

CAPITULO 3

PROTECCIONES DE SOBRECORRIENTE

3.1. Introducción

Uno de los fenómenos más comunes que se presentan durante las anomalías en un sistema eléctrico de potencia y en especial en los cortocircuitos, es el aumento de la corriente por sobre los valores normales de operación. Este aumento se utiliza para discriminar la ocurrencia de fallas, ya sea como protección principal o de respaldo y el relé se denomina de sobrecorriente. Es uno de los sistemas más simples y se usa ampliamente, especialmente en alimentadores radiales de distribución (10 a 25 kV en Chile) y transformadores de poca potencia (hasta 4 MVA). Como protección de respaldo se usa en equipos más importantes dentro del SEP, tales como: generadores, transformadores de mayor potencia, líneas de media tensión, etc.

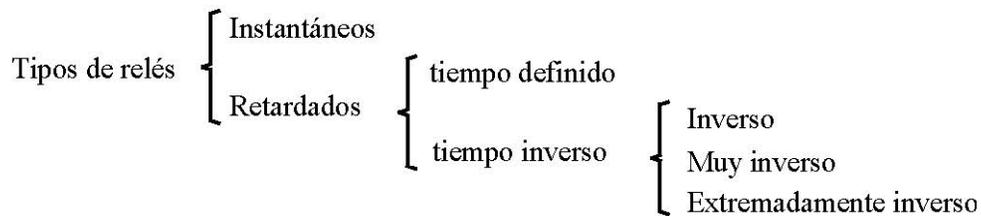
El funcionamiento de un relé de sobrecorriente es simple ya que su operación depende de dos variables básicas:

- El nivel de corriente mínima de operación (o corriente de pick-up), que es aquel valor que produce el cambio de estado del relé.
- La característica de tiempo de operación, es decir la forma en que el relé responde en cuanto al tiempo.

3.2. Características de operación

De acuerdo a la característica de tiempo de operación, los relés pueden clasificarse, en general, tal como se muestra en el cuadro 3.1 siguiente:

Cuadro 3.1.- Tipos de relés según su característica de tiempo de operación



Estas características quedan definidas en forma aproximada por las siguientes expresiones:

$$\begin{aligned} \text{Instantáneos: } & t = 0 \text{ para } I \geq I_{op} \\ \text{Tiempos definidos } & t = K \text{ para } I \geq I_{op} \\ \text{Tiempos inversos } & t = K / I \\ \text{Tiempos muy inversos } & t = K / I^2 \\ \text{Tiempos extremadamente inversos } & t = K / I^3 \end{aligned} \quad (3.1)$$

Lo anterior es en la realidad una aproximación, ya que; para el caso de los relés electromecánicos, por ejemplo, en la forma de las curvas tienen mucha influencia elementos tales como: el resorte de reposición, la inercia de las partes móviles, imanes permanentes de freno, etc., de manera que en la

práctica se obtienen curvas como las indicadas en la Figura 3.1.

Para los relés de estado sólido, es posible conseguir una variedad más amplia de curvas, las que además pueden ser expresadas matemáticamente, como se verá más adelante.

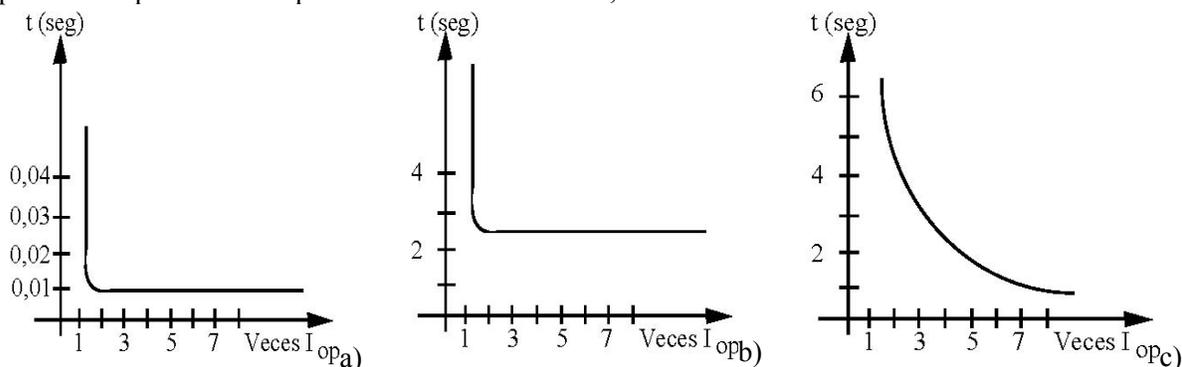


Figura 3.1.- Curvas de tiempo corriente de relés: a) Instantáneo; b) Tiempo definido; c) Tiempo inverso

3.3. Aspectos constructivos y de funcionamiento

Se incluye aquí una breve descripción de los diversos tipos de relé de sobrecorriente, más empleados.

3.3.1. Protecciones de sobrecorriente instantáneas

Estos relés, como unidades aisladas, se usan poco en los sistemas eléctricos de potencia. Generalmente se utilizan en conjunto con otras protecciones, con el fin de combinar sus características. Se construyen del tipo de armadura succionada, armadura atraída y copa de inducción. El torque de estos elementos responde a una expresión del tipo KI^2 . Los tiempos de operación son del orden de los 10 a los 60 milisegundos. La característica de operación, especialmente en los elementos tipo copa de inducción, corresponde a la curva mostrada en la Figura 3.1 a).

3.3.2. Protecciones de sobrecorriente de tiempo definido

Una protección simple de tiempo definido podría obtenerse usando un relé instantáneo en conjunto con un elemento temporizador (T) que produzca el retardo necesario, (Figura 3.2). Sin embargo, en la práctica se utiliza muy poco una solución en base a elementos independientes, sino que se usa un relé del tipo disco de inducción cuya curva sea muy poco inversa, de modo que pueda llamarse de tiempo definido. De todas maneras, en este tipo de relé el tiempo se define para 10 veces la corriente de operación, en adelante. Esta característica de operación se consigue utilizando una unidad de medida cuyo núcleo se satura rápidamente. En los relés de estado sólido se utiliza un elemento comparador que actúa a través de un temporizador. El relé opera solo si la sobrecorriente se mantiene durante el tiempo necesario. En caso contrario, el relé se repone.

3.3.3. Protecciones de sobrecorriente de tiempo inverso

La principal características de este tipo de relés es que mientras mayor sea la corriente aplicada, menor es su tiempo de operación. Este principio da origen a una variedad de relés con diversas características de tiempo de operación y pequeñas diferencias de diseño eléctricas y

mecánicas. En el caso de los de tipo electromecánico, el relé está basado en una unidad de medida de disco de inducción, ya sea del tipo de espira en cortocircuito o wattmétrica, tal como las descritas en el Capítulo 2.

a. Relé tipo disco de inducción

El relé IAC51B de la General Electric que se muestra en la Figura 3.3 es de tipo disco de inducción con espiras en cortocircuito. El disco del relé está montado sobre un eje que es retenido por un resorte espiral cuya tensión puede regularse, permitiendo el ajuste de corriente mínima de operación. El contacto móvil está sujeto al disco de modo que gira junto con éste y cierra su circuito a través del espiral. El contacto fijo está montado sobre la armazón metálica del relé; el torque de operación es producido por la unidad electromagnética y en frente de ésta se encuentra ubicado un imán permanente que actúa como freno para el disco, una vez que éste se encuentra en movimiento, sustituyendo en cierta forma al resorte espiral, que en estas condiciones prácticamente no tiene ningún efecto. La posición de reposo del disco está definida por un tope movable que permite variar la separación inicial entre los contactos fijo y móvil, los cuales determinan un ángulo β entre sí. El ajuste de la separación de los contactos, es decir del ángulo β (Figura 3.4), se acostumbra denominarlo "LEVER". Las distintas posiciones dan origen a una familia de curvas de tiempos de operación del relé que pueden ser seleccionadas por medio de una rueda numerada o dial de tiempo (time dial) que va desde 1 ó 0,5 a 10 en los relés Americanos y desde 0,1 (0,05) a 1 en los Europeos. La corriente de operación del relé se ajusta utilizando las tomas o tap adecuados de la unidad electromagnética. La posición del imán permanente también es posible de ajustar e influye sobre la curva de tiempos de operación.

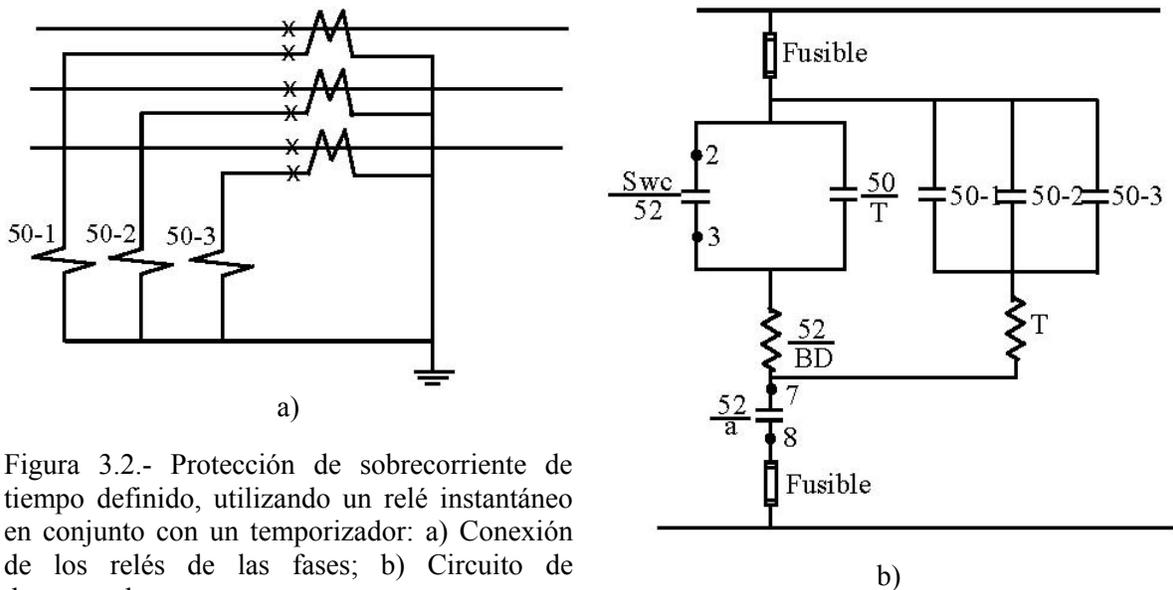


Figura 3.2.- Protección de sobrecorriente de tiempo definido, utilizando un relé instantáneo en conjunto con un temporizador: a) Conexión de los relés de las fases; b) Circuito de desenganche

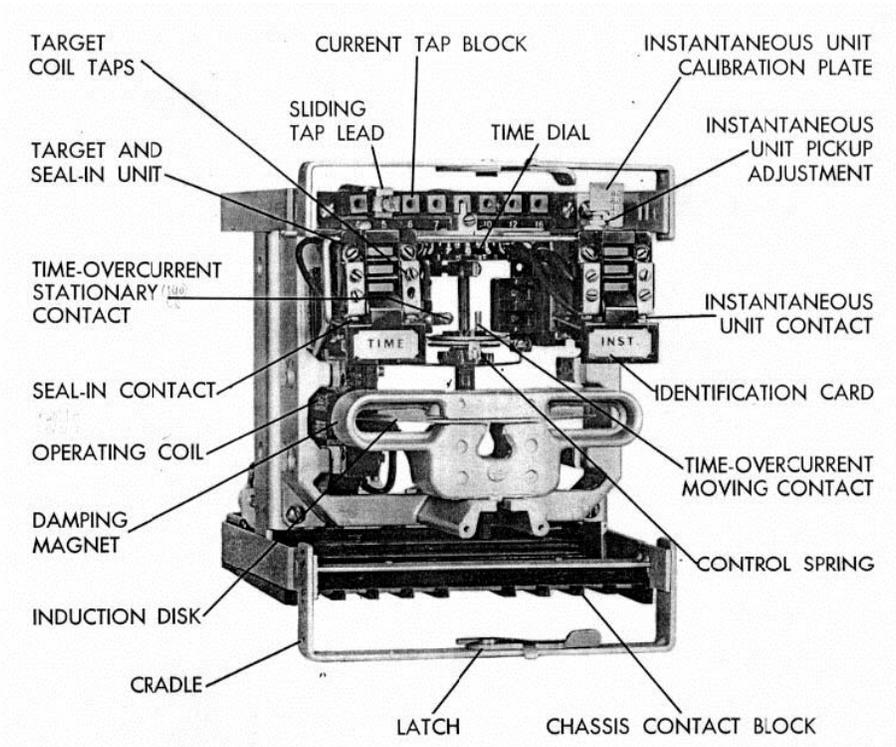


Figura 3.3.- Relé de sobrecorriente IAC51B de la General Electric

Para obtener la ecuación de tiempo versus corriente, se considerará la Figura 3.4 que muestra la disposición del disco móvil y los diferentes elementos que contribuyen al torque del relé. Por otra parte, en la Figura 3.5 se muestra el esquema de la estructura magnética con la bobina principal y la espira en cortocircuito, así como el diagrama fasorial que muestra los flujos que producen el torque de operación o torque motriz.

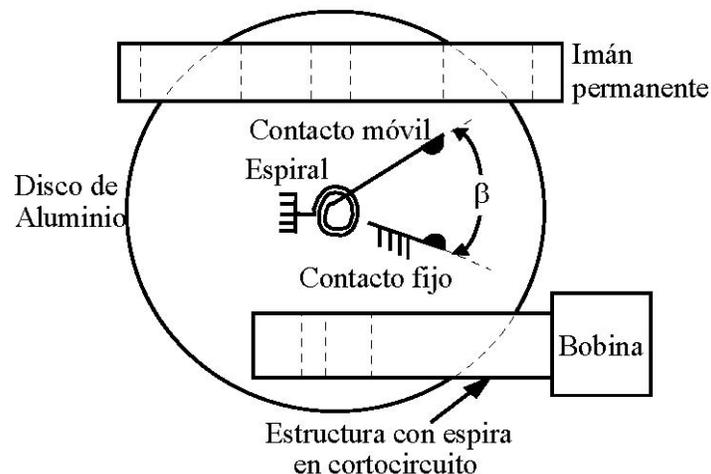


Figura 3.4.- Esquema del elemento comparador de un relé tipo espira en cortocircuito

Según lo visto en el Capítulo 2 (Ecuación 2.42), el torque de operación o motriz, T_M es de la forma:

$$T_M = K \Phi_1 \Phi_2 \sin \alpha \quad (3.2)$$

Donde Φ_1 y Φ_2 (valores máximos de los flujos), dependen del número de espiras N y de la corriente I . Además, tal como se muestra en la Figura 3.5, el ángulo de desfase α entre los flujos es constante y por lo tanto se puede escribir:

$$T_M = K_M (NI)^2 = K_M N^2 I^2 = a I^2 \quad (3.3)$$

Donde $a = K_M N^2$ es constante para un número determinado de espiras de la bobina

El imán permanente proporciona un torque de retención T_F que se supone proporcional a la velocidad del disco ω , a través de una constante b , que considera la densidad de flujo B del imán, que es constante

$$(3.4) \quad T_F = b \omega$$

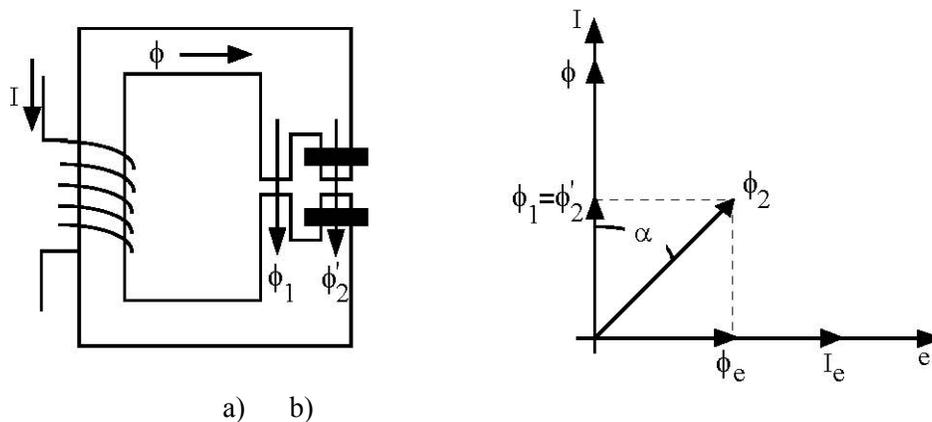


Figura 3.5.- Relé de inducción de espira en cortocircuito: a) Estructura magnética; b) Diagrama fasorial

El resorte antagonico suministra un torque de retención T_R que se puede suponer constante, o sea:

$$T_R = c \quad (3.5)$$

Luego, el Torque T que opera sobre el disco, es:

$$T = T_M - T_F - T_R = J \frac{d\omega}{dt} \quad (3.6)$$

Donde J es el momento de inercia de las partes móviles. La solución de la ecuación diferencial (3.6) es de la forma:

$$\omega(t) = \frac{a I^2 - c}{b} \left[1 - e^{-\frac{b}{J}t} \right] \quad (3.7)$$

Si, como ocurre normalmente J es pequeño comparado con b (por diseño), se puede despreciar el segundo término del paréntesis de la ecuación (3.7) (el transiente es muy rápido), por lo que se puede escribir:

$$\omega(t) = \frac{a I^2 - c}{b} = \frac{d\beta}{dt} = \text{constante} \quad (3.8)$$

Cuya solución, suponiendo que en $t=0$, $\beta=0$ es:

$$\beta(t) = \frac{a I^2 - c}{b} t \quad (3.9)$$

Que, considerando que c/b es muy pequeño, queda:

$$t = \frac{b\beta/a}{I^2} \quad (3.10)$$

Como el ángulo β de operación es un parámetro que se varía con el dial (LEVER), entonces, para cada LEVER se tiene:

$$t = \frac{K}{I^2} \quad (3.11)$$

Con $K = b \beta/a$ y donde “a” incluye a N y “b” incluye a B, que es la densidad de flujo producida por el imán permanente.

La expresión (3.11) corresponde a la de una hipérbola equilátera, que sólo tiene significado en el primer cuadrante, ya que corresponde a la disposición constructiva en que el torque del elemento móvil tiende a cerrar los contactos.

Si se considera el ángulo β como parámetro, se obtiene una familia de curvas como la que se muestra en la Figura 3.6, donde $\beta_1 < \beta_2 < \beta_3$.

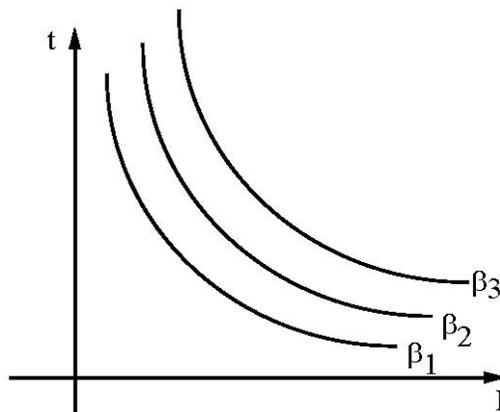


Figura 3.6.- Curvas de tiempo versus corriente para relés tipo disco de inducción

Si se varía el nivel de torque del comparador y se varía también la densidad de flujo B del imán permanente y la cantidad de espiras N, se pueden obtener las diferentes curvas características

que se muestran en la Figura 3.7, las que se denominan: Inversa, Muy inversa y Extremadamente inversa.

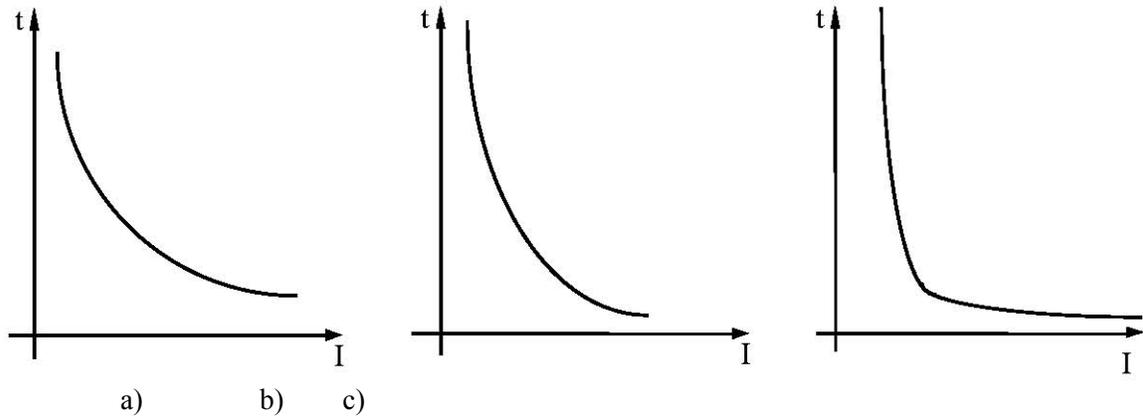


Figura 3.7.- Curvas características tiempo-corriente de relés inversos: a) Inverso; b) muy inverso; c) extremadamente inverso

En la práctica, las curvas características de estos relés se dibujan considerando el tiempo en función de veces la corriente mínima de operación (corriente de pick-up), en vez de la corriente en amperes. Esto se debe a que, según la expresión (3.3), el torque de operación depende en realidad, de los amperes-vueltas NI del relé y por lo tanto, si el número de espiras del relé se cambia, lo que es posible, ya que el relé tiene tap, entonces cambia el valor de la corriente mínima de operación. De esta forma, basta con dibujar una familia de curvas que represente todas las características de operación del relé para los distintos LEVER.

La Figura 3.8 muestra una familia de curvas del relé de tiempo inverso IAC de la General Electric.

b. Protecciones de sobrecorriente de tiempo inverso con desenganche alterno

En el Capítulo 2, al clasificar los circuitos de control de interruptores de poder, se vio el principio de operación esta protección. En la Figura 2.52 se muestra este tipo de esquema, en donde, como se aprecia, la misma corriente de falla en términos secundarios, que hace operar el relé, energiza la bobina de desenganche del interruptor de poder.

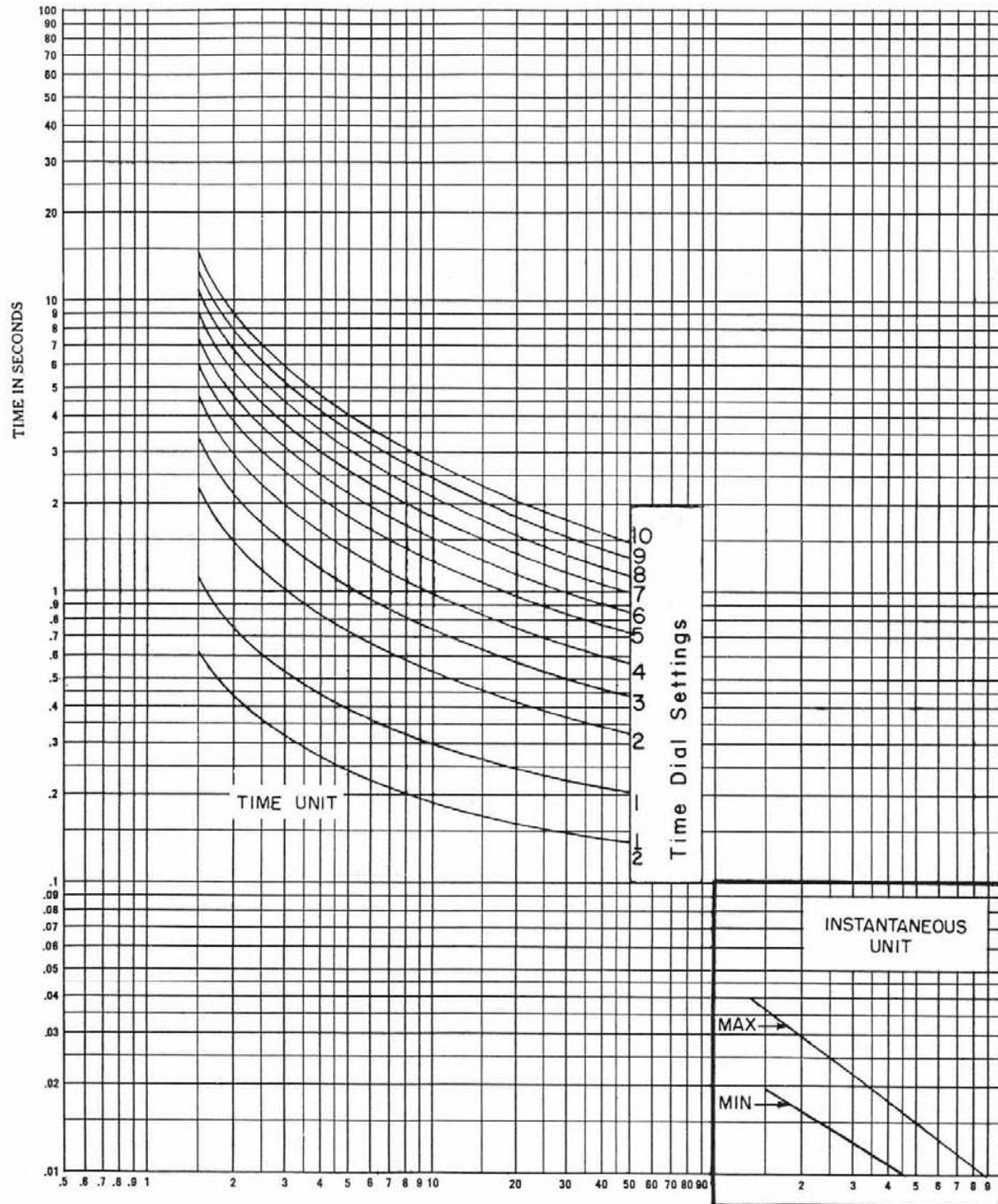


Figura 3.8.- Características tiempo-corriente de relés de tiempo inverso IAC

c. Relés estáticos

Los relés estáticos fueron estudiados en el Capítulo 2, en donde se indicó que con ellos es posible conseguir todas las características de los relés de tipo disco de inducción en cuanto a tiempos de operación y su relación con la corriente. Más aún, con ellos se puede obtener una variedad más amplia de curvas, las que, pueden ser expresadas matemáticamente. Dependiendo del fabricante, las curvas pueden ser de diferentes tipos tales como: de tiempo definido, moderadamente inversa, de

tiempo corto, inversa modificada, inversa, muy inversa modificada, muy inversa, extremadamente inversa, etc., algunas de las cuales se muestran en la Figura 3.9.

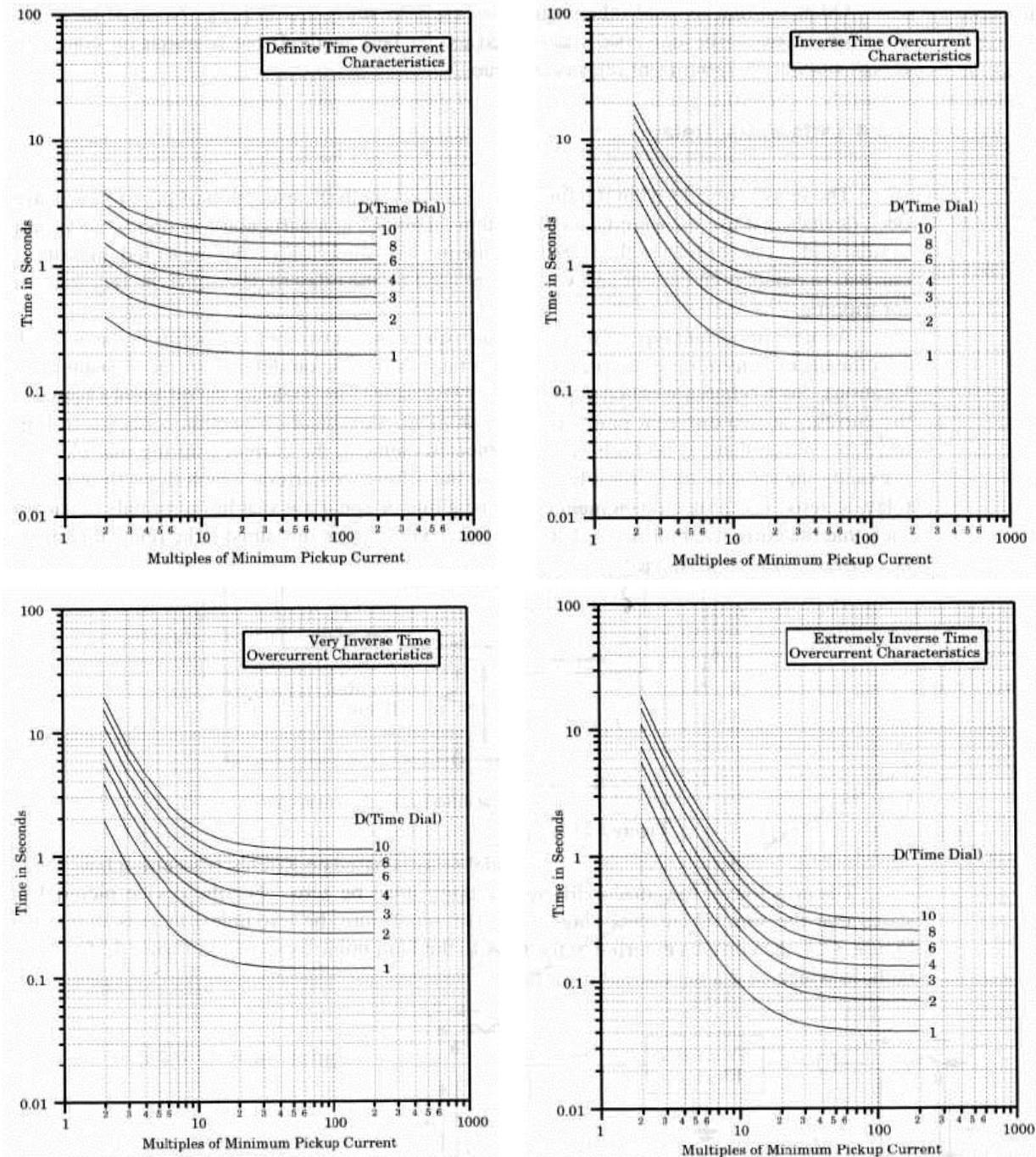


Figura 3.9.- Familia de características tiempo-corriente de relés de estado sólido

La ecuación (3.12) permite obtener estas curvas, cuyos parámetros se indican en la Tabla 3.1:

$$t = \frac{aD}{I^n - C} + bD + K \quad (3.12)$$

Donde: t: tiempo de operación, en segundos
a: una constante, en segundos
C=1 para relés standard
n: un exponente
b: una constante, en segundos
D: Posición del dial de tiempo (Lever)
K=0,01 segundos para relés standard

I: Corriente de operación, en múltiplos de la corriente de pick-up (ecuación válida para $I > 1$)

Tabla 3.1.- Parámetros de la ecuación (3.12)

Curvas características	a	b	N
Tiempo definido	0,20	0,180	1
Tiempo moderadamente inverso	0,55	0,180	1
Tiempo corto	0,20	0,015	1
Tiempo inverso modificado	1,35	0,055	1
Tiempo muy inverso modificado	1,35	0,015	1
Tiempo inverso	5,40	0,180	2
Tiempo muy inverso	5,40	0,110	2
Tiempo extremadamente inverso	5,40	0,030	2

A manera de ejemplo, se puede mencionar el relé 735/737, muy utilizado como protección primaria en redes de distribución en cualquier nivel de voltaje, el que está basado en microprocesador. Sus prestaciones incluyen las protecciones de sobrecorriente temporizada e instantánea tanto para las tres fases como de tierra. Cada elemento de la protección se puede ajustar selectivamente mediante el panel frontal. Los ajustes flexibles y las formas seleccionables de las curvas permiten la coordinación exacta con otros dispositivos. Los costos de instalación y de mantenimiento son más bajos cuando se utiliza el 735/737 en vez de los 8 dispositivos separados a los que reemplaza.

Adicionalmente se puede mencionar que el relé tiene ajuste separado de los niveles de pick-up instantáneo y temporizado, dispone de 5 formas distintas de curvas (de tiempo definido, moderadamente inverso, normal inverso, muy inverso y extremadamente inverso). Para cada forma de curva se pueden obtener 40 curvas diferentes para producir distintos niveles de retardo que pueden ser seleccionadas usando los 4 multiplicadores de cambio y los 10 multiplicadores de tiempo. Además de ello, dispone de tres tipos de curvas (ANSI, IAC e IEC/BS142), salidas para apertura, apertura auxiliar y de servicio y en particular el SR737 tiene 8 relés adicionales de salida.

Permite también realizar monitoreo y medición ya que guarda las últimas 5 aperturas, incluye los datos de corriente previos a éstas, todos ellos en valores RMS. Cuenta con una Interfaz de usuario con 8 LED indicadores de apertura, 4 LED indicadores de estado, gráfico de barras de las corrientes, puertos de comunicaciones RS485 o RS422, con velocidad del protocolo de RTU hasta 19.200 bps, etc.

d. Protecciones de sobrecorriente de tiempo inverso con retención de voltaje

Estas protecciones están formadas por relés similares a los de sobrecorriente, con la diferencia que, además de actuar el elemento tipo espira en cortocircuito alimentado por la corriente de falla, sobre el disco actúa también otro elemento similar alimentado por voltaje, cuyo torque es negativo respecto al anterior. Por lo tanto, el torque de operación T_0 vale:

$$T_0 = k_i I^2 - k_v V^2 \quad (3.13)$$

En condiciones de operación mínima (pick-up) y despreciando el torque de retención proporcionado por el resorte espiral, se tiene que T_0 es cero y por lo tanto:

$$\frac{V^2}{I^2} = \frac{k_i}{k_v} = Z^2 = R^2 + X^2 \quad (3.14)$$

La ecuación (3.14) corresponde a un círculo de radio $r = \sqrt{k_i / k_v}$ en el diagrama R-X, (Figura 3.10). Es decir, en condiciones de pick-up, el relé tiene una característica llamada de impedancia.

Si se hace $V^2 = k_v I^2 / k_i$, es decir, para una condición de operación superior al pick-up y si además se considera $k_i I^2 \geq k_v V^2$, es decir, V^2 constante, resulta una característica similar a la de los relés de sobrecorriente de tiempo inverso, cuyo tiempo de operación vale:

$$t = \frac{K + (N_v V)^2}{(NI)^2} = \frac{K'}{(NI)^2} \quad (3.15)$$

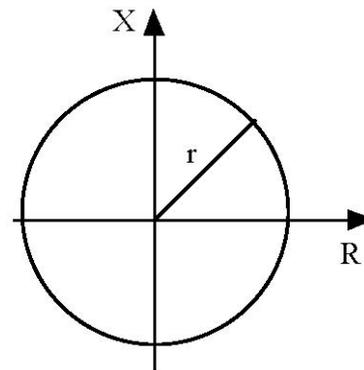


Figura 3.10.- Características del relé de sobrecorriente con retención de voltaje en el diagrama R-X

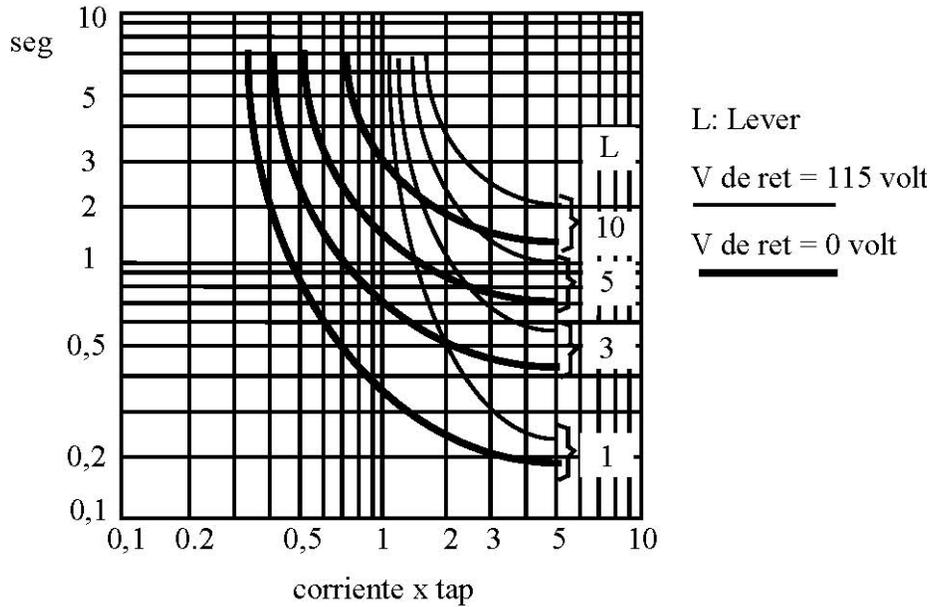


Figura 3.11.-Características tiempo-corriente de un relé de sobrecorriente con retención de voltaje

En la Figura 3.11 se muestran las curvas de tiempo-corriente en múltiplos de tap para diferentes lever y considerando voltajes de retención igual a cero y 115 volts, en escala log-log. Con 115 volts de retención, las curvas del relé son más inversas que las de los relés de sobrecorriente extremadamente inversos. Sin retención, la forma de la curva se aproxima a la de un relé de inducción del tipo muy inverso y su pick-up es cerca del 25% que en la condición anterior con 115 volts

Esta protección se ha diseñado con el propósito de proveer protección de respaldo contra fallas externas de alternadores, ya que el cambio en la forma de la curva de operación, al variar el voltaje, hace posible que el relé se puede ajustar de modo que permita al alternador tomar cualquier sobrecarga permisible dentro de la capacidad de la máquina, de acuerdo a los requerimientos y, a la vez, sea capaz de operar rápidamente con la misma magnitud de corriente o con una menor cuando se presenta una falla. Por otra parte, si la alimentación de corriente de la protección proviene de transformadores de corriente ubicados en el lado del neutro del generador, provee protección de respaldo aun si el interruptor está abierto o no hay otra fuente de generación en el sistema. La alimentación de voltaje se obtiene de transformadores de potencial del generador, como se muestra en la Figura 3.12. La Tabla 3.2 muestra la corriente y el voltaje que alimenta cada uno de los relés.

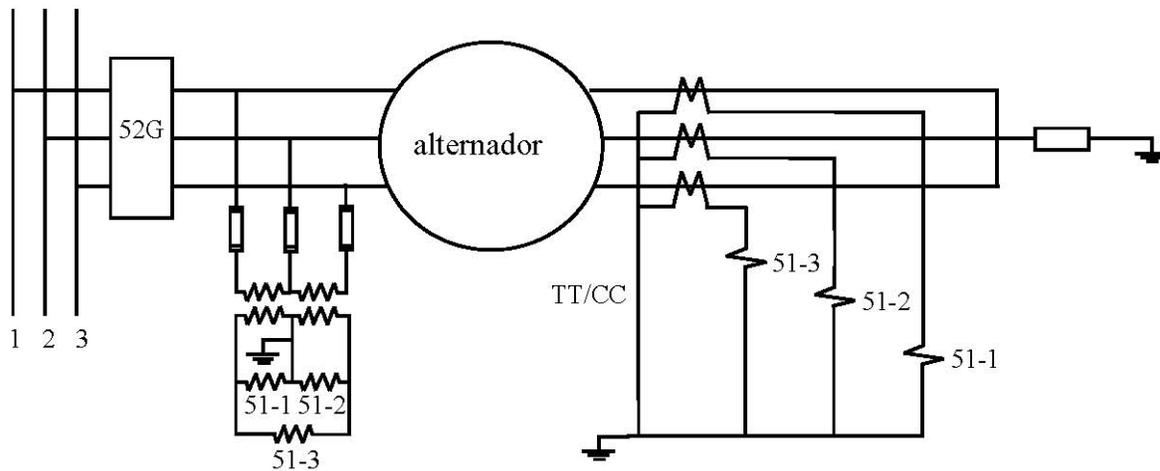


Figura 3.12.- Conexión de relés de sobrecorriente con retención de voltaje

Tabla 3.2.- Alimentación de relés de sobrecorriente con retención de voltaje

Relé	Corriente	Voltaje
Fase 1	I_1	V_{1-2}
Fase 2	I_2	V_{2-3}
Fase 3	I_3	V_{3-1}

En esta forma el relé de la o las fases afectadas tiene un aumento de corriente y una disminución del voltaje para cualquier tipo de falla. De acuerdo con el principio de funcionamiento del comparador del relé y con su conexión, este esquema de protección se caracteriza por discernir entre fallas motivadas por cortocircuitos y anomalías como penduleos o también sobrecargas. Contra cortocircuitos es posible dar un ajuste más sensible que con la protección clásica de sobrecorriente de tiempo inverso. Además, su aplicación se destaca aún más en alternadores de alta reactancia, en donde se hace difícil discriminar entre corriente de falla (permanente) y corriente de carga, ya que, en el instante inicial la corriente puede llegar a cerca de 10 veces la corriente nominal y después de 2 segundos bajar a un valor permanente de 1,5 a 2,0 veces, según la máquina esté con o sin regulador de voltaje.

En el caso en que esta protección sirva de respaldo de la protección diferencial de un alternador, debe ordenar las mismas operaciones que ésta.

3.3.4. Protecciones direccionales de sobrecorriente

a. Consideraciones generales

Estas protecciones pueden ser instantáneas, de tiempo definido o de tiempo inverso. Es decir, cada relé es igual a los descritos en los párrafos 3.3.1., 3.3.2. y 3.3.3, con el agregado de un elemento direccional, que en el caso de los relés electromecánicos, puede de tipo copa de inducción, por ejemplo. Así, los esquemas anteriores pueden estar controlados o supervisados direccionalmente por estos elementos. En este apartado, se

analizará el comportamiento del elemento direccional, ya que los elementos de sobrecorriente fueron estudiados anteriormente.

En un sistema de corriente alterna (C.A.), la corriente, es una magnitud cuya dirección sólo puede ser determinada en relación a otra; se puede solamente afirmar que dos corrientes tienen o no la misma dirección. Es decir, la corriente no tiene una dirección absoluta. La potencia, en cambio, especialmente la potencia activa, es una magnitud cuya dirección es posible determinar en forma absoluta, aunque como magnitud de medida para un sistema de protección contra cortocircuitos no presenta mayores ventajas que la corriente y su aplicación, por otra parte, introduciría enormes complicaciones. Sin embargo, esta propiedad de la potencia activa permite su aplicación como otro medio de selección en un sistema escalonado de protecciones, agregado a otras magnitudes y aisladamente en un sistema de protección por comparación. Un sistema escalonado de protecciones basado en la medida de potencia operará solamente para una determinada dirección de ella y evitará la operación del equipo de desconexión cuando ella fluya en la dirección opuesta.

Así, es posible complementar la aplicación de la corriente como magnitud de medida con un relé direccional (o de potencia) para el caso de una distribución en anillo (Figura 3.13). El relé direccional impide la operación de los relés de sobrecorriente cuando la potencia fluye hacia afuera de la sección protegida. Para una falla que ocurra en el lugar indicado en la figura, operan los relés del circuito fallado, es decir los ubicados en los puntos 3 y 4. El relé direccional ubicado en 2, en cambio, bloquea el desganche del interruptor respectivo, impidiendo así una desconexión inadecuada del circuito no fallado. De este modo se obtiene una selectividad que no podría conseguirse con relés de sobrecorriente.

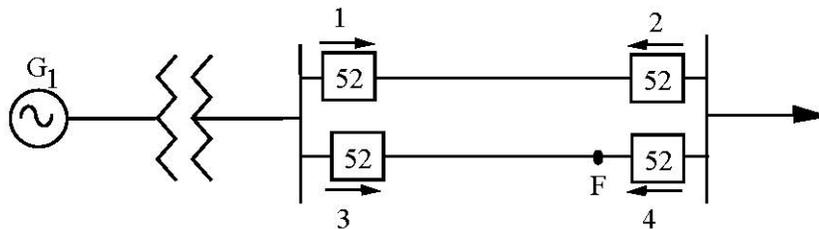


Figura 3.13.- Aplicación de la protección de sobrecorriente en una línea en doble circuito

b. Selección de la corriente y de la tensión

Como se indicó, el empleo de la potencia activa (medida en forma monofásica o trifásica) como magnitud para discriminar la ocurrencia de un cortocircuito presenta dificultades en su aplicación. La tensión en el lugar de la falla es prácticamente nula y, en consecuencia, la potencia no puede medirse. Es evidente que esta desventaja disminuye cuando la falla origina un arco, debido a la pequeña caída de voltaje que allí se produce. En consecuencia la sensibilidad de un relé direccional debe ser lo más alta posible. Otra desventaja es el bajo factor de potencia del circuito hasta el punto de falla; esto trae como consecuencia que la potencia que fluye es esencialmente reactiva. Esta complicación es mayor en líneas aéreas que en cables.

La zona de insensibilidad del relé es aquella que se extiende desde el lugar en que está instalado hasta un punto determinado, tal que para fallas que ocurran en ella el relé no operará, por las causas antes indicadas. Es evidente que no es posible controlar la magnitud del voltaje, pero en cambio, es posible disminuir fuertemente la zona de insensibilidad variando el factor de potencia artificialmente mediante una adecuada selección de los voltajes y corrientes que alimentan el relé.

Para conseguir un factor de potencia igual a uno en el relé es necesario elegir un voltaje y una corriente tales que su desfase sea igual al ángulo de la impedancia de la línea, estando la corriente en adelanto con respecto al voltaje. De este modo, al ocurrir un cortocircuito, la corriente se retrasará en el ángulo de impedancia de la línea quedando en fase con el voltaje. El sistema de medida del relé se comportará, entonces, como si la potencia que fluye hacia el cortocircuito fuera puramente activa. Además, los voltajes elegidos deben ser tales que con la ocurrencia de un cortocircuito mantengan su valor en todo lo que sea posible. Esto, naturalmente, es solo posible para el caso de cortocircuitos monofásicos o bifásicos ya que para uno trifásico los tres voltajes bajan en la misma proporción. Se distinguen conexiones de 0° , 30° , 60° y 90° . Así, la conexión de 0° corresponde a aquella en que el voltaje y corriente están en fase, por ejemplo, o bien I_{12} y V_{12} . Para las otras conexiones la corriente adelanta al voltaje en 30° , 60° o 90° .

En la Figura 3.14 se muestran los diagramas fasores correspondientes a la alimentación del relé de la fase 1. Para los relés de las fases 2 y 3, los voltajes corresponden a la rotación del caso. En esta forma, se pretende que el voltaje elegido no sea apreciablemente afectado en magnitud y fase en casos de fallas no-balanceadas. La conexión de 60° se puede lograr en la práctica colocando en el mismo polo dos bobinas alimentadas para el caso de la figura, con los voltajes V_{23} y V_{13} de tal manera que el flujo resultante sea proporcional a la suma de estos voltajes.

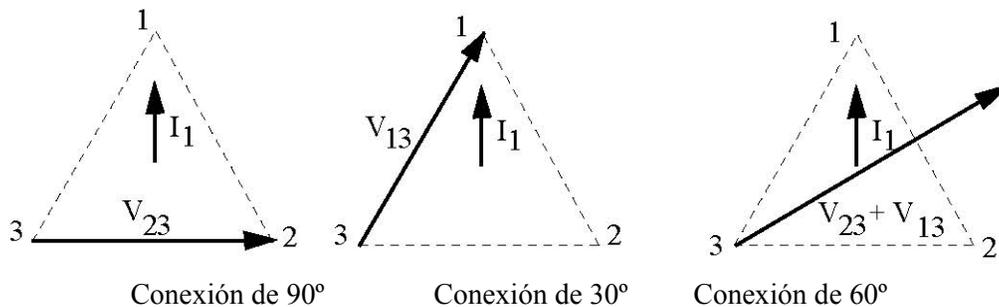


Figura 3.14.- Diagramas fasoriales para las conexiones del relé de la fase 1

c. Principios básicos de los relés direccionales

Los relés direccionales (o de potencia) cumplen con la función de detectar el sentido de flujo de la potencia activa y están, por lo tanto, basados en los principios del wáttmetro. Pueden ser del tipo electromagnético, de inducción o electrónico. Una forma constructiva muy común, es la de tipo balanza (electromagnético) que se muestra en la Figura 3.15, que corresponde al elemento direccional de los relés HZ de la Westinghouse.

Los relés direccionales de inducción pueden ser de cilindro o de disco. Por ejemplo, las unidades direccionales de los relés CR de la Westinghouse y de los IBC de la General Electric son del tipo cilindro de inducción; los relés direccionales de tierra ICP e ICC, de la General Electric, son de tipo disco de inducción. Entre los electrónicos se pueden mencionar el TCW y el TCCV, ambos de la General Electric y el 7SP88 de la Siemens.

Para deducir la ecuación característica, se considerará el relé tipo balanza de la Figura 3.15. En este relé cada núcleo se encuentra sometido al torque resultante del efecto del flujo de dos bobinas: una de voltaje y otra de corriente. El flujo producido en la bobina de corriente es proporcional a la corriente "I" y el flujo producido en la bobina de potencial será proporcional al voltaje "V", siempre que se desprece la saturación.

Las dos bobinas de voltaje tienen igual número de vueltas y se encuentran enrolladas en el

mismo sentido. Las bobinas de corriente tienen igual número de vueltas pero están enrolladas en sentido contrario, tal como puede verse en la Figura 3.15 a), de manera que el torque de operación T_{OP} será:

$$T_{OP} = k\phi_A^2 \quad (3.16)$$

Y el torque de retención T_R es:

$$T_R = k\phi_B^2 + K_R \quad (3.17)$$

Donde ϕ_A y ϕ_B son los flujos producidos en los respectivos núcleos, K_R es el torque asociado al resorte y la constante de proporcionalidad k es la misma para ambos torque por tratarse de bobinas iguales. De acuerdo con la Figura 3.15 b), se puede escribir:

$$\begin{aligned} \phi_A^2 &= \phi_i^2 + \phi_v^2 + 2\phi_i\phi_v \cos(\varphi - \theta) = k' [I^2 + V^2 + 2VI \cos(\varphi - \theta)] \\ \phi_B^2 &= \phi_i^2 + \phi_v^2 - 2\phi_i\phi_v \cos(\varphi - \theta) = k' [I^2 + V^2 - 2VI \cos(\varphi - \theta)] \end{aligned} \quad (3.18)$$

El relé operará cuando $T_{OP} \geq T_R$, es decir:

$$k\phi_A^2 \geq k\phi_B^2 + K_R \quad (3.19)$$

Reemplazando los valores dados por (3.18) y ordenando se tiene:

$$4kk'VI \cos(\varphi - \theta) \geq K_R \quad (3.20)$$

Finalmente se puede escribir:

$$VI \cos(\varphi - \theta) \geq K \quad (3.21)$$

Donde $K = K_R / 4kk'$ y θ es el ángulo entre el flujo ϕ_v y el voltaje V . Cuando $\varphi = \theta$, el torque es máximo, por lo que al ángulo θ se le denomina "ángulo de torque máximo"

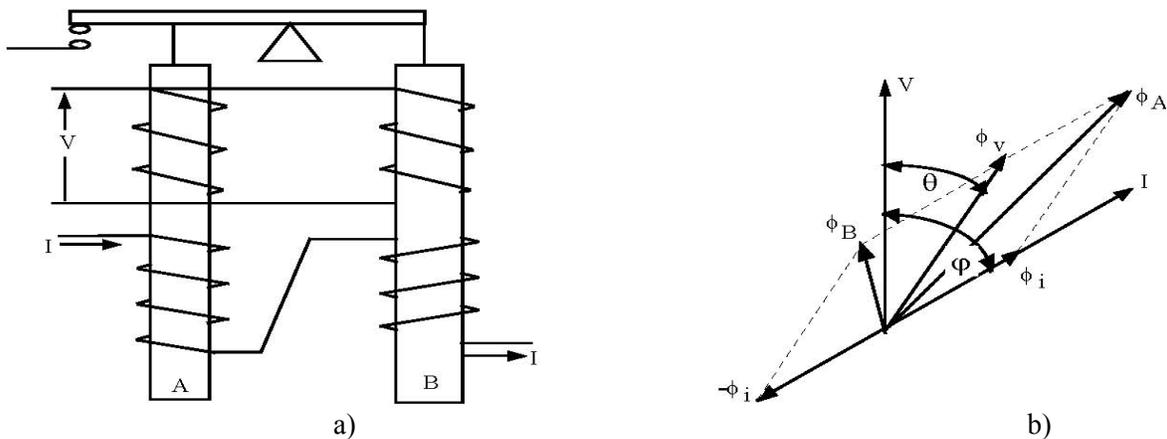


Figura 3.15.- Relé direccional tipo balanza, a) Esquema; b) Diagrama fasorial

En este caso, el ángulo de torque máximo depende de las características de la bobina de voltaje, ya

que representa el ángulo asociado a su impedancia.

La ecuación (3.21) es válida, independiente de que el relé sea de tipo electromagnético, de inducción o de estado sólido. Es factible alterar el torque de operación variando el ángulo de torque máximo, lo que se consigue en la práctica proveyendo a los relés de dispositivos desfasadores adecuados.

d. Representación de las características de un relé direccional

Así como para los relés de sobrecorriente, sus características se representan en forma de curvas tiempo-corriente, es necesario disponer, en el caso de los relés direccionales, de ciertas curvas representativas, las que están basadas en la ecuación (3.21). En ellas, tanto V como I y φ pueden considerarse como variables o como parámetros, dando origen a las siguientes curvas características:

d.1. Características voltaje-corriente para “ φ ” constante

Esta característica responde a la ecuación (3.22); es decir, el producto VI es constante, lo que corresponde a una hipérbola, tal como se muestra en la Figura 3.16, donde $\varphi_3 > \varphi_2 > \varphi_1$

$$VI \geq \frac{K}{\cos(\varphi - \theta)} \quad (3.22)$$

d.2. Característica en coordenadas polares

La característica más útil es la que representa la ecuación (3.21) en coordenadas polares, como se muestra en la Figura 3.17.

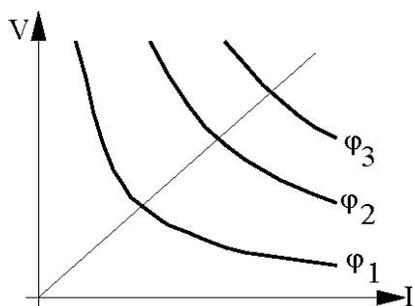


Figura 3.16.- Característica V-I para φ constante

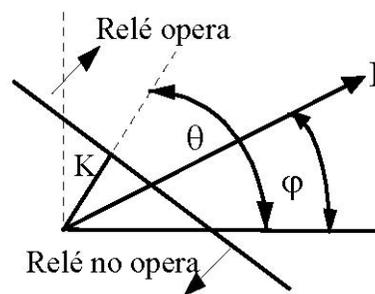


Figura 3.17.- Característica en coordenadas polares

d.3. Características voltaje-ángulo para I constante

La Figura 3.18 representa esta característica, donde $I_1 > I_2 > I_3$.

d.4. Características corriente-ángulo para V constante

La Figura 3.19 representa esta característica, donde $V_1 > V_2 > V_3$.

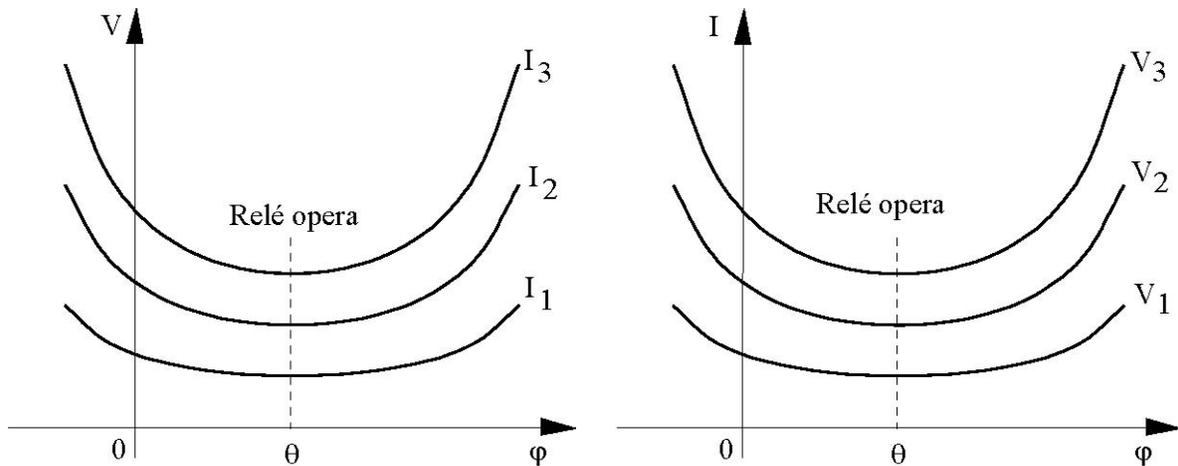


Figura 3.18.- Característica V- ϕ para I constante

Figura 3.19.- Característica I- ϕ para V constante

e. Combinación del elemento direccional (de potencia) con el de sobrecorriente

Como se dijo anteriormente, los relés direccionales de sobrecorriente constan fundamentalmente, de un elemento de sobrecorriente convencional (IAC, por ejemplo) y de un elemento direccional (IBC, por ejemplo), que opera en conjunto con el anterior. El elemento direccional puede actuar sobre el elemento de sobrecorriente, en principio, de las dos maneras siguientes:

e.1. Supervisión direccional

Se conectan los contactos de los elementos de sobrecorriente y direccional en serie en el circuito de desencanche del interruptor de poder; de manera que mientras no se cierren los dos contactos no se completa dicho circuito y por lo tanto el interruptor no abre. Este procedimiento; sin embargo, puede en ciertos casos, causar una falsa operación de la protección, cuando la dirección del flujo de potencia en una línea sana cambia repentinamente al despejarse parcial o totalmente una falla externa y el elemento de sobrecorriente es de baja velocidad de operación. A manera de ejemplo, se considerará la situación de la Figura 3.20

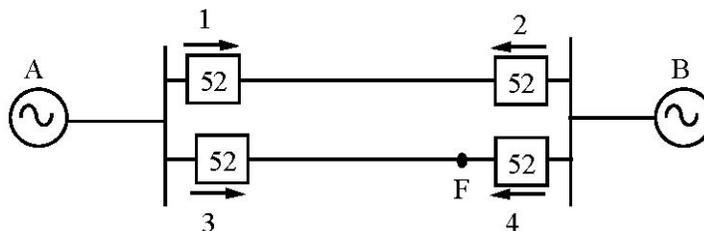


Figura 3.20.- Sistema en doble circuito, con alimentación en ambos extremos

Si la capacidad de generación de A es mucho mayor que la de B, el elemento de sobrecorriente en el interruptor 2 puede operar para una falla en F, pero la apertura se ve bloqueada por el elemento direccional. Cuando el interruptor 4 abre para aclarar parcialmente la falla, la dirección de la potencia en el interruptor 2 se invierte y, como sigue existiendo una sobrecorriente, el relé abrirá el interruptor 2 innecesariamente.

e.2. Control Direccional

Se combinan ambos elementos de modo que mientras no opere el elemento direccional no pueda operar el de sobrecorriente; es decir, el elemento direccional habilita (cierra el circuito) de la espira en cortocircuito o del enrollado secundario de elementos de sobrecorriente de tiempo inverso (por ejemplo). Esta disposición permite evitar los inconvenientes mencionados en el ejemplo anterior. En el circuito de desenganche del interruptor solo se incluye el contacto de la unidad de sobrecorriente. El relé IBC de la General Electric es de este tipo; consiste fundamentalmente de un relé de sobrecorriente tipo IAC, controlado direccionalmente por un elemento del tipo cilindro de inducción.

f. Polarización de relés direccionales

Una unidad direccional emplea corriente (de línea para un relé de fase y residual para un relé de tierra) y una magnitud de referencia para determinar la dirección del flujo de potencia. La magnitud de referencia de los relés empleados en protección de sistemas de corriente alterna recibe el nombre de “magnitud de polarización”; ésta puede ser un voltaje o bien una corriente. El uso de voltaje se conoce con el nombre de polarización de voltaje y el uso de la corriente con el nombre de polarización de corriente.

f.1. Polarización de relés de fases

Según lo visto, en los relés de fase, se emplea el voltaje del sistema como magnitud de polarización. A manera de ejemplo se presenta el esquema de la Figura 3.21 que muestra una conexión típica de relés direccionales de fases (conexión de 90°) con los transformadores de corriente conectados en estrella a tierra y los de potencial en estrella tierra-estrella tierra.

f.2. Polarización de relés residuales

Los relés direccionales residuales, conocidos como “relés direccionales de tierra”, pueden polarizarse por voltaje residual (polarización de voltaje) o por corriente residual (polarización de corriente). La Figura 3.21 muestra el caso de un relé de tierra (residual), en que se dispone de tres transformadores de potencial auxiliares conectados en estrella tierra-delta abierta para la polarización por voltaje y la corriente se obtiene de la salida de los tres transformadores de corriente.

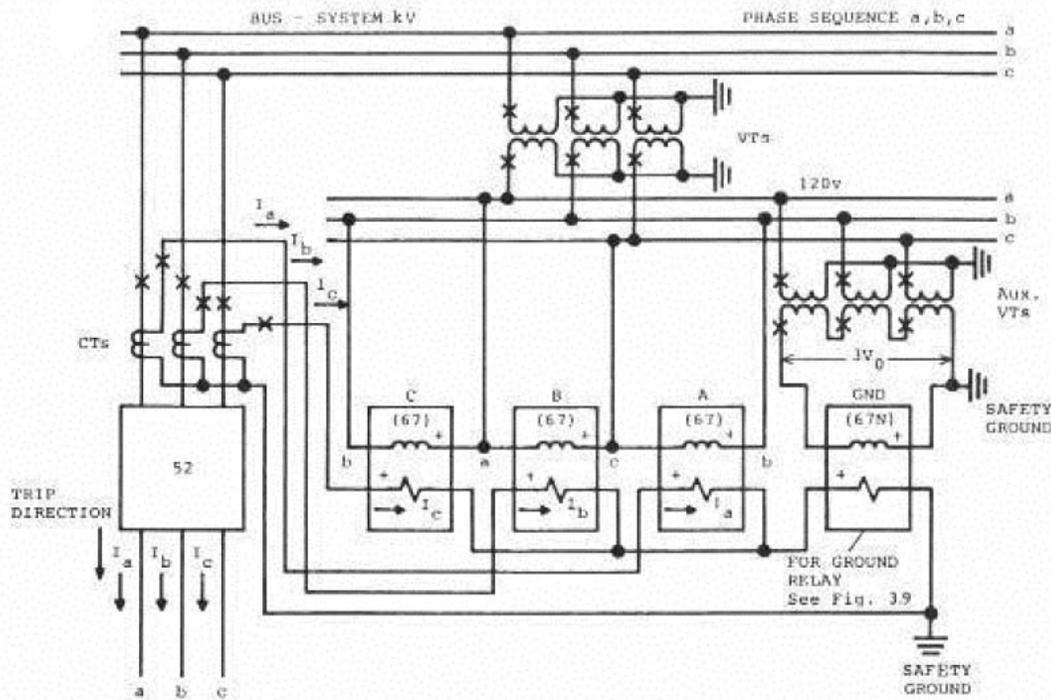


Figura 3.21.- Conexión típica de relés direccionales de fase y residual

Cuando en un punto de un sistema sólo se requiere polarizar por voltaje un relé residual y por lo tanto, las necesidades de burden son pequeñas, se suele usar, por razones económicas, un equipo que incluye tres condensadores de acoplamiento y un dispositivo de potencial conectados en la forma indicada en la Figura 3.22. De esta manera, el voltaje aplicado a los relés residuales es proporcional al voltaje de secuencia cero

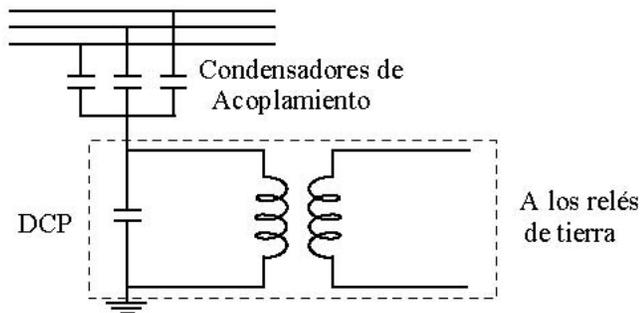


Figura 3.22.- Polarización de voltaje para relés direccionales de tierra

La polarización por corriente de relés direccionales residuales se aplica en subestaciones que tienen transformadores de poder con sus neutros adecuadamente conectados a tierra. Generalmente, la corriente residual de polarización se obtiene desde un transformador de corriente ubicado en la conexión a tierra de los neutros de los transformadores de poder. Sin embargo, el hecho de que un transformador trifásico o un banco de transformadores monofásicos tenga su neutro sólidamente a tierra no es razón suficiente para que sea una fuente de corriente de polarización. Es necesario, además, conocer las conexiones de todos los enrollados del transformador o del banco y a veces incluso es necesario conocer el resto del sistema.

Para un transformador con dos enrollados se pueden presentar los siguientes casos típicos de conexiones: Delta-estrella a tierra; estrella-estrella a tierra, estrella a tierra-estrella a tierra. De las

tres conexiones la más común es la primera y al mismo tiempo es la única que se presta para polarización de corriente de relés ubicados en el lado de la estrella. En efecto, la presencia de la delta permite que por el neutro circulen corrientes de secuencia cero dirigidas siempre desde la tierra hacia los enrollados. Estas corrientes inducirán en la delta corrientes de circulación que no fluirán en la parte del sistema conectado en el lado delta y no habrá ningún caso de falla en el lado delta para el cual circularán corrientes residuales en la conexión del neutro de la estrella a tierra. Por eso, los relés residuales del lado estrella pueden ajustarse en forma independiente de las protecciones en el lado delta.

En la conexión estrella-estrella a tierra no pueden circular corrientes residuales, aunque el neutro de una estrella esté a tierra, porque los amperes-vueltas de las componentes de la corriente residual del lado conectada a tierra no podrían compensarse en la otra estrella, ya que, por los enrollados de esta última no pueden circular corrientes que estén en fase.

Si se conectan a tierra los neutros de ambas estrellas, tampoco se puede obtener una corriente adecuada para polarización. En efecto, si se supone que las partes del sistema conectadas a ambas estrellas tienen puestas a tierra, entonces una falla monofásica en el secundario provocará una corriente residual hacia abajo en el neutro del primario y hacia arriba en el neutro del secundario. En cambio, una falla monofásica en el primario, provocará una corriente hacia arriba en el neutro del primario y hacia abajo en el neutro del secundario. Luego, un transformador de corriente en uno de los neutros no proporcionará una corriente unidireccional adecuada para polarización.

El intento de colocar transformadores de corriente en los dos neutros, conectando los secundarios en paralelo también falla, ya que la corriente resultante por el relé cambiaría de sentido según que la falla se produzca a la izquierda o a la derecha del transformador de poder. Mas aún, si la razón de transformación de los transformadores de corriente de los neutros es inversamente proporcional a la razón de transformación del transformador de poder, entonces, la corriente resultante por el relé será siempre cero.

Por lo tanto, los transformadores trifásicos o los bancos, en conexión estrella-estrella, son inadecuados como fuentes de corriente de polarización.

Naturalmente que un transformador, en conexión delta-delta no puede ser usado para polarización de corrientes porque es imposible la circulación de corrientes de secuencia cero fuera de los enrollados.

Los transformadores de tres enrollados, también, pueden usarse para polarización de corriente. Estos transformadores pueden ser estrella-estrella-delta, estrella-delta-delta. Si sólo una de las estrellas está a tierra y la otra está desconectada de tierra, o bien es un enrollado delta, este neutro es una fuente adecuada de corriente de polarización. En realidad el caso es similar al de un transformador de dos enrollados delta-estrella a tierra. El enrollado terciario en delta tiene solamente el efecto de aumentar la corriente por el neutro debido a que se compensan en los enrollados de la estrella conectada a tierra los amperes-vueltas de secuencia cero del terciario.

Por lo general, en un transformador estrella-delta-estrella se conectan a tierra los neutros de ambas estrellas. En este caso se puede obtener una corriente de polarización colocando transformadores de corriente en los dos neutros y conectando los secundarios en paralelo y en oposición, ya que cualquiera sea la ubicación de la falla, el sentido de la corriente en el relé será el mismo. Además, la corriente en la delta también mantendrá su sentido, por lo que puede usarse un transformador de corriente en la delta para obtener corriente de polarización. A menudo se emplea este método cuando no es posible medir las corrientes que circulan por las conexiones de los neutros a tierra.

3.4. Aplicaciones de protecciones de sobrecorriente

En este apartado se indicarán los criterios generales en que se basa la utilización de relés de sobrecorriente, a fin de obtener del sistema de protecciones la selectividad, sensibilidad y simplicidad adecuadas. Existen varias alternativas que permiten obtener selectividad entre estas protecciones, las que dependen de los tipos de relés que se utilicen. Entre ellas tenemos:

3.4.1. Selectividad con protecciones de tiempo definido

En este método se utiliza un intervalo de tiempo entre cada uno de los relés que controlan los interruptores del sistema, para asegurar que opere primero el que está más cerca de la falla. En la Figura 3.23 se muestra una aplicación donde la condición de operación selectiva es que los relés van aumentando su tiempo de operación a medida que se acercan a la fuente, lo que permite que opere primero el que está más cerca del punto de falla.

Este método se usa preferentemente en líneas radiales o en líneas en anillo, donde la corriente de falla entre las diversas secciones no difiere mucho. Esta forma de dar selectividad se consigue con relés de tiempo definido, en los cuales la unidad de sobrecorriente juega el papel de iniciar el conteo del tiempo. Por esta razón se les denomina como relés con retardo independiente (del tiempo). Su uso está más difundido en Europa, pero tiene la desventaja que el tiempo de despeje de las fallas es cada vez mayor hacia las proximidades de la fuente, justamente donde el nivel de falla es mayor y donde se debiera actuar con más rapidez.

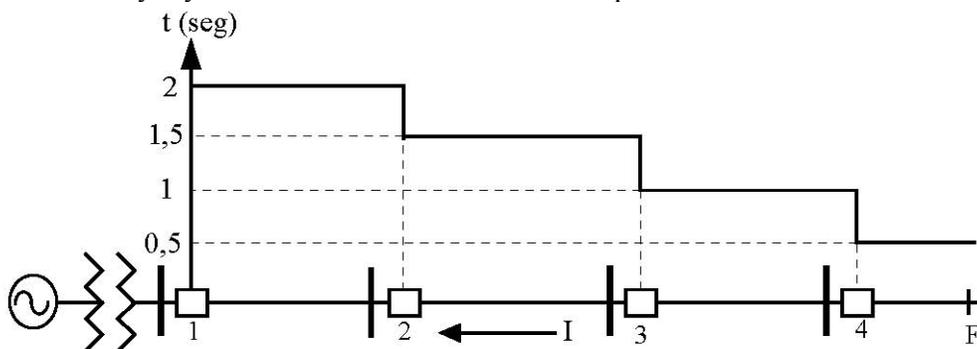


Figura 3.23.- Selectividad con protecciones de tiempo definido

3.4.2. Selectividad con protecciones de tiempo inverso

Como una forma de solucionar las deficiencias que presenta el método anterior, se ha desarrollado otro en base a relés de sobrecorriente de tiempo inverso, tal como se muestra en la Figura 3.24.

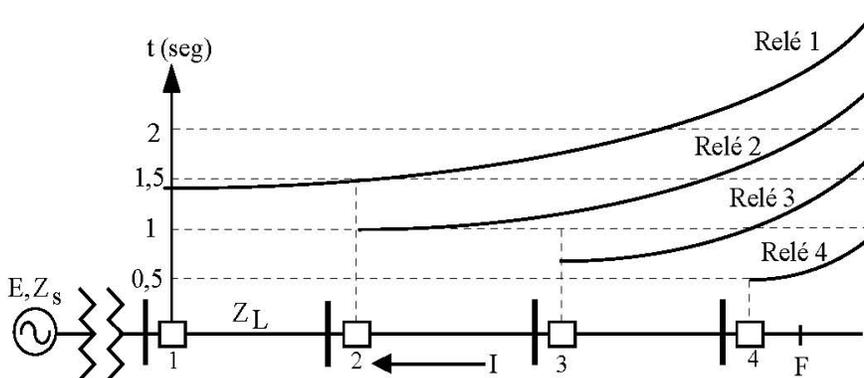


Figura 3.24.- Selectividad con protecciones de tiempo inverso

Este método se aplica especialmente cuando hay una apreciable diferencia entre la corriente de falla del final de la línea I_2 y la corriente para fallas al comienzo de ésta I_1 (Figura 3.24), donde:

$$I_2 = \frac{E}{Z_s + Z_L} \quad \text{e} \quad I_1 = \frac{E}{Z_s} \quad (3.23)$$

Como los relés tienen característica de tiempo inverso, de la forma $t = K/I$, resulta que la razón entre los tiempos de operación al comienzo de la línea t_1 y al final t_2 es:

$$\frac{t_1}{t_2} = \frac{Z_s}{Z_s + Z_L} \quad (3.24)$$

Las desventajas en la aplicación de protecciones de tiempo inverso, se dan cuando la razón t_1/t_2 no es apreciablemente menor que la unidad y cuando Z_s varía apreciablemente con la capacidad de generación conectada al sistema.

3.4.3. Selectividad con protecciones con retención de voltaje

Las protecciones de sobrecorriente se pueden usar solamente cuando la mínima corriente de falla excede la corriente máxima de carga. Cuando hay un amplio rango de variación de las condiciones de generación y donde la corriente mínima de falla puede ser menor que la corriente máxima de carga, es posible utilizar protecciones con retención de voltaje, tal como se explicó en el punto 3.3.3.d.

3.4.4. Selectividad con protecciones de tiempo inverso e instantáneas

Se pueden combinar las características de tiempo de operación de estos dos tipos de relés para mejorar la selectividad y la estabilidad del SEP tal como se muestra en la Figura 3.25, especialmente en el caso de líneas largas o para la protección de transformadores, donde hay una apreciable diferencia entre las corrientes de cortocircuito entre dos relés consecutivos. El ajuste de los elementos instantáneos debe ser tal que no detecte fallas en la barra siguiente a su ubicación, por lo que en general se le da un margen de un 25 a un 30%, es decir, se multiplica la corriente de falla en la barra siguiente por 1,25 o 1,3.

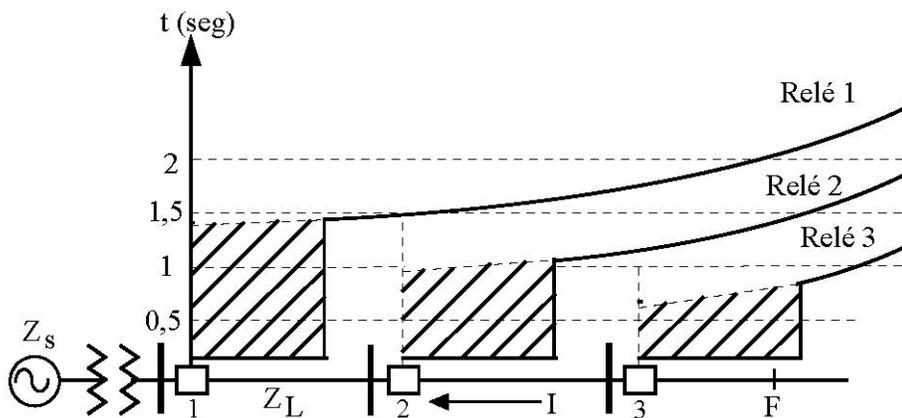


Figura 3.25.- Selectividad con protecciones de tiempo inverso e instantáneas

3.5. Determinación de ajustes de relés de sobrecorriente. Coordinación de protecciones

Un estudio de coordinación de protecciones consiste en organizar las curvas tiempo-corriente de cada uno de los relés que se encuentran en serie entre el dispositivo que usa la energía y la fuente. Este debiera realizarse al comienzo de cualquier proyecto de un sistema eléctrico, ya que ello podría indicar que se requieren algunos cambios en las especificaciones de ciertos equipos. También debiera efectuarse un estudio o una revisión, cada vez que se añaden cargas nuevas o se reemplazan equipos en un sistema existente, o bien, cuando se produce un cambio importante en el nivel de cortocircuito del sistema. Finalmente, se requiere un estudio cuando una falla no es despejada con la selectividad adecuada y compromete una mayor parte del sistema de la que debiera.

El objetivo de un estudio de coordinación, es por lo tanto, determinar las características, los rangos y los ajustes de los dispositivos de sobrecorriente, para asegurar una selectividad adecuada donde quiera que se produzca una falla o una sobrecarga.

3.5.1. Definición de términos

Antes de iniciar este estudio, conviene definir algunos términos que son de uso común en protecciones y que es necesario conocer claramente.

a. Corriente de partida

Es el valor de corriente capaz de sacar del reposo a la parte móvil del relé (el disco, por ejemplo, en los relés de tipo disco de inducción), aunque es posible que éste no llegue a cerrar sus contactos a pesar de seguir manteniendo aplicado este valor de corriente.

b. Corriente mínima de operación o pick-up

Es la corriente que produce el cambio de estado del relé. En relación a este término existe una diferencia entre los fabricantes norteamericanos y los europeos. En los relés americanos (USA), el valor de la corriente mínima de operación o pick-up es igual al valor del tap. En los relés de procedencia europea, estos valores pueden ser diferentes. La corriente de pick-up es del orden de 1,3 veces el valor del tap.

Las curvas de los relés vienen con el valor de corriente expresado en veces tap y no en amperes, de modo que sirvan para cualquier rango de corrientes primarias. También es habitual que las curvas no comiencen en 1 por tap sino que en 1,5 veces en el caso de los americanos o 1,3 veces en el caso de los relés ingleses. En los relés de estado sólido es frecuente que el pick-up sea 1,1 veces el tap y que la curvas comiencen también desde este punto. La razón para esto es que resulta difícil precisar las curvas para valores de corriente muy cercanos al valor de la toma (tap), de modo que el fabricante se deja un margen donde no asegura la exactitud de las curvas.

c. Tap

Es el dispositivo que permite seleccionar la corriente de operación del relé dentro de un rango de tomas o derivaciones dispuestas para este efecto. Normalmente el valor del tap se designa en Amperes y representa el valor de corriente que haría operar al relé en un tiempo indeterminado (muy largo).

d. Lever o dial de tiempo

Es el indicador de la posición del tope que determina la separación inicial de los contactos, cuando el relé está en reposo (relés tipo disco de inducción, por ejemplo), haciendo variar el

recorrido del disco desde la posición de máxima separación de los contactos hasta el cierre de ellos. Por lo tanto, permite variar las curvas de tiempo de operación del relé. En general puede considerarse que las curvas de un relé son proporcionales entre sí, de modo que pueden obtenerse curvas intermedias interpolando las curvas adyacentes. Los fabricantes entregan estas curvas para cada una de las graduaciones del dial, que como se dijo, en los relés americanos van de 0,5 a 10 y en los relés europeos, en general, de 0,05 a 1. Las curvas tiempo-corriente se dibujan, en general, como una sola línea; sin embargo, es necesario indicar que se aceptan ciertos límites de error para estas curvas (banda de operación), los que como se verá posteriormente, influyen en la determinación del tiempo de paso.

En los relés transistorizados, por lo general, el lever, que en este caso se denomina time dial (dial de tiempo) es un reóstato que influye en un circuito RC y que permite variar los tiempos de operación.

e. Sobrecarrera (overshoot)

En el caso de los relés de inducción, es el tiempo que puede seguir girando el disco (del relé de respaldo) luego de que la falla ha sido despejada por otro relé (local), antes de cerrar sus contactos. En el caso de los relés estáticos antiguos, correspondía al tiempo que demoraba el condensador del circuito de tiempo en descargarse bajo su nivel de operación, luego que la falla se había despejado. Esta sobrecarrera puede representar tiempos de 0,03 a 0,10 segundos, valores que hay que tener en cuenta como se verá mas adelante. En los relés de estado sólido modernos, la sobrecarrera no existe.

f. Tiempo de paso

Cuando se coordinan relés, debe mantenerse un intervalo de tiempo entre sus curvas, con el objeto de obtener una operación secuencial correcta de los interruptores. A este intervalo se le denomina “tiempo de paso” y su valor final depende de factores tales como: tiempo de apertura del interruptor, sobrecarrera y error de las curvas de operación de los relés, y a otros, como la exactitud de los TT/CC y a su posible saturación. Como la determinación exacta de cada uno de estos errores es prácticamente imposible, habitualmente se usan como valores aceptables, tiempos de paso de 0,3 ó 0,4 segundos. En este valor se considera:

- Tiempo de apertura del interruptor : 0,08 seg.
- Sobrecarrera : 0,10 seg.
- Error en la curvas de los relés : 0,10
- Factor de seguridad (incluye otros errores) : 0,02 a 0,12 seg.

El tiempo de paso a utilizar puede reducirse si se hacen algunas consideraciones especiales. Por ejemplo, si se usan interruptores de vacío o neumáticos, el tiempo de apertura podría reducirse a 0,05 ó 0,06 segundos. Si se usan relés muy inversos o extremadamente inversos que tienen una sobrecarrera menor que los de tiempo inverso, podría usarse un tiempo de paso de 0,3 seg. Por otra parte, si se usan relés de tiempo definido, no es necesario considerar el error de los TT/CC, ya que el núcleo de estos relés se satura rápidamente.

Finalmente se podría utilizar un tiempo de paso no menor de 0,25 seg. si se logra reunir las mejores condiciones, es decir, interruptores rápidos, relés de estado sólido, transformadores de corriente de buena calidad y efectuando una comprobación de los resultados en terreno.

3.5.2. Reglas generales para calcular los ajustes de los relés de sobrecorriente

Con lo explicado hasta ahora, se está en condiciones de dar algunas reglas que permitan abordar el cálculo de ajustes de los relés de sobrecorriente. Conviene recordar que estos relés, además de dar protección a ciertos equipos, cumplen también la misión de dar respaldo local o remoto a otras protecciones que pueden ser incluso de sobrecorriente.

a. Relés de fase

a.1. El relé de fase debe detectar fallas por lo menos hasta el extremo final de la sección de circuito siguiente a la que está protegiendo. Por ejemplo, en la Figura 3.26, el relé R_1 debe detectar fallas mínimas en el sector del relé R_3 .

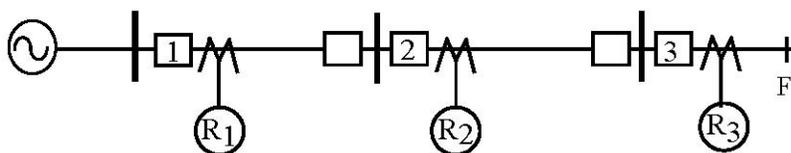


Figura 3.26.- Relés de sobrecorriente de fase en un sistema radial

- a.2.** El tap debe elegirse de modo que el pick-up sea mayor que la corriente máxima de carga y detecte fallas mínimas en respaldo. Además de esto, en algunos casos, al relé de sobrecorriente se le da el carácter de relé de sobrecarga eligiendo entonces un ajuste de 1,2 a 1,5 veces la corriente nominal del equipo. Es necesario tener cuidado en esto último, ya que si se abusa de esta posibilidad se puede limitar mucho la posibilidad de sobrecarga controlada que puede dar el equipo protegido. Al elegir el valor del tap, debe tenerse en cuenta las posibles variaciones que respecto a este valor tiene el pick-up.
- a.3.** El lever (ajuste de tiempo) debe elegirse dando el tiempo más corto posible al relé más alejado de la fuente. Si éste no coordina con otros elementos (fusibles, relés térmicos, etc.), debe dársele el lever mínimo permisible que evite falsas operaciones por vibraciones. Este lever se recomienda sea 1 para los americanos y 0,1 para los europeos, pero puede ser hasta 0,5 o 0,05, respectivamente. El resto de los relés debe coordinarse con los que le anteceden, dándole el tiempo de paso más el tiempo del relé con que se coordina, en el punto que corresponda a la máxima falla. Como tal se considera generalmente una falla trifásica, con máxima generación justo después de la siguiente barra o el pick-up del instantáneo del relé con el que se está coordinando. Por ejemplo, en la Figura 3.26, el lever del relé R_2 debe calcularse con el tiempo del relé R_3 más el tiempo de paso, con una falla máxima en F (barra siguiente al relé R_2). En todo caso, debe verificarse la coordinación para otro tipo de fallas.
- a.4.** Todo lo explicado es válido para sistemas radiales. En puntos donde no hay suficiente diferencia entre la corriente de los alimentadores fallados y no fallados que llegan a una misma barra de subestación, o en sistemas en anillo o con líneas de doble circuito debe usarse relés con control direccional.

b. Relés de tierra

Para estos relés son válidos los mismos puntos mencionados antes, excepto lo indicado al comienzo de **a.2.** En efecto, como estos relés son alimentados con las corrientes de secuencia cero, las que valen cero para condiciones normales de operación, puede elegirse un tap de valor inferior a

las corrientes normales de carga.

3.5.3. Etapas a seguir para calcular los ajustes de relés de sobrecorriente

El cálculo de ajustes de relés de sobrecorriente debe dar finalmente el valor de “tap” y de “lever” a que debe ajustarse cada relé. En los casos que se consulte elemento instantáneo, también debe entregar el valor al cual debe ajustarse éste. Para obtener el resultado final es necesario cumplir una serie de etapas previas, que se resumen a continuación, suponiendo que se dispone del diagrama unilineal del sistema, que el tipo de relé (inverso, muy inverso, etc.) está ya decidido y que se conocen las razones de los TT/CC a usar. También es necesario disponer de las curvas características de los relés y papel log-log para trazar las características de corriente (abscisa) y tiempo (ordenada). Las etapas son las siguientes:

- a. Dibujar el circuito equivalente por fase (diagrama de impedancias) del sistema eléctrico radial al cual se está aplicando la protección, indicando los parámetros de cada uno de sus componentes.
- b. Reducir todos los parámetros a una base común. Como se verá posteriormente, todas las corrientes deben estar referidas a un solo nivel de voltaje, el que conviene que sea el que es común a la mayor parte de los componentes.
- c. Calcular las corrientes nominales de los equipos, reduciéndolas además al nivel de voltaje común.
- d. Calcular las corrientes máximas de falla (con plena generación) y las mínimas (con generación mínima) para cada uno de los puntos donde se ubican relés.
- e. Determinar si procede el uso de elementos instantáneos de acuerdo a lo explicado en el párrafo 3.4.4.
- f. Calcular los tap de los relés en términos primarios, de acuerdo a lo explicado en el párrafo 3.5.2.a.2, en función de las corrientes nominales de los equipos y verificando respaldos para las fallas mínimas.
- g. Calcular los tap en términos secundarios, para lo que basta multiplicar el valor anterior por la razón inversa de los TT/CC correspondientes. Reajustar si es necesario los valores de acuerdo con los tap que realmente dispone el relé.
- h. Calcular el ajuste del elemento instantáneo, si procede, con las indicaciones dadas anteriormente (1,3 veces la corriente máxima de cortocircuito en la barra siguiente).
- i. Reducir todos los valores de tap a términos primarios y expresarlos en una sola base de voltaje. Marcarlos en el gráfico (log-log) correspondiente.
- j. Calcular los lever de acuerdo a lo indicado en el párrafo 3.5.2.a.3.

Existen dos maneras de determinar el lever; una gráfica y la otra analítica. Para la primera se necesitan las curvas para cada uno de los lever y para la otra, sólo la curva correspondiente al lever máximo.

- En el primer caso, para la corriente máxima de cortocircuito se toma el tiempo del relé con el cual se está coordinando (R_3 en Figura 3.26) y se le agrega el tiempo de paso. El tiempo “ t_c ” así calculado se lleva al gráfico tiempo-corriente y se ubica en un punto “ n_c ” de veces pick-up:

$$n_c = \frac{I_{Fmax}}{\text{Tap (prim)}} \quad (3.25)$$

- El punto (t_c, n_c) coincidirá con alguna de las curvas o quedará cerca de ellas, determinando el lever buscado. Siempre conviene aproximar a la curva superior o bien dejar un lever intermedio.
- Para el segundo caso, el lever en tanto por unidad respecto al lever máximo vale:

$$L_c = \frac{t_c}{t_{nc}} \quad (3.26)$$

Donde t_{nc} es el tiempo para lever máximo tomado como veces pick-up igual n_c . El valor así determinado, dará de inmediato el Lever para los relés Europeos, cuyo Lever máximo es la unidad y habrá que multiplicarlo por 10 en el caso de los relés americanos cuyo Lever máximo es 10.

La coordinación del relé siguiente se hará a partir de una nueva corriente de falla máxima y con un procedimiento similar al expuesto. En el caso de utilizar elementos instantáneos, la coordinación se hará a partir del ajuste de corriente de esta unidad, (el que por supuesto es menor que la corriente de falla máxima) en vez de la corriente de falla máxima.

3.5.4. Ejemplo de cálculo de ajustes

Para mostrar el procedimiento descrito, se considerará el sistema eléctrico de la Figura 3.27.

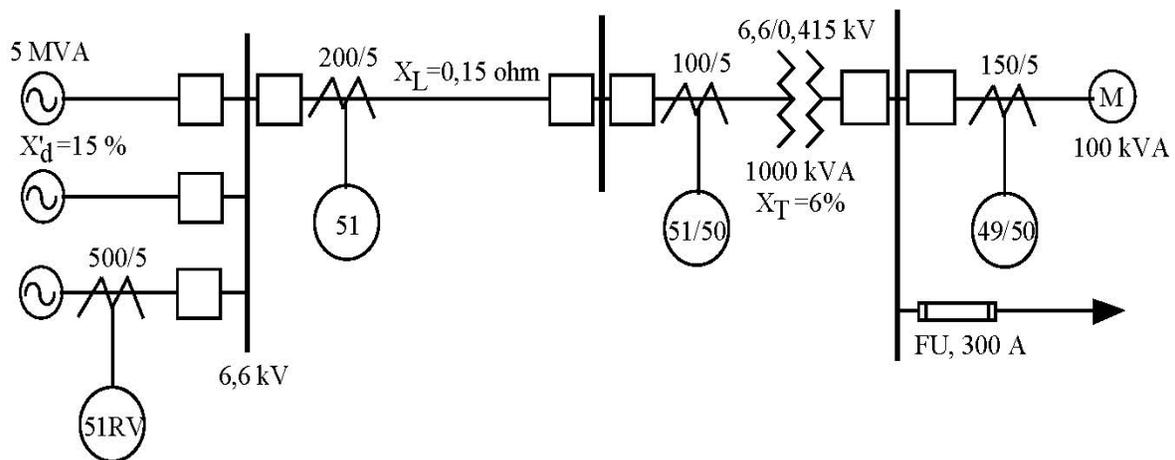


Figura 3.27.- Diagrama unilineal del sistema en estudio

Las protecciones de los equipos son las siguientes:

- Generador : Relé tipo CDV22 con retención de voltaje. Tap 51: 4-5-6-8-10-12-16
- Línea : Relé tipo CDG11 de tiempo inverso. Tap 51: 4-5-6-8-10-12-16
- Transformador : Relé tipo CDG11 de tiempo inverso con unidad instantánea.
- Motor : Relé de sobrecarga térmico, con curva fija y elemento instantáneo
- Alimentador : Fusible de 300 Amperes con curva fija

Las características tiempo-corriente de los relés, para lever máximo (1, ya que se trata de relés europeos) están dadas por las Tablas 3.3 y 3.4.

Tabla 3.3.- Característica tiempo-corriente del Relé CDV22, para Lever máximo

Corriente (Veces Tap)	A) Para Falla (Bajo Voltaje) Tiempo (segundos)	B) Para sobrecarga (voltaje normal) Tiempo (segundos)
2	10,0	20,0
3	6,2	12,0
4	5,0	9,3
5	4,3	7,8
7	3,6	6,4
10	3,0	5,2
15	2,55	4,2
20	2,2	3,6

Tabla 3.4.- Característica tiempo-corriente del Relé CDV11, para Lever máximo

I (Veces tap)	2	3	4	5	6	7	8	10	12	14	16	20
t (segundos)	10	6,2	5,0	4,3	3,85	3,6	3,35	3,0	2,75	2,6	2,5	2,2

Las características tiempo-corriente del relé térmico del motor y del fusible (ambas fijas) corresponden a las indicadas en las Tablas 3.5 y 3.6, respectivamente.

Tabla 3.5.- Característica t-I Relé térmico				Tabla 3.6.- Característica t-I Fusible			
I (amperes)	192	240	800	I (Amperes)	800	1.280	2.240
t (segundos)	60	34	13	t (segundos)	50	3,0	0,2

- a. Dibujar el circuito equivalente por fase (diagrama de impedancias o malla de secuencia positiva) del sistema eléctrico radial al cual se está aplicando la protección de sobrecorriente, indicando los parámetros de cada uno de sus componentes. La Figura 3.28 muestra el diagrama de impedancias del sistema, con todos sus parámetros. Las impedancia en pu están en la base propia de cada equipo

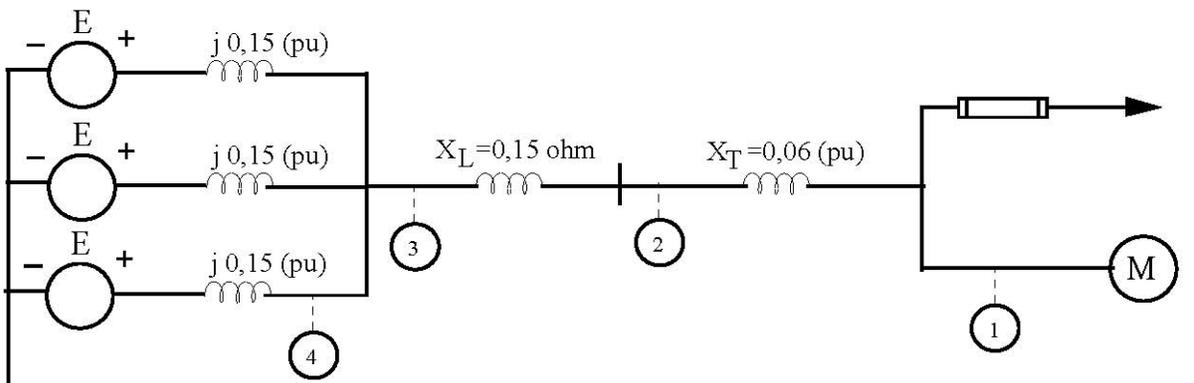


Figura 3.28.- Diagrama de reactancias del sistema

- b. Reducir todos los parámetros a una base común.

Sea $S_B=5$ MVA; $V_{B1}=6,6$ kV □ $I_{B1} = \frac{5 * 10^6}{\sqrt{3} * 6,6 * 10^3} = 437,4$ A y

$$Z_{B1} = \frac{6,6^2}{5} = 8,712 \Omega$$

Por lo tanto: $X_S=0,15$ (pu) con un generador en servicio (Generación mínima)
 $X_S=0,15/3=0,05$ (pu) con los tres generadores en servicio (Generación máxima)
 $X_L=0,15/8,712=0,017$ (pu)
 $X_T=0,06*(5/1)=0,3$ (pu)

Las mallas de secuencia positiva (se suponen cortocircuitos trifásicos), se muestran en la Figura 3.29

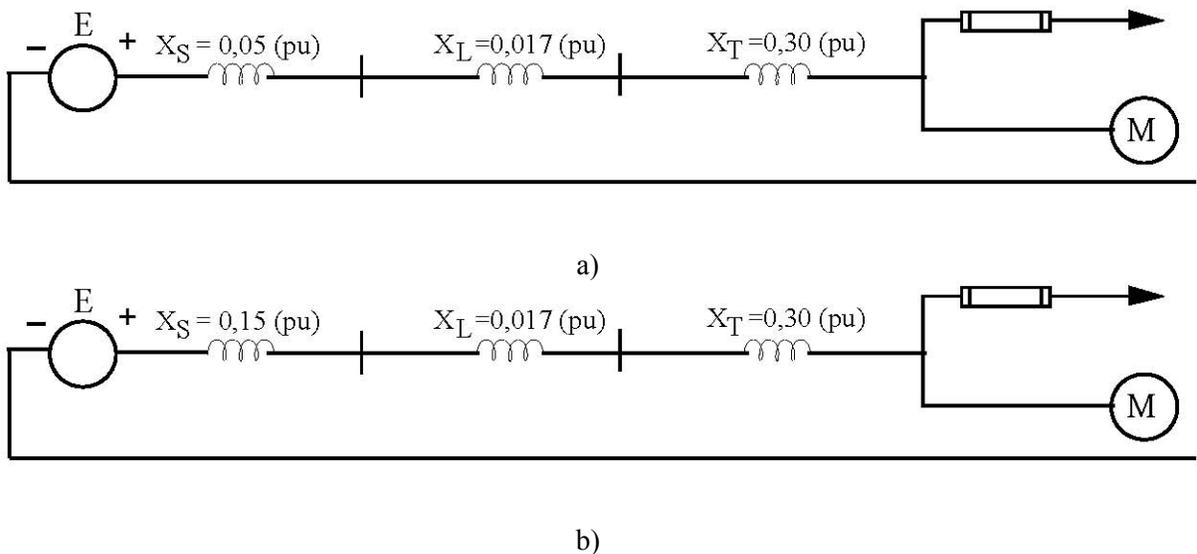


Figura 3.29.- Mallas de secuencia positiva. a) Generación máxima, b) Generación mínima

c. Calcular las corrientes nominales de los equipos, reduciéndolas además al nivel de voltaje común. Se trabajará considerando como nivel de voltaje común el de 6,6 kV (lado de alta), porque en ese lado hay una mayor cantidad de relés.

Generadores: $I_G = \frac{5 * 10^6}{\sqrt{3} * 6,6 * 10^3} = 437,4$ A (Igual a la corriente base del lado de alta)

Línea: $I_L = \frac{2 * 10^6}{\sqrt{3} * 6,6 * 10^3} = 174,95$ A (Se supuso una capacidad de transferencia de 2 MVA para la línea)

Transformador: $I_{T1} = \frac{1000 * 10^3}{\sqrt{3} * 6,6 * 10^3} = 87,48$ A $1000I=$

$$\text{Motor: } I_{M2} = \frac{100 * 10^3}{\sqrt{3} * 0,415 * 10^3} = 139,12 \text{ A}, \text{ que referido al nivel de voltaje común es:}$$

$$I_{M1} = \frac{139,12 * 0,415}{6,6} = 8,75 \text{ A}$$

- d. Calcular las corrientes máximas de falla (con plena generación) y las mínimas (con generación mínima) para cada uno de los puntos donde se ubican relés. Los valores de las corrientes de falla se referirán al nivel de voltaje común, es decir, la corriente base será de 437,4 A, que por comodidad se aproximará a 440 A.

– En la barra de 0,415 kV, punto 1:

$$\dot{I}_{FMAX1} = \frac{\dot{E}}{jX_S + jX_L + jX_T} = \frac{1 \angle 0^\circ}{j0,05 + j0,017 + j0,3} = 2,7248 \angle -90^\circ (\text{pu}) \Rightarrow I_{FMAX1} = 2,7248 * 440 = 1.200 \text{ A}$$

$$\dot{I}_{FMIN1} = \frac{\dot{E}}{jX_S + jX_L + jX_T} = \frac{1 \angle 0^\circ}{j0,15 + j0,017 + j0,3} = 2,1413 \angle -90^\circ (\text{pu}) \Rightarrow I_{FMIN1} = 2,1413 * 440 = 940 \text{ A}$$

– En primario del transformador, punto 2:

$$\dot{I}_{FMAX2} = \frac{\dot{E}}{jX_S + jX_L} = \frac{1 \angle 0^\circ}{j0,05 + j0,017} = 14,9254 \angle -90^\circ (\text{pu}) \Rightarrow I_{FMAX2} = 14,9254 * 440 = 6.600 \text{ A}$$

$$\dot{I}_{FMIN2} = \frac{\dot{E}}{jX_S + jX_L} = \frac{1 \angle 0^\circ}{j0,15 + j0,017} = 5,988 \angle -90^\circ (\text{pu}) \Rightarrow I_{FMIN2} = 5,988 * 440 = 2.640 \text{ A}$$

– En la barra de los generadores, punto 3:

$$\dot{I}_{FMAX3} = \frac{\dot{E}}{jX_S} = \frac{1 \angle 0^\circ}{j0,05} = 20 \angle -90^\circ (\text{pu}) \Rightarrow I_{FMAX3} = 20 * 440 = 8.800 \text{ A}$$

$$\dot{I}_{FMIN3} = \frac{\dot{E}}{jX_S} = \frac{1 \angle 0^\circ}{j0,15} = 6,6667 \angle -90^\circ (\text{pu}) \Rightarrow I_{FMIN3} = 6,6667 * 440 = 2.940 \text{ A}$$

- e. Determinar si procede el uso de elementos instantáneos de acuerdo a lo explicado en el párrafo 3.4.4.

A partir de las corrientes de falla calculadas, se aprecia una reducción considerable en la barra de 415 Volt, respecto al lado de alta del transformador. Luego, se justifica poner relé instantáneo en el relé 2. Por otra parte, como la impedancia de la línea es baja considerada con la de la fuente, no hay una reducción importante de la corriente entre el cortocircuito en el lado de alta del transformador y la barra de los generadores, que justifique poner instantáneo en el relé 3.

- f. Calcular los tap de los relés en términos primarios, de acuerdo a lo explicado en el párrafo **3.5.2.a.2**, en función de las corrientes nominales de los equipos y verificando que den los respaldos correspondientes para las fallas mínimas.

f.1. Protecciones del Motor

- Relé térmico: Normalmente se ajusta con un valor de operación de 105% de la corriente nominal del motor. En este caso:

$$I_{op}=1,05*139,12=146 \text{ A}$$

- Relé instantáneo: El elemento instantáneo se ajusta en un valor que sea superior a la corriente de partida del motor que en este caso se estima en 6 veces la corriente nominal. Se elige 8 veces la corriente nominal, es decir:

$$I_{op}=8*I_N=8*139,12=1.112,96 \text{ A} \quad \square \quad I_{op}=1.110 \text{ A}$$

f.2. Protecciones del Transformador

- Relé temporizado: Normalmente se ajusta entre 1,2 y 1,5 veces la corriente nominal, o sea entre 105 y 131 A. Además debe dar respaldo a la falla mínima de 940 A. Se elige:

Tap=120 A (aproximadamente 1,37 veces la corriente nominal) que corresponde a un tap secundario justo de 6 A.

- Relé instantáneo: El elemento instantáneo se ajusta a 1,3 veces la corriente de falla máxima en la barra siguiente (aguas abajo). En este caso; corresponde a:

$$I_{op}=1,3*1.200=1.560 \text{ A}$$

f.3. Protección de la línea

- Relé temporizado: Normalmente se ajusta entre 1,2 y 1,5 veces la corriente nominal, o sea entre 210 y 260 A. Además debe dar respaldo a la falla mínima de 940 A. Se elige:

Tap= 240 A (aproximadamente 1,37 veces la corriente nominal) que corresponde a un tap secundario justo de 6 A.

f.4. Protección de los Generadores

- Los relés con retención de voltaje CDV22 tiene dos características de operación:
- * Con voltaje nominal su pick-up es del 100% del valor del Tap
 - * Con voltaje inferior al nominal, por ejemplo, 70%, el relé opera con el 40% del valor del Tap.
- La corriente nominal del cada generador es de 440 A y por lo tanto, el ajuste podría estar entre

484 y 660 A (110 a 150% de la corriente nominal). Sin embargo, es usual permitir solo un 10% de sobrecarga y dar al relé también la característica de sobrecarga. Se puede elegir entonces un tap de 500 A, que en condiciones de falla (70% del voltaje nominal) corresponde a una corriente de operación de 200 A.

g. Calcular los tap en términos secundarios, reajustar si es necesario los valores de acuerdo con los tap que realmente dispone el relé.

g.1. Protecciones del Motor

- Relé térmico: $146 \cdot 5 / 150 = 4,87$ A
- Relé instantáneo: $1.110 \cdot 5 / 150 = 37$ A

g.2. Protecciones del Transformador

- Relé temporizado: $120 \cdot 5 / 100 = 6$ A
- Relé instantáneo: $1.560 \cdot 5 / 100 = 78$ A

g.3. Protección de la línea

- Relé temporizado: $240 \cdot 5 / 200 = 6$ A

g.4. Protección de los Generadores

- Relé temporizado: $500 \cdot 5 / 500 = 5$ A

h. Reducir todos los valores de tap a términos primarios y expresarlos en una sola base de voltaje. Marcarlos en el gráfico (log-log) correspondiente. Como el voltaje base elegido es de 6,6 kV, se debe referir a este nivel de voltaje solamente lo que está en 415 Volt; es decir, los Tap de las protecciones del motor y las características tiempo-corriente del térmico del motor y del fusible del alimentador.

h.1. Protecciones del Motor

- Relé térmico: $4,87 \cdot 150 / 5 = 146$ A □ $146 \cdot 0,415 / 6,6 = 9,18$ A (referido al lado de 6,6 kV)
- Relé instantáneo: $37 \cdot 150 / 5 = 1.110$ A □ $1.110 \cdot 0,415 / 6,6 = 70$ A (referido al lado de 6,6 kV)

Las Tablas 3.7 y 3.8 muestran las curvas del relé térmico del motor y del fusible con sus valores actuales de corrientes y los valores referidos a 6,6 kV.

Tabla 3.7.- Característica t-I Relé térmico **Tabla 3.8.- Característica t-I fusible**
I a 415 V en Amp. 192 240 800 **I a 415 V en Amp.** 800 1.280 2.240

I a 6,6 kV en Amp.	12	15	50	I a 6,6 kV en Amp.	50	80	140
t (segundos)	60	34	13	t (segundos)	50	3,0	0,2

h.2. Protecciones del Transformador

- Relé temporizado: $6 \cdot 100 / 5 = 120$ A
- Relé instantáneo: $78 \cdot 100 / 5 = 1560$ A

h.3. Protección de la línea

- Relé temporizado: $6 \cdot 200 / 5 = 240$ A

h.4. Protección de los Generadores

- Relé temporizado: $5 \cdot 500 / 5 = 500$ A

i. Calcular los lever de acuerdo a lo indicado en el párrafo 3.5.2.a.3.

i.1. Relé térmico del motor (1) y fusible del alimentador: Son de características fijas y han quedado definidos en las Tablas 3.7 y 3.8 respectivamente, con cuyos valores se dibujan en el gráfico log-log.

i.2. Relé del transformador (2): En este caso se debería coordinar considerando el valor del instantáneo del relé del motor que es de 70 A, menor que el pick-up del relé del transformador (120 A). Por lo tanto, el Lever del relé del transformador se puede ajustar en su valor mínimo, es decir; 0,1 ya que se trata de relés Europeos. A partir de la Tabla 3.4 se pueden obtener los valores de la característica tiempo-corriente, para Lever 0,1; considerando el 10% del tiempo en cada punto, lo que se indica en la Tabla 3.9 y con cuyos valores se dibuja la curva correspondiente sólo hasta 1.560 A. (Figura 3.30).

Tabla 3.9.- Característica tiempo-corriente del Relé del transformador

I (Veces tap)	2	3	4	5	6	7	8	10	12	Instantáneo
I (Amperes)	240	360	480	600	720	840	960	1.200	1.440	1.560
t (segundos)	1,0	0,62	0,50	0,43	0,385	0,36	0,335	0,30	0,275	Instantáneo

i.3. Relé de la Línea (3): Este relé debe coordinar con el del transformador (2) en el punto de corriente máxima; es decir, en el valor de 1.560 A (pick-up del instantáneo del relé 2), donde le corresponde un tiempo de aproximadamente 0,27 segundos (ver

Figura 3.30). Luego: $t_c=t_2+t_p=0,27+0,4=0,67$ seg. El valor de corriente correspondiente a este tiempo se determina como sigue:

$$n_c = \frac{\text{Tap } 50 - 2}{\text{Tap } 51 - 3} = \frac{1.560}{240} = 6,5$$

De acuerdo con la Tabla 3.4, para $n_c=6,5$ corresponde un tiempo aproximado de 3,7 segundos; es decir, $t_{nc}=3,7$ segundos. Utilizando la expresión (3.26) se tiene

$$L = \frac{t_c}{t_{nc}} = \frac{0,67}{3,7} = 0,18$$

Por lo tanto se elige el lever más cercano, es decir, Lever 51-3=0,2. La curva correspondiente se dibuja con los valores de la Tabla 3.10, que se obtiene a partir de la 3.4, considerando un pick-up de 240 A y un tiempo del 20% del indicado en la Tabla 3.4.

Tabla 3.10.- Característica tiempo-corriente del Relé de la línea

I (Veces tap)	2	5	10	20
I (Amperes)	480	1.200	2.400	4.800
t (segundos)	2	0,86	0,6	0,44

Del gráfico de la Figura 3.30, se desprende que el tiempo de paso real es de aproximadamente 0,45 segundos.

i.4. Relé de los generadores (4): Como la corriente de cortocircuito de un generador es de 2.940 A, la coordinación entre los relés 3 y 4 deberá hacerse considerando este valor. Para este punto, el tiempo de la curva del relé de la línea es de 0,55 segundos, por lo que $t_c=0,55+0,4=0,95$ segundos. Las características tiempo-corriente para Lever máximo del relé CDV22, se muestran en la Tabla 3.3. En condiciones de falla (Curva A), se comporta de acuerdo a la curva de un relé normal de sobrecorriente, pero su pick-up baja a un 40% de la corriente de operación normal. En este caso, la corriente de pick-up en operación normal es de 500 Amperes y por lo tanto, en falla es de 200 Amperes.

Para continuar con la coordinación, corresponde determinar el lever para el relé del generador en condiciones de falla.

Para este caso, $n_c = 2940/200 = 14,8$ veces, es decir, 15. De acuerdo con la Tabla 3.3 (Curva A), $t_{nc}=2,55$ segundos, por lo que el Lever será:

$$L = \frac{t_c}{t_{nc}} = \frac{0,95}{2,55} = 0,37$$

El que se aproxima a 0,4. Luego, las características tiempo-corriente corresponderán a las indicadas en las Tablas 3.11 y 3.12, que corresponden a los valores de tiempo dados por la Tabla 3.3, multiplicados por 0,4

Tabla 3.11.- Característica tiempo-corriente del Relé CDV22, Curva A, para Lever 0,4

N_c	2	3	4	5	7	10	15	20
I (Amp)	400	600	800	1.000	1.400	2.000	3.000	4.000
t (seg)	4	2,48	2,0	1,72	1,44	1,2	1,02	0,88

Tabla 3.12.- Característica tiempo-corriente del Relé CDV22, Curva B, para Lever 0,4

n_c	2	3	4	5	7	10
I (Amp)	1.000	1.500	2.000	2.500	3.500	5.000
t (seg)	8,0	4,8	3,72	3,12	2,56	2,08

Se ha establecido 5.000 Amperes, como límite para el eje de abscisas del gráfico, razón por la cual no tiene sentido agregar en la Tabla 3.12, los valores para 15 y 20 veces tap.

En el gráfico de la Figura 3.30 se puede apreciar que la curva 4 A correspondiente al relé del generador se cruza con la curva del relé 3 de la línea. Esto no tiene importancia ya que la curva 4 A considera solo condiciones de falla con corrientes superiores a 940 Amperes, que es la falla mínima en la barra de 415 Volt, donde el tiempo de paso es de 0,7 segundos, lo cual es más que suficiente.

j. Resumen de ajustes

Relé 1: Motor de 100 kVA, 415 Volt

TT/CC: 150/5

Pick-up relé térmico: 4,87 A

Pick-up relé instantáneo: 37 A

Relé 2: Transformador de 1.000 kVA, 6,6/0,415 kV

TT/CC: 100/5

Tap: 6

Lever: 0,1

Pick-up relé instantáneo: 78 A

Relé 3: Línea de 6,6 kV

TT/CC: 100/5

Tap: 6

Lever: 0,2

Relé 4: Generadores de 5 MVA, 6,6 kV

TT/CC: 500/5

Tap: 5

Lever: 0,4

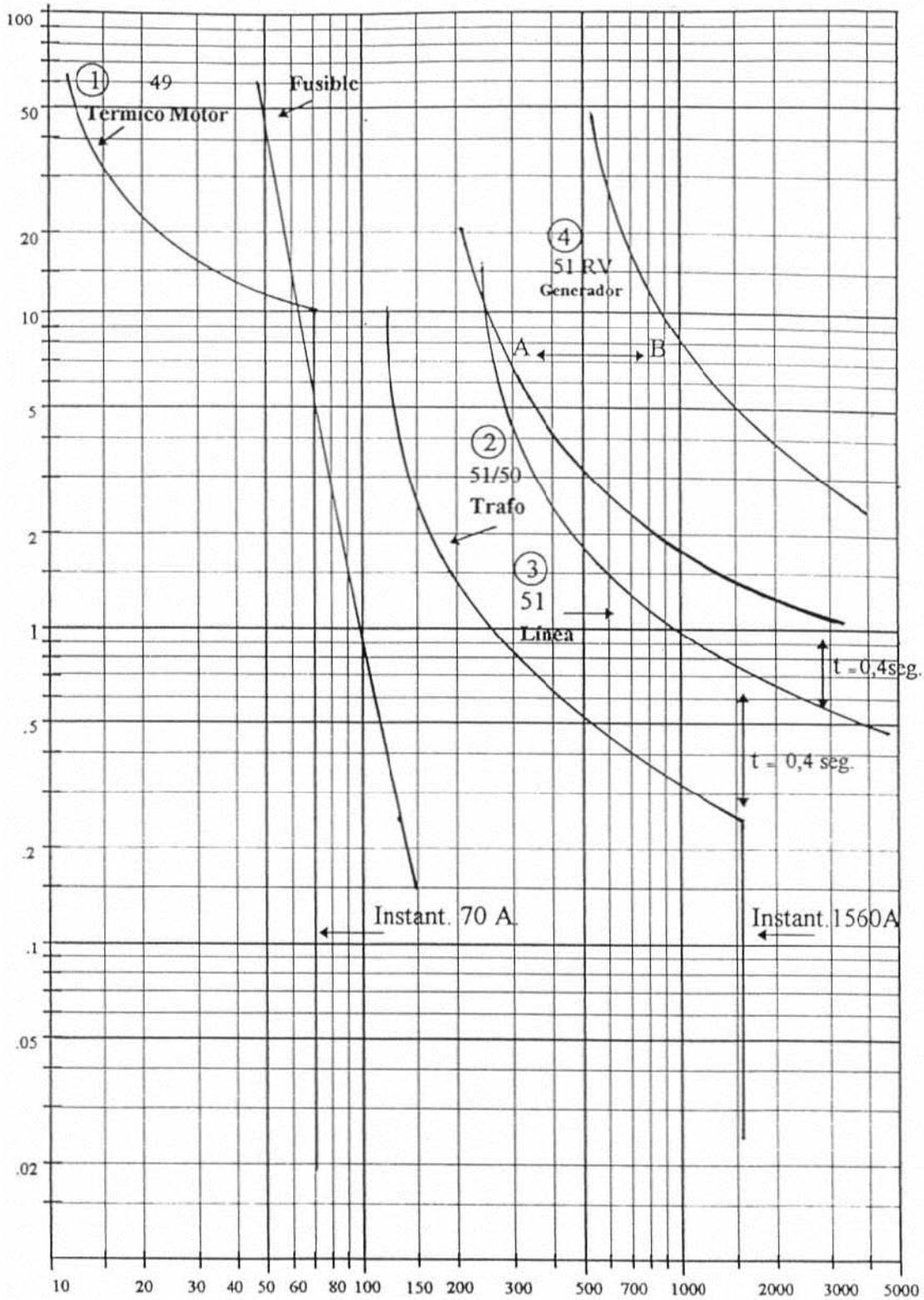


Figura 3.30.- Gráfico resumen de la coordinación del sistema de la Figura 3.27