.00
Constante de tiempo térmica de calentamiento:	45 min
Constante de tiempo térmica de enfriamiento:	130 min
Mínima intensidad de cortocircuito que circula a través del transformador de protección (eficaz simétrica) para cortocircuito trifásico en bornes del motor:	16056 Amp.
Transformador de intensidad de fase:	600/5 Amp
Transformador de intensidad toroidal:	20/1 Amp
Sección del cable de alimentación:	2x(3x300) mm ²

Tabla 2

Datos de la bomba de agua de circulación

Fabricante:	SULZER, S.A., ESPAÑA
Tipo:	VERTICAL, POZO HÚMEDO Y SEMI AXIAL
Modelo:	BS900-1S/002
Caudal:	12492 m ³ /h
Altura dinámica total:	2040 m.c.l.
Peso específico relativo del agua:	1.02
Velocidad nominal:	510 rpm

Datos del motor de la bomba de agua de circulación

Marca:	AEG, Alemania
Potencia nominal:	850 KW
Voltaje nominal:	4160 V. en estrella
Corriente nominal:	175.5 Amp
Velocidad nominal:	511 rpm
Factor de potencia:	0.702
Eficiencia:	94.8%
Frecuencia:	60 Hz
Torque de salida:	15717.1 Nm
Peso aproximado:	9150 Kg
Intensidad de arranque ($5.2 \times I_n$):	912.6 Amp
Tiempo de arranque:	3 seg.
Tiempo de rotor bloqueado:	50 seg.
Factor de servicio:	1.00
Constante de tiempo térmica de calentamiento:	45 min
Constante de tiempo térmica de enfriamiento:	130 min
Mínima intensidad de cortocircuito que circula a través del transformador de protección (eficaz simétrica) para cortocircuito trifásico en bornes del motor:	16056 Amp
Transformador de intensidad de fase:	180/5 Amp
Transformador de intensidad toroidal:	20/1 Amp
sección cable de alimentación:	3x120 mm ²

Tabla 3

Datos de la bomba de extracción de condensado

Fabricante:	SULZER, S.A., ESPAÑA
Tipo:	2/8x12x18AVCR-3
Modelo:	VERTICAL, CENTRÍFUGA DE TRES ETAPAS DE SIMPLE ASPIRACIÓN
Caudal:	383 m ³ /h
Altura dinámica total:	167 m.c.l.
Peso específico relativo del agua:	1
Velocidad nominal:	1775 rpm.

Datos del motor de la bomba de extracción de condensado

Marca:	AEG, Alemania
Potencia nominal:	280 KW
Voltaje nominal:	4160 V. en estrella
Corriente nominal:	47.1 Amp
Velocidad nominal:	1790 rpm.
Factor de potencia:	0.86
Eficiencia:	94.8 %
Frecuencia:	60 Hz
Torque de salida:	1483.3 Nm
Peso aproximado:	2000 Kg
Intensidad de arranque ($5.45 \times I_n$):	257 Amp
Tiempo de arranque:	4 seg.
Tiempo de rotor bloqueado:	35 seg.
Factor de servicio:	1.00
Constante de tiempo térmica de calentamiento:	40 min.
Constante de tiempo térmica de enfriamiento:	110 min.
Mínima intensidad de cortocircuito que circula a través del transformador de protección (eficaz simétrica) para cortocircuito trifásico en bornes del motor:	16056 Amp
Transformador de intensidad de fase:	75/5 Amp
Transformador de intensidad toroidal:	20/1 Amp
sección cable de alimentación:	3x120 mm ²

Tabla 4

Datos del ventilador de tiro forzado

Fabricante:	ABB Solyvent Ventec S.A.
Tipo:	DM L IA 153 3TD8A
Referencia:	95 70 1669
Caudal a la aspiración:	261640 m ³ /h
Presión estática en la aspiración:	Atmosférica
Presión estática en la impulsión:	1030 m.m.c.a.
Velocidad nominal:	1780 rpm.

Datos del motor del ventilador de tiro forzado

Marca:	AEG, Alemania
Potencia nominal:	1022 KW
Voltaje nominal:	4160 V. en estrella
Corriente nominal:	169.8 Amp
Velocidad nominal:	1790 rpm.
Factor de potencia:	0.87
Eficiencia:	96.2%
Frecuencia:	60 Hz
Torque de salida:	5467.1 Nm
Peso aproximado:	4600 Kg
Intensidad de arranque ($4.60 \times I_n$):	781.1 Amp
Tiempo de arranque:	13 seg.
Tiempo de rotor bloqueado:	30 seg.
Factor de servicio:	1.00
Constante de tiempo térmica de calentamiento:	44 min.
Constante de tiempo térmica de enfriamiento:	120 min.
Mínima intensidad de cortocircuito que circula a través del transformador de protección (eficaz simétrica) para cortocircuito trifásico en bornes del motor:	16056 Amp
Transformación de intensidad de fase:	200/5 Amp
Transformación de intensidad toroidal:	20/1 Amp
Sección del cable de alimentación:	3x120 mm ²

Tabla 5

Datos del ventilador de recirculación de gases

Fabricante:	ABB Solyvent Ventec S.A.
Tipo:	FN 151 3TD8A
Referencia:	95 70 1669
Ventilador:	FN TD 151 3T8A
Caudal a la aspiración:	185760 m ³ /h
Presión estática en la aspiración:	115 m.m.c.a.
Presión estática en la impulsión:	360 m.m.c.a..
Velocidad nominal:	1180 rpm.

Datos del motor del ventilador de recirculación de gases

Marca:	AEG, Alemania
Potencia nominal:	185 KW
Voltaje nominal:	4160 V. en estrella
Corriente nominal:	31.6 Amp
Velocidad nominal:	1188 rpm.
Factor de potencia:	0.85
Eficiencia:	93.9%
Frecuencia:	60 Hz
Torque de salida:	1461.8 Nm
Peso aproximado:	1800 Kg
Intensidad de arranque ($5.26 \times I_n$):	166.2 Amp
Tiempo de arranque:	21 seg.
Tiempo de rotor bloqueado:	55 seg.
Factor de servicio:	1.00
Constante de tiempo térmica de calentamiento:	40 min
Constante de tiempo térmica de enfriamiento:	105 min
Mínima intensidad de cortocircuito que circula a través del transformador de protección (eficaz simétrica) para cortocircuito trifásico en bornes del motor:	16056 Amp
Transformador de intensidad de fase:	75/5 Amp
Transformador de intensidad toroidal:	20/1 Amp
Sección cable de alimentación:	3x120 mm ²

BIBLIOGRAFÍA

BABCOCK WILCOX ESPAÑOLA, Manual de Instrucciones y Mantenimiento de la Central Termoeléctrica Trinitaria, tomos 413, 414 y 418.

BERROSTEGUIETA, JAIME, Manual de Introducción a los Transformadores de Medida, Artech.

CORTES, MANUEL, Curso Moderno de Máquinas Eléctricas, Editores Técnicos Asociados S.A., Barcelona-España, 1970.

CHAPMAN, STEPHEN, Máquinas Eléctricas, McGraw-Hill.

ENRÍQUEZ HARPER, GILBERTO, Fundamentos de Protección de Sistemas Eléctricos por Relevadores, LIMUSA, 1984.

FINK, DONALD; WAYNE BEATY, H., Manual de Ingeniería Eléctrica, McGraw-Hill, XIII Edición, 1995, tomo No. III.

GENERAL ELECTRIC POWER MANAGEMENT, Instructions Manual GEK 98844B Microprocessor Based Motor Protective Modular Relays MMC series 1000.

LIWSCHITZ, MICHAEL, Máquinas de Corriente Alterna, CECSA.

MONTANÉ, PAULINO, Protecciones de las Instalaciones Eléctricas, Marcombo, 1988.

RAMÍREZ VÁZQUEZ, JOSÉ, Protección de Sistemas Eléctricos contra Sobre Intensidades, Biblioteca CEAC de Electricidad, Tercera Edición.

RAVINDRANATH, B.; CHANDER, M., Protección de Sistemas de Potencia e Interruptores, LIMUSA, 1989.

SMEATON, ROBERT, Motores Eléctricos, Selección, Mantenimiento y Reparación, McGraw-Hill, Segunda Edición, 1995.