

CAPITULO 5

PROTECCIONES DE DISTANCIA

5.1. Generalidades

Una de las formas de detectar una anomalía en un sistema eléctrico de potencia es medir su impedancia o reactancia, en un punto dado. Para este fin, la información de voltajes y corrientes se entrega a relés de protección que miden en todo instante la impedancia o reactancia por fase en el sentido de operación y que actúan cuando sus magnitudes bajan de un cierto valor.

A las protecciones que operan bajo este principio se les denomina: “Direccionales de distancia” y se emplean principalmente en la protección de líneas de transmisión. Puesto que la impedancia de una línea de transmisión es proporcional a su longitud, para medir "distancias" se utiliza un relé capaz de medir la impedancia de la línea hasta un cierto punto. Este tipo de protección se diseña para operar solamente con fallas que ocurran entre el punto de ubicación de los relés y un punto dado de la línea, de modo que puedan discriminar entre fallas que ocurran en diferentes secciones de ella.

Las protecciones de distancia son relativamente simples de aplicar, poseen una alta velocidad de operación y pueden proporcionar protección tanto principal (local) como de respaldo.

5.2. Diagramas R-X y P-Q

Para comprender en mejor forma el funcionamiento de las protecciones de distancia se requiere poder representar en forma gráfica las características de operación de sus unidades de medida. Dicha representación requiere la utilización de planos complejos adecuados tales como, los planos R-X y P-Q. Previamente es conveniente recordar que por convención, se define la potencia compleja S , según la expresión (5.1), que considera positiva la potencia reactiva Q , cuando la corriente atrasa al voltaje un ángulo φ ; es decir:

$$\dot{S} = VI^* = P + jQ = VI \cos \varphi + jVI \sin \varphi \quad (5.1)$$

5.2.1. Diagrama R-X

En este diagrama, compuesto por un par de ejes ortogonales, se lleva en la abscisa, la resistencia R y en la ordenada, la reactancia X , de modo que cada punto del plano así formado representa una impedancia que queda determinada por su distancia al origen (módulo Z) y por el ángulo φ que forma con la abscisa, tal como se muestra en la Figura 5.1.

La Figura 5.2 muestra el diagrama fasorial voltaje-corriente, donde se ha situado a la corriente como fasor de referencia, es decir, en el eje horizontal, con el fasor voltaje desfasado un ángulo φ . De esta forma, ambos diagramas son absolutamente compatibles.

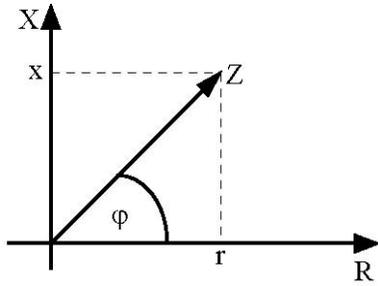


Figura 5.1.- Representación de una impedancia en el plano R-X

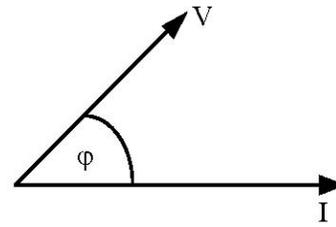


Figura 5.2.- Diagrama fasorial Voltaje-Corriente

Si se considera la Resistencia R, la Reactancia X y la Impedancia Z como operadores complejos y la corriente y el voltaje como fasores, se puede ver que hay compatibilidad de modo que se cumplen en forma correcta todas las relaciones fasoriales.

$$\dot{Z} = Z \angle \varphi \quad \dot{V} = V \angle \varphi \quad \dot{I} = I \angle 0^\circ \quad \Rightarrow \dot{V} = \dot{Z} \dot{I} = ZI \angle (\varphi + 0^\circ) = ZI \angle \varphi \quad (5.2)$$

Puede observarse, comparando ambas figuras, que el ángulo φ representa exactamente lo mismo en todas ellas. El diagrama R-X permite superponer en un mismo gráfico los parámetros R, X y Z de las líneas, máquinas, transformadores, etc., así como los valores de voltaje, corriente y ángulo de cualquier punto de sistema, de acuerdo con las relaciones siguientes:

$$r = \frac{V}{I} \cos \varphi \quad x = \frac{V}{I} \sin \varphi \quad (5.3)$$

o bien:

$$r = Z \cos \varphi \quad x = Z \sin \varphi \quad (5.4)$$

5.2.2. Diagrama P-Q

Este diagrama hace uso de un plano complejo para representar la expresión compleja de la potencia. La abscisa muestra la parte real, es decir, la potencia activa P y la ordenada, la parte imaginaria, o sea, la potencia reactiva Q. $\dot{S} = P + jQ$

De la Figura se puede escribir:

$$\begin{aligned} p &= S \cos \varphi = VI \cos \varphi \\ q &= S \sin \varphi = VI \sin \varphi \end{aligned} \quad (5.5)$$

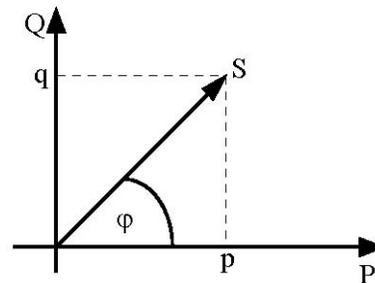


Figura 5.3.- Representación de la potencia compleja en el plano P-Q

Según lo visto, los tres gráficos analizados son completamente compatibles, con la condición de que en las abscisas correspondientes se lleve: La resistencia R, la corriente I y la potencia activa P. De acuerdo con lo anterior, es posible representar un punto $P+jQ$ en el diagrama R-X y viceversa, en que las ecuaciones de transformación son respectivamente:

$$R = \frac{V^2}{P^2 + Q^2} P \qquad X = \frac{V^2}{P^2 + Q^2} Q \qquad (5.6)$$

$$P = \frac{V^2}{R^2 + X^2} R \qquad Q = \frac{V^2}{R^2 + X^2} X \qquad (5.7)$$

5.3. Impedancia y ángulo característico de las líneas

Las líneas de transmisión se diseñan de modo tal que, hasta donde sea posible, se logre equilibrar sus parámetros, por lo cual, su impedancia equivalente por fase resulta ser mas o menos igual para cada fase. Por tanto, si no hay cambios ni en la sección del conductor ni en el material empleado, la impedancia por fase es proporcional a la longitud de la línea entre el punto de medida y el punto considerado (punto de falla, por ejemplo).

La expresión para una impedancia homogénea a lo largo de la línea es del tipo:

$$Z_L = R_L + jX_L \qquad (5.8)$$

Así entonces, cualquiera que sea el tramo considerado, dará como resultado el mismo ángulo de desfase entre el voltaje y la corriente, en condiciones de cortocircuito. La Figura 5.4 muestra un sistema formado por una línea de transmisión, un transformador y las cargas respectivas. En la Figura 5.5 se representa la línea en el diagrama R-X.

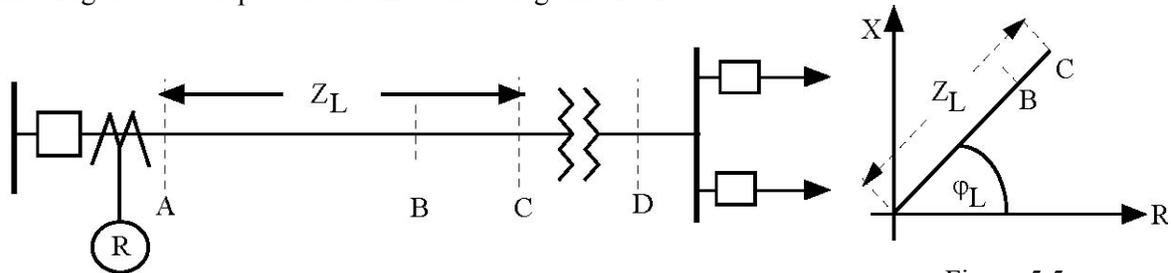


Figura 5.4.- Sistema de transmisión

Figura 5.5.- Representación de la línea en el diagrama R-X

En la Figura 5.5, el trazo AC representa la impedancia de la línea $Z_L \angle \phi_L$. Si se produce un cortocircuito en el punto B, la impedancia queda representada por el trazo AB, con el mismo ángulo. Luego, el ajuste de los relés puede hacerse de modo que proteja la línea por completo, pero que no vea una falla en D, es decir, mas allá del transformador. En términos prácticos, los relés cuentan con zonas de protección lo cual permite dar ajustes que abarquen un porcentaje de la línea (80%, por ejemplo), la línea completa mas el primario del transformador (110%, por ejemplo) y, finalmente, el transformador completo mas una parte de la línea siguiente o de la carga, según sea el caso.

A manera de ejemplo, supóngase que los componentes del sistema de la Figura 5.4 tienen los siguientes parámetros:

$$Z_L=(1+j3) \Omega ; Z_T=(0+j4) \Omega; Z_C=(10+j0) \Omega.$$

La Figura 5.6 representa esta situación en el diagrama R-X, donde la impedancia que mide el relé en condiciones normales es $Z_M=(11+j7) \Omega$. Si ocurre un cortocircuito en la barra D, la impedancia es $Z_{AD}=(1+j7) \Omega$. Si el cortocircuito ocurre en la barra C, la impedancia es $Z_{AC}=(1+j3) \Omega$; es decir, la impedancia de la línea en cortocircuito, queda representada de la misma forma que en la Figura 5.5.

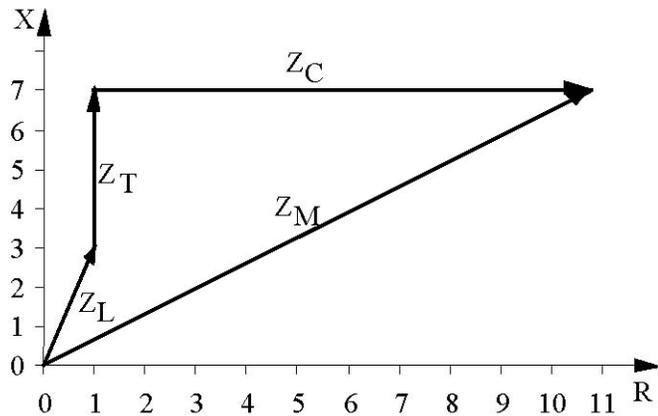


Figura 5.6.- Diagrama R-X para el sistema de la Figura 5.4

5.4. Conexión del relé para fallas entre fases

Las fallas entre fases que ocurren en un SEP pueden ser de tipo bifásica o trifásica. Se analizarán los dos tipos de fallas para determinar la forma en que se debe conectar la protección de distancia, de manera que tenga el mismo alcance para ambas. Ambas situaciones se muestran en la Figura 5.7.

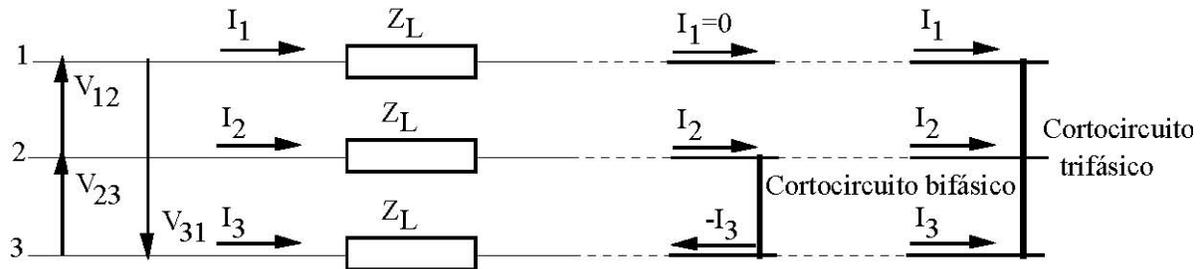


Figura 5.7.- Representación de cortocircuitos bifásico y trifásico

A partir de la Figura 5.7, para un cortocircuito bifásico entre las fases 2 y 3, se puede escribir:

$$\dot{V}_{23} = Z_L \dot{I}_2 + Z_L (-\dot{I}_3) = Z_L (\dot{I}_2 - \dot{I}_3) \Rightarrow \dot{Z}_L = \frac{\dot{V}_{23}}{\dot{I}_{23}} \quad (5.9)$$

De la misma forma, para cortocircuitos entre las fases 1 y 2 y entre las fases 3 y 1, se tiene, respectivamente:

$$\dot{Z}_L = \frac{\dot{V}_{12}}{\dot{I}_{12}} \quad \text{y} \quad \dot{Z}_L = \frac{\dot{V}_{31}}{\dot{I}_{31}} \quad (5.10)$$

En el caso de cortocircuitos bifásicos con arco, el voltaje en el punto de medida aumenta, la corriente y el ángulo entre ambos disminuyen, si se comparan con el caso anterior. Esto se debe a que el arco es de tipo resistivo y su resistencia queda en serie con la impedancia de la línea.

Para los cortocircuitos trifásicos metálicos (Figura 5.7), se tiene que:

$$\dot{Z}_L = \frac{\dot{V}_1}{\dot{I}_1} = \frac{\dot{V}_2}{\dot{I}_2} = \frac{\dot{V}_3}{\dot{I}_3} \quad (5.11)$$

Por otra parte, según las Figuras 5.8 y 5.9 se puede escribir:

$$\begin{aligned} \dot{V}_1 &= \frac{V_{12} \angle -30^\circ}{\sqrt{3}} & \dot{I}_1 &= \frac{I_{12} \angle -30^\circ}{\sqrt{3}} \\ \dot{V}_2 &= \frac{V_{23} \angle -30^\circ}{\sqrt{3}} & \dot{I}_2 &= \frac{I_{23} \angle -30^\circ}{\sqrt{3}} \\ \dot{V}_3 &= \frac{V_{31} \angle -30^\circ}{\sqrt{3}} & \dot{I}_3 &= \frac{I_{31} \angle -30^\circ}{\sqrt{3}} \end{aligned} \quad (5.12)$$

Es decir:

$$\dot{Z}_L = \frac{\dot{V}_{12}}{\dot{I}_{12}} = \frac{\dot{V}_{23}}{\dot{I}_{23}} = \frac{\dot{V}_{31}}{\dot{I}_{31}} \quad (5.13)$$

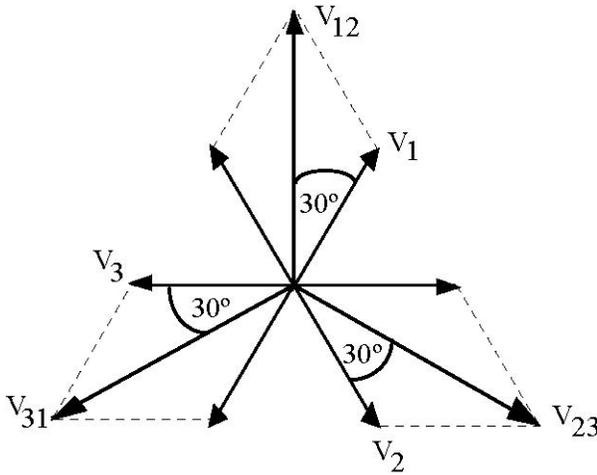


Figura 5.8.- Diagrama fasorial de voltajes

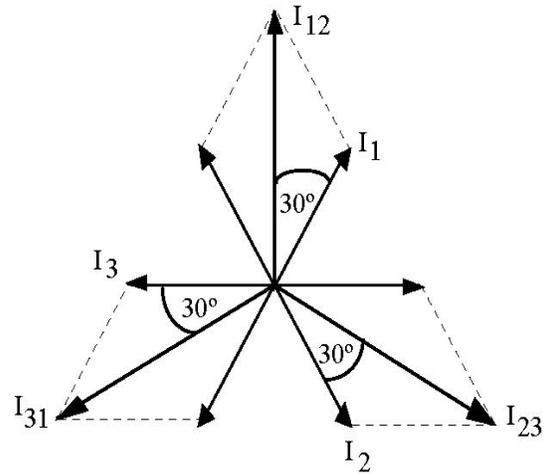


Figura 5.9.- Diagrama fasorial de corrientes

Se puede concluir entonces, que en ambos casos, es posible medir la impedancia por fase y con el mismo alcance, mediante el uso de tres unidades de medida F_1 , F_2 y F_3 , que determinen la impedancia de acuerdo con las tensiones y corrientes dadas por la ecuación (5.13); es decir, el circuito de voltaje de cada unidad se alimenta con tensiones entre líneas y el circuito de corriente requiere tener dos bobinas, alimentadas tal como se muestra en la Figura 5.10.

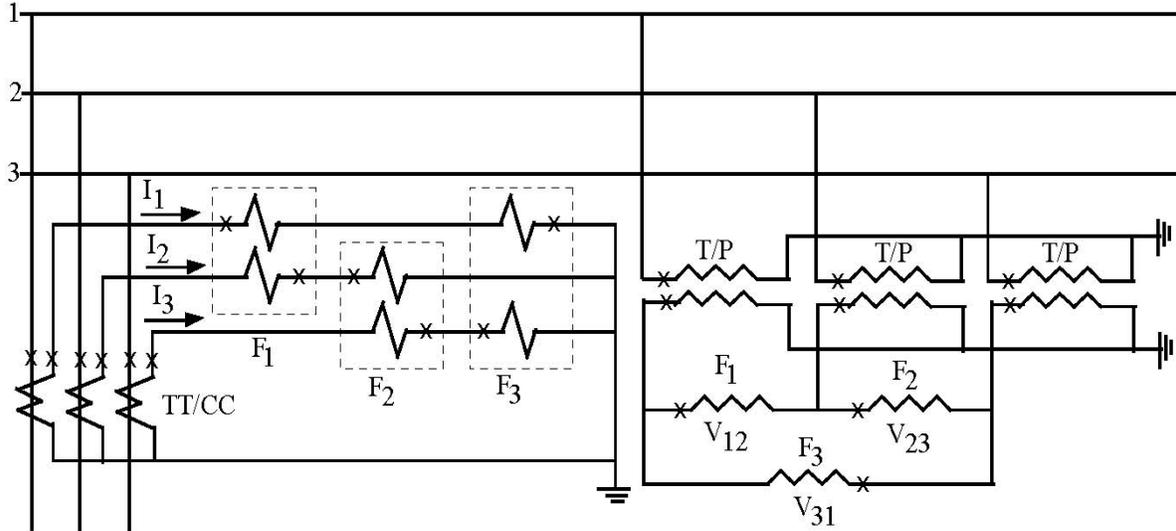


Figura 5.10.- Diagrama de conexiones de la protección de distancia para fallas entre fases y trifásicas

Cuando el circuito de corriente tiene una sola bobina, se pueden utilizar transformadores de corriente auxiliares conectados en estrella-delta, los que permiten obtener las corrientes necesarias.

5.5. Conexión de la protección para fallas monofásicas

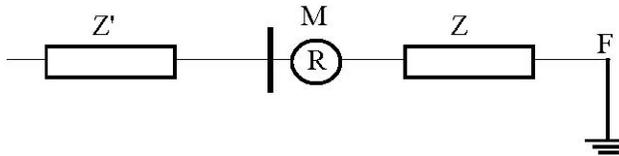


Figura 5.11.- Línea con una falla monofásica

Para el análisis se considerará el sistema cuyo diagrama unilineal se muestra en la Figura 5.11. En el caso de una falla monofásica metálica (la impedancia de falla es cero), en el punto F, las mallas de secuencia quedan conectadas tal como se muestra en la Figura 5.12, donde Z' es impedancia de la línea antes del punto de medida M (donde está ubicado el relé) y Z es la impedancia de la línea entre el punto de medida y el de falla. Los subíndices 1, 2, 0 indican los valores de secuencia respectivos.

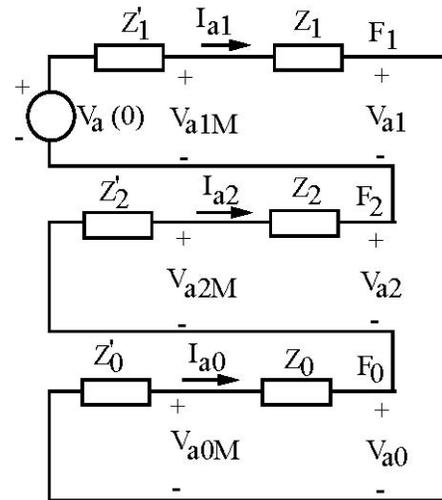


Figura 5.12.- Conexión de las mallas de secuencia para una falla monofásica en el sistema de la Figura 5.11

La tensión fase-neutro en el punto de medida M, para la fase a, V_a es [15]:

$$\dot{V}_{aM} = \dot{V}_{a0M} + \dot{V}_{a1M} + \dot{V}_{a2M} \quad (5.14)$$

A partir del circuito de la Figura 5.12, se pueden determinar los voltajes de secuencia en el punto de medida, que son:

$$\dot{V}_{a1M} = Z_1 \dot{I}_{a1} + \dot{V}_{a1} \quad \dot{V}_{a2M} = Z_2 \dot{I}_{a2} + \dot{V}_{a2} \quad \dot{V}_{a0M} = Z_0 \dot{I}_{a0} + \dot{V}_{a0} \quad (5.15)$$

Reemplazando (5.15) en (5.14) y considerando que la suma de los voltajes de secuencia en el punto de falla es cero (ya que la impedancia de falla es cero), se puede escribir:

$$\dot{V}_{aM} = Z_1 \dot{I}_{a1} + Z_2 \dot{I}_{a2} + Z_0 \dot{I}_{a0} \quad (5.16)$$

En general, en la líneas se tiene que: $Z_1=Z_2$ y por otra parte; $I_{a0}=I_R/3$, donde I_R es la corriente residual; es decir, la que circula por el neutro a tierra. Con las consideraciones anteriores, la ecuación (5.16) queda:

$$\dot{V}_{aM} = Z_1 (\dot{I}_{a1} + \dot{I}_{a2}) + Z_0 \frac{\dot{I}_R}{3} \quad (5.17)$$

La corriente de la fase a, en función de las componentes simétricas es [15]:

$$\dot{I}_a = \dot{I}_{a0} + \dot{I}_{a1} + \dot{I}_{a2} \quad \Rightarrow \dot{I}_{a1} + \dot{I}_{a2} = \dot{I}_a - \dot{I}_{a0} \quad (5.18)$$

La ecuación (5.17) queda entonces:

$$\dot{V}_{aM} = Z_1 (\dot{I}_a - \dot{I}_{a0}) + Z_0 \frac{\dot{I}_R}{3} \quad (5.19)$$

Haciendo las operaciones respectivas, recordando que si se desprecia la corriente de pre-falla, $I_a=I_R$ y ordenando se tiene:

$$\dot{V}_{aM} = Z_1 \dot{I}_a (1 + K_T) \quad (5.20)$$

Donde K_T se denomina “coeficiente de impedancia a tierra” y vale:

$$K_T = \frac{Z_0 - Z_1}{3Z_1} \quad (5.21)$$

Si se considera que para líneas de muy alta tensión se puede encontrar que $Z_1=0,43 \Omega/\text{km}$ y $Z_0=1,3 \Omega/\text{km}$, resulta un $K_T=0,67$.

A partir de (5.20) se puede apreciar que el voltaje en el punto de medida se ve incrementado en una caída de tensión $Z_1 I_a K_T$ o bien $Z_1 I_R K_T$. Desde otro punto de vista y según sea la fase fallada se tendrá:

$$Z_1 = \frac{\dot{V}_{aM}}{\dot{I}_a + \dot{I}_R K_T} = \frac{\dot{V}_{bM}}{\dot{I}_b + \dot{I}_R K_T} = \frac{\dot{V}_{cM}}{\dot{I}_c + \dot{I}_R K_T} \quad (5.22)$$

Para que la impedancia Z_1 se iguale con la impedancia de línea Z_{L1} , es necesario restar a la corriente de fase el valor $I_R K_T$, lo que se logra mediante el circuito de la Figura 5.13, que incluye sólo las unidades de corriente. La conexión de los potenciales se ha omitido, ya que es simple obtener la conexión para contar con los voltajes al neutro. En la Figura 5.13, cada unidad de medida cuenta con dos enrollados para hacer la suma de corrientes. A esta solución se le conoce con el nombre de compensación por corriente de secuencia cero.

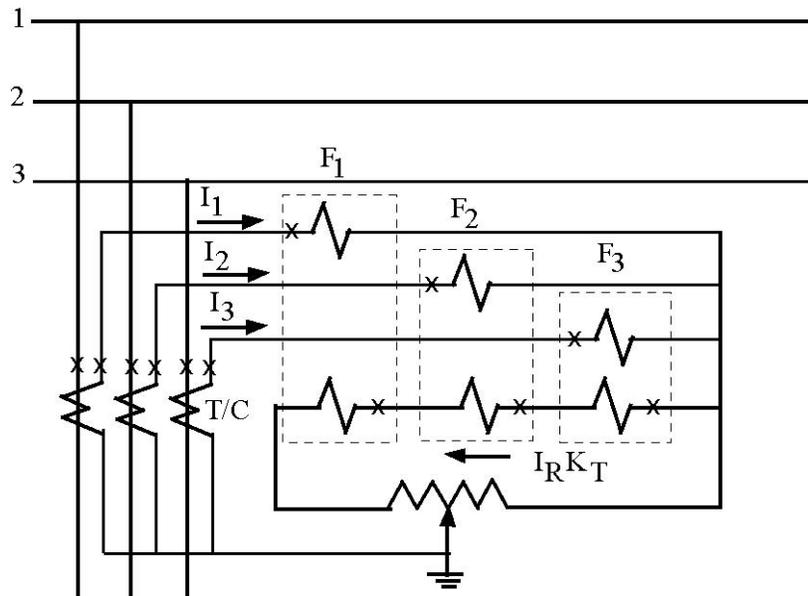


Figura 5.13.- Unidades de medida para fallas monofásicas (sólo las unidades de corriente)

5.6. Tipos de Relés

En un relé de distancia ideal, el elemento móvil es sometido solamente a la acción de un torque eléctrico que es función de la razón V/I y del desfase φ entre estas dos magnitudes. El sentido en que actúa este torque determina la operación del relé. Por convención se aceptará que es positivo cuando tiende a cerrar los contactos (a operar) y negativo en caso contrario. Funcionalmente se tiene, por lo tanto que:

$$T = F(V/I, \varphi) \quad (5.23)$$

En el caso de los relés de tipo electromagnético o de inducción se originan torques que son proporcionales al cuadrado, o bien, al producto de los flujos. La ecuación general del torque de los relés de distancia de estos tipos debe ser cuadrática y homogénea entre las variables V e I . Es decir:

$$T = k_i I^2 - k_v V^2 \pm k_p V I f(\varphi) \quad (5.24)$$

Como la impedancia disminuye al aumentar la corriente, el término $k_i I^2$ debe ser siempre positivo;

en cambio, $k_v V^2$ debe ser siempre negativo, pues la impedancia crece al aumentar el voltaje. El último término, por ser función de V e I puede ser positivo o negativo, según se utilice como torque de operación o de retención. El relé operará cuando el torque eléctrico dado por la ecuación (5.24) sea positivo, o sea cuando:

$$k_i I^2 - k_v V^2 \pm k_p V I f(\varphi) > 0 \quad (5.25)$$

Dividiendo (5.25) por $-I^2$, considerando que $Z=V/I$ y ordenando, se tiene:

$$k_v Z^2 \mp k_p Z f(\varphi) - k_i < 0 \quad (5.26)$$

Es decir, la operación del relé depende exclusivamente de la razón: V/I y del desfase φ entre el voltaje y la corriente. El valor de Z que hace igual a cero la desigualdad anterior, que se designará por Z_a , representa las condiciones límites de operación y determina, para el caso ideal que se considera, la impedancia de ajuste del relé.

La función $f(\varphi)$, según se demostró en 3.3.4.c. (ecuación 3.21) es igual a $\cos(\varphi-\theta)$, donde el ángulo θ es el valor de φ que hace máxima esta función y φ es ángulo de desfase entre el voltaje y la corriente.

Así entonces, la ecuación general de torque para estos relés es de la forma:

$$k_i I^2 - k_v V^2 \pm k_p V I \cos(\varphi-\theta) > 0 \quad (5.27)$$

En los relés de tipo electromagnético, la forma constructiva más común es la de una balanza en uno de cuyos extremos, tal como se indica en la Figuras 5.14.a) y b) o en los dos (Figura 5.14.c) se suspenden núcleos magnéticos, que son succionados por la acción del flujo originado en las bobinas correspondientes. Según que estas bobinas sean recorridas por la corriente I, o bien que se les aplique el voltaje V, el torque que actúa sobre la balanza será proporcional al cuadrado de una de estas magnitudes (si se acepta que no hay saturación). Es decir $T=k_i I^2$ (Figura 5.14 a) o $T=k_v V^2$ (Figura 5.14 b) respectivamente.

Para producir un torque de la forma $k_p V I \cos(\varphi-\theta)$ es preciso colocar bobinas de voltaje y corriente en ambos extremos de la balanza, pero uno de ellos con la polaridad invertida. Tal como se demostró en 3.3.4.c (ecuación 3.21), para la Figura 5.14.c), el torque de operación se puede escribir:

$$T_{op} = k_p V I \cos(\varphi - \theta) \quad (5.28)$$

En relación a la Figura 5.14 c), para estos relés, α es el ángulo en que el flujo φ_v atrasa al voltaje que lo produce. El ángulo β representa el ángulo en que φ_i atrasa a la corriente que lo produce. Esta relación de fases entre los flujos producidos por el voltaje y la corriente se ha adoptado como general, por ser la disposición común encontrada en la gran mayoría de los relés comerciales y es posible obtenerla mediante el uso de circuitos desfasadores adecuados. En este caso entonces, se tiene que: $\theta = \alpha - \beta$.

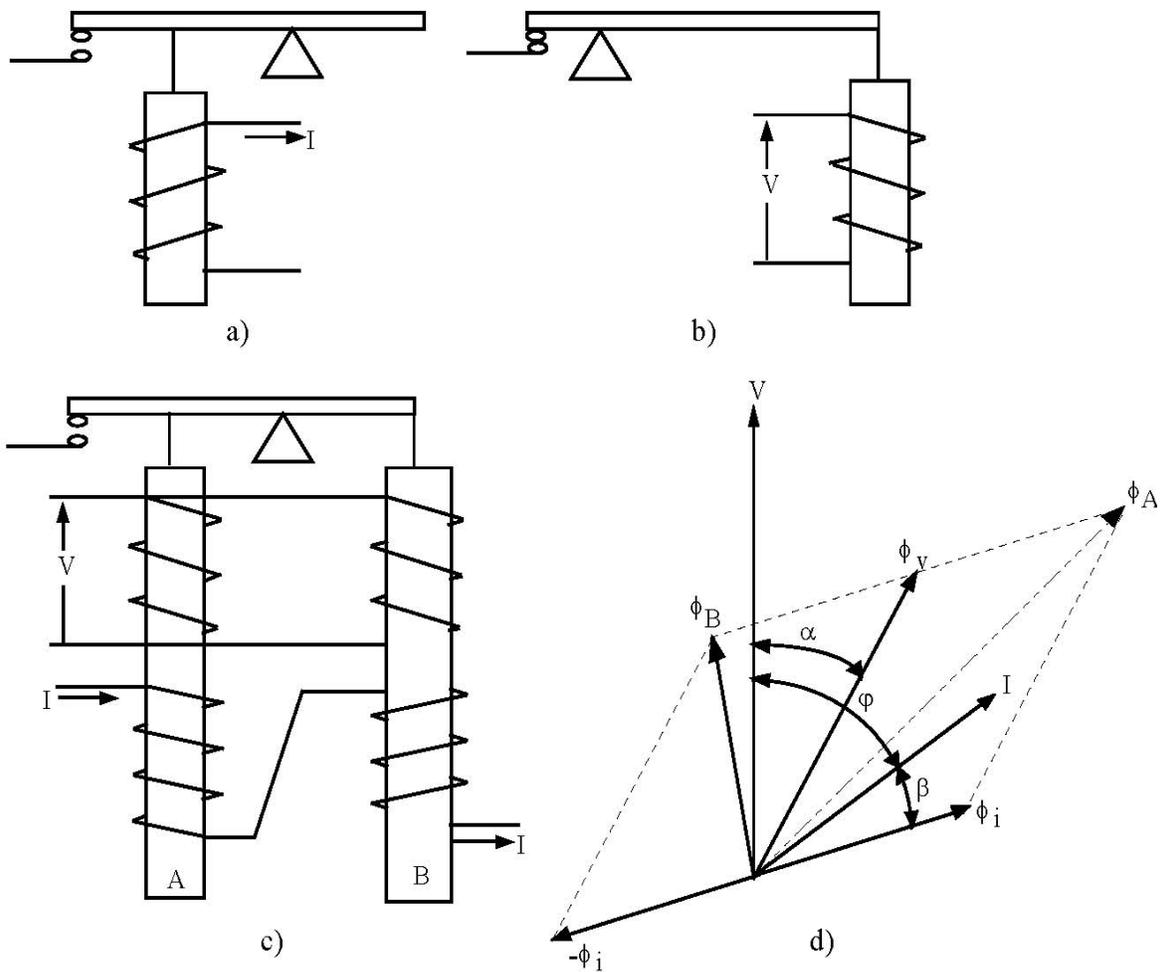


Figura 5.14.- Relés Electromagnéticos tipo balanza

En los relés de inducción, la forma constructiva más utilizada es la de cilindro de inducción con núcleo magnético multipolar. La obtención de torques proporcionales al cuadrado de la corriente o del voltaje es posible colocando dos bobinas a las cuales se aplica el voltaje o bien se hace circular la corriente I desfasando convenientemente los flujos que se producen en cada una de ellas, puesto que de otro modo el torque sería cero, por ser proporcional al seno del ángulo de desfase entre ambos. En cuanto a la obtención de un torque de la forma $VI \cos(\varphi - \theta)$, ello es posible colocando una bobina de voltaje y otra de corriente con un desfasador que permita conseguir un torque como el indicado.

La ecuación general del torque de los relés de distancia que se ha estudiado supone la no existencia de un torque de retención. En la práctica esto no se cumple, pues es necesario mantener los contactos en posición de reposo, para lo cual se hace uso de la gravedad o bien de un resorte. El efecto de este torque, supuesto constante, puede considerarse en la ecuación general introduciendo un término K , es decir:

$$T = k_i I^2 - k_v V^2 \pm k_p V I \cos(\varphi - \theta) - K \quad (5.29)$$

En esta forma la ecuación pierde su homogeneidad y la operación del relé pasa a depender de la corriente. En efecto, la condición de operación está dada ahora por la ecuación (5.30) o bien por

(5.31).

$$k_i I^2 - k_v V^2 \pm k_p V I \cos(\varphi - \theta) - K > 0 \quad (5.30)$$

$$k_v Z^2 \mp k_p Z \cos(\varphi - \theta) - k_i + K/I^2 < 0 \quad (5.31)$$

El efecto de la corriente es especialmente importante para bajos valores de ella, pudiendo despreciarse para valores elevados. Se desprende además, que se puede conseguir una buena precisión haciendo K lo más pequeño posible o en otros términos, disminuyendo el torque de retención hasta el límite que permitan las dimensiones físicas del sistema móvil.

Es posible hacer un análisis cuantitativo del efecto del torque mecánico de retención, estudiando la variación de la impedancia límite de operación Z_a con la corriente I , igualando a cero la desigualdad (5.31):

$$k_v Z_a^2 \mp k_p Z_a \cos(\varphi - \theta) - k_i + K/I^2 = 0 \quad (5.32)$$

En la Figura 5.15 se ha graficado la dependencia de " Z_a " respecto a la corriente " I " expresada por esta ecuación. El valor de la corriente " I_{\min} " que hace cero el valor " Z_a " representa las condiciones de torque eléctrico mínimo necesario para vencer el torque resistente. Para valores elevados de la corriente el valor de " Z_a " se hace constante. La precisión de un relé de distancia se acostumbra a expresarla como el porcentaje de la impedancia de ajuste del valor real de operación para una corriente dada " I_0 ". En la práctica este valor no debe ser inferior al 90% de Z_a .

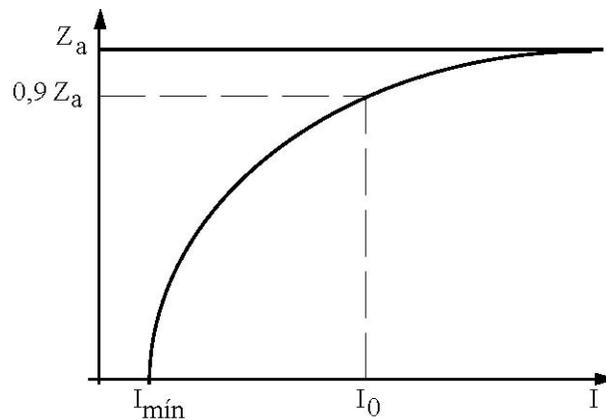


Figura 5.15.- Variación de la impedancia límite de operación con la corriente

5.7. Relés de distancia simples

Aunque es posible construir relés de distancia cuyo principio de operación se basa en la ecuación general del torque completa, la complejidad de su construcción, causada por el excesivo número de bobinas que habría que colocar en un mismo circuito magnético, hace que se utilice la ecuación general reducida a sólo dos de sus términos haciendo cero el restante. Por lo demás, como se verá más adelante, las ventajas que ofrece un relé cuya operación responda a la ecuación general completa, es posible conseguirla por otros procedimientos más sencillos como la compensación. De este modo, es posible obtener tres tipos distintos de relés de distancia con características de operación perfectamente diferenciadas.

5.7.1. Relé tipo impedancia

Con $k_i \neq 0$, $k_v \neq 0$ y $k_p = 0$, la ecuación general del torque (5.27) indica que el relé operará cuando se verifique la relación siguiente:

$$k_i I^2 - k_v V^2 > 0 \quad (5.33)$$

Dividiendo (5.33) por $-I^2$, considerando que $Z=V/I$ y ordenando, se tiene:

$$Z^2 < (k_i/k_v) \quad (5.34)$$

El relé que responde a esta ecuación es el más sencillo de los relés de distancia; recibe el nombre de relé de impedancia y su forma constructiva más común emplea el principio electromagnético. Pertenecen a este tipo el relé HZ que fabrica la Westinghouse. Como ejemplo de este tipo, basado en el principio de inducción puede citarse el relé CFZ de la General Electric. En este relé, las bobinas de corriente y de voltaje actúan sobre circuitos magnéticos separados a fin de evitar la formación de un torque de la forma $k_p VI \cos(\varphi - \theta)$.

La ecuación (5.34) se puede escribir también como:

$$R^2 + X^2 < (k_i/k_v) \quad (5.35)$$

En el diagrama R-X, (5.35) corresponde a la ecuación de una circunferencia con centro en el origen y de radio $\sqrt{k_i/k_v}$ (Figura 5.16). Como se aprecia en esta figura, el relé de tipo impedancia es adireccional.

5.7.2. Relé tipo reactancia

Con $k_i \neq 0$, $k_v = 0$ y $k_p \neq 0$, pero considerando el signo negativo; la condición de operación, de acuerdo a la ecuación general del torque (5.27), estará dada por:

$$k_i I^2 - k_p V I \cos(\varphi - \theta) > 0 \quad (5.36)$$

Dividiendo (5.36) por $-I^2$, considerando que $Z=V/I$ y ordenando, se tiene:

$$Z \cos(\varphi - \theta) < (k_i/(k_i/k_p)) \quad (5.37)$$

Desarrollando la expresión (5.37) se puede escribir:

$$R \cos\theta + X \sin\theta < (k_i/k_p) \quad (5.38)$$

Relés que corresponden a esta ecuación se utilizan en algunos casos especiales para bloquear la operación de otros relés de distancia en el caso de oscilaciones de máquinas síncronas. En el diagrama R-X, la ecuación (5.38) corresponde a una recta cuya distancia al origen es (k_i/k_p) y que forma un ángulo θ con el eje X. Para los valores extremos de θ (0° y 90°), la recta es paralela, al eje de las X o al eje de las R, respectivamente. En este último caso está su aplicación más común, en el llamado relé de reactancia, ($\theta=90^\circ$), donde el relé operará cuando:

$$X < (k_i/k_p) \quad (5.39)$$

La Figura 5.17 muestra la representación en el diagrama R-X del relé según las ecuaciones (5.38) y (5.39). Relés de reactancia tipo cilindro de inducción son el GCX de la General Electric y el XCG de la English Electric.

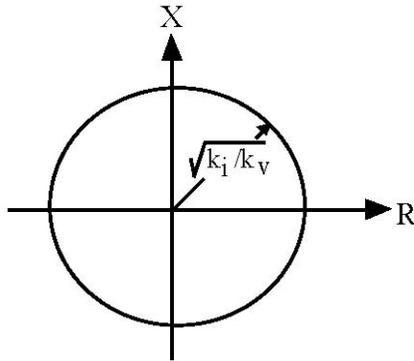


Figura 5.16.- Relé de tipo impedancia

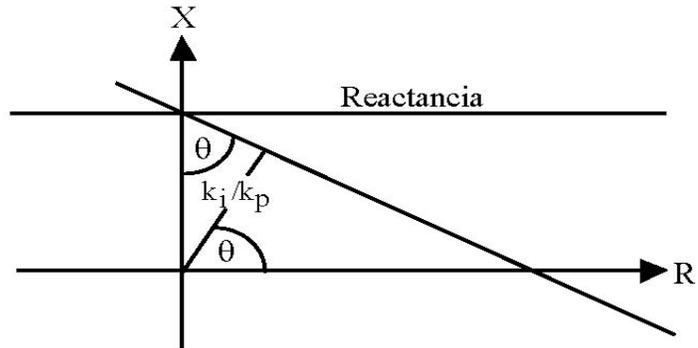


Figura 5.17.- Relé de tipo reactancia

5.7.3. Relé tipo admitancia o tipo mho

Con $k_i=0$, $k_v \neq 0$ y $k_p \neq 0$ pero considerando el signo positivo, la condición de operación, según la ecuación (5.27) está dada por:

$$-k_v V^2 + k_p V I \cos(\varphi - \theta) > 0 \quad (5.40)$$

Dividiendo (5.40) por $-(VI)$, considerando que $Z=V/I$ y ordenando, se tiene:

$$Z < (k_p/k_v) \cos(\varphi - \theta) \quad (5.41)$$

$$[Z/\cos(\varphi - \theta)] < (k_p/k_v) < (k_p/k_v) \quad (5.42)$$

Puesto que la desigualdad anterior puede escribirse también como sigue:

$$Y \cos(\varphi - \theta) > (k_v/k_p) \quad (5.43)$$

Los relés que responden a esta ecuación se denominan “relés tipo mho”, o de admitancia. En su forma más común emplean el principio de inducción y entre ellos se pueden mencionar, el relé GCY de la General Electric y el YCG, de la English Electric.

A partir de la ecuación (5.42) se puede demostrar que la representación de la característica de operación de este relé en el diagrama R-X corresponde a una circunferencia que pasa por el origen del diagrama, con $\text{radio} = 1/2(k_p/k_v)$ y cuyas coordenadas del centro son: $[1/2(k_p/k_v)\cos\theta, 1/2(k_p/k_v)\sin\theta]$, tal como se muestra en la Figura 5.18. Se puede apreciar aquí, que este relé es direccional, ya que no tiene puntos de operación en el tercer cuadrante.

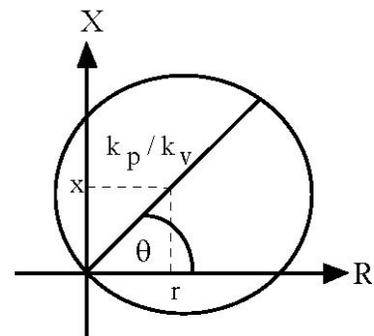
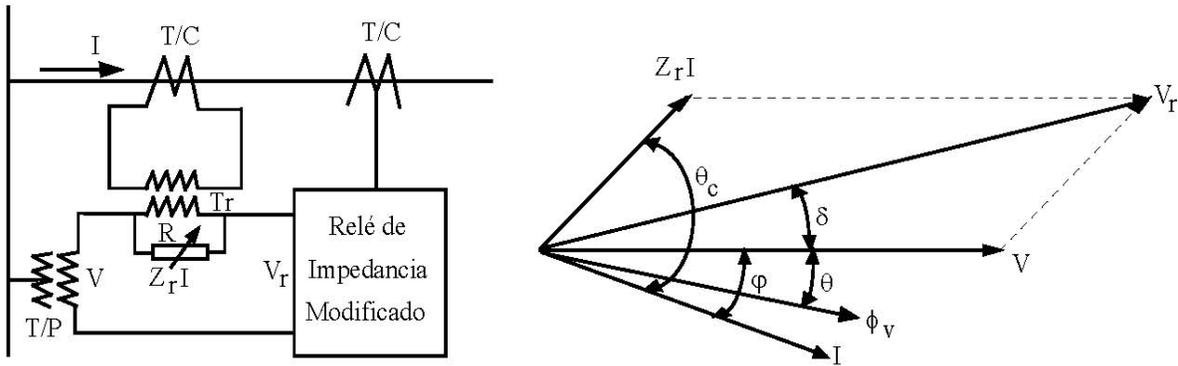


Figura 5.18.- Relé tipo admitancia

5.8. Relés de distancia compensados

Las características de operación de los relés de distancia pueden mejorarse en algunos casos especiales de aplicación, mediante un torque adicional de retención que dependa exclusivamente de la corriente. Los relés de distancia simple estudiados anteriormente, al ser modificados de esta manera, reciben el nombre de relés compensados.

La forma más simple de compensar un relé de distancia (de tipo electromecánico) consiste en introducir en serie con el voltaje del sistema V , una tensión adicional $V_c = Z_r I$ proporcional a la corriente y que, para el caso más general, se considerará adelantada en un ángulo θ_c respecto a la corriente. En el caso de los relés electromagnéticos se puede conseguir a través de un “transformador-reactor” o “transactor”, que consiste en un transformador (Tr en la Figura 5.19 a) con un entrehierro en su circuito magnético a fin de evitar la saturación, por cuyo primario se hace circular la corriente del sistema y en su secundario se conecta una resistencia variable R que permite variar la característica de Z_r . Si se considera a V como origen de vectores tal como se muestra en la Figura 5.19 b), se puede escribir:



a) b)

Figura 5.19.- Compensación de un relé de distancia: a) Circuito, b) Diagrama Fasorial

$$V_c = Z_r I \angle(\theta_c - \varphi) \quad (5.44)$$

Luego, el voltaje aplicado al relé será:

$$V_r = \sqrt{V^2 + Z_r^2 I^2 + 2Z_r V I \cos(\theta_c - \varphi)} \quad (5.45)$$

Para obtener la ecuación que define la operación de los relés de distancia, es necesario reemplazar el voltaje V de los tres casos simples ya estudiados por el nuevo voltaje compensado V_r .

5.8.1. Relé tipo impedancia compensado

Reemplazando V por V_r en la ecuación (5.33), el relé operará cuando se verifique la relación

$$k_i I^2 - k_v V_r^2 > 0 \quad (5.46)$$

o bien:

$$k_i I^2 - k_v \left[V^2 + Z_r^2 I^2 + 2Z_r V I \cos(\theta_c - \varphi) \right] > 0 \quad (5.47)$$

lo que se puede escribir en función de la impedancia Z , como:

$$Z^2 + 2Z_r Z \cos(\theta_c - \varphi) < (k_i / k_v) - Z_r^2 \quad (5.48)$$

Desarrollando y ordenando la ecuación (5.48), se puede escribir:

$$(R + Z_r \cos \theta_c)^2 + (X + Z_r \sin \theta_c)^2 < (k_i / k_v) \quad (5.49)$$

La representación de esta ecuación en el diagrama R-X, corresponde a una circunferencia de radio $\sqrt{k_i / k_v}$, cuyo centro tiene coordenadas $(-Z_r \cos \theta_c)$ y $(-Z_r \sin \theta_c)$. El cuadrante en el cual quede ubicado el centro, depende del ángulo θ_c . En la mayoría de los casos prácticos conviene que el centro del círculo quede en el primer cuadrante, para lo cual será preciso que $180^\circ < \theta_c < 270^\circ$. En este caso, el relé de impedancia compensado se representa como se muestra en la Figura 5.20. Por otra parte, para que el origen quede dentro del círculo, es necesario que $Z_r < \sqrt{k_i / k_v}$. En el caso en que $Z_r = \sqrt{k_i / k_v}$, la circunferencia pasa por el origen, teniendo la misma característica del relé de admitancia simple (relé tipo mho). Un ejemplo de relé de impedancia compensado es el HZM de la Westinghouse, de tipo electromagnético.

5.8.2. Relé tipo admitancia compensado

Reemplazando V por V_r en la ecuación (5.40), el relé operará cuando se verifique la relación

$$-k_v V_r^2 + k_p V_r I \cos(\theta - \varphi - \delta) > 0 \quad (5.50)$$

donde δ es el ángulo entre el voltaje V_r y V indicado en la Figura 5.19 b). La expresión (5.49) se puede escribir:

$$-k_v V_r^2 + k_p V_r I [\cos(\theta - \varphi) \cos \delta + \sin(\theta - \varphi) \sin \delta] > 0 \quad (5.51)$$

donde:

$$\cos \delta = \frac{V + Z_r I \cos(\theta_c - \varphi)}{V_r} \quad \text{y} \quad \sin \delta = \frac{Z_r I \sin(\theta_c - \varphi)}{V_r} \quad (5.52)$$

Reemplazando los valores de $\cos \delta$ y $\sin \delta$ en la expresión (5.51) y luego de algunas reducciones se llega a:

$$Z^2 - 2Z \left[\frac{1}{2} (k_p / k_v) \cos(\theta - \varphi) - Z_r \cos(\theta_c - \varphi) \right] < (k_p / k_v) Z_r \cos(\theta - \theta_c) - Z_r^2 \quad (5.53)$$

o bien:

$$\left[R - \left(\frac{1}{2} k_p / k_v \cos \theta - Z_r \cos \theta_c \right) \right]^2 + \left[X - \left(\frac{1}{2} k_p / k_v \sin \theta - Z_r \sin \theta_c \right) \right]^2 < \left(\frac{1}{2} k_p / k_v \right)^2 \quad (5.54)$$

Que es la ecuación de un círculo de radio $\left(\frac{1}{2} k_p / k_v \right)$ cuyo centro tiene por coordenadas

$$\left[\frac{1}{2} k_p / k_v \cos \theta - Z_r \cos \theta_c \right] \quad \text{y} \quad \left[\frac{1}{2} k_p / k_v \sin \theta - Z_r \sin \theta_c \right] \quad (5.55)$$

Tal como se muestra en la Figura 5.21

El elemento correspondiente a la tercera zona del relé GCY, fabricado por la General Electric, pertenece a este tipo y emplea el principio de inducción para su funcionamiento.

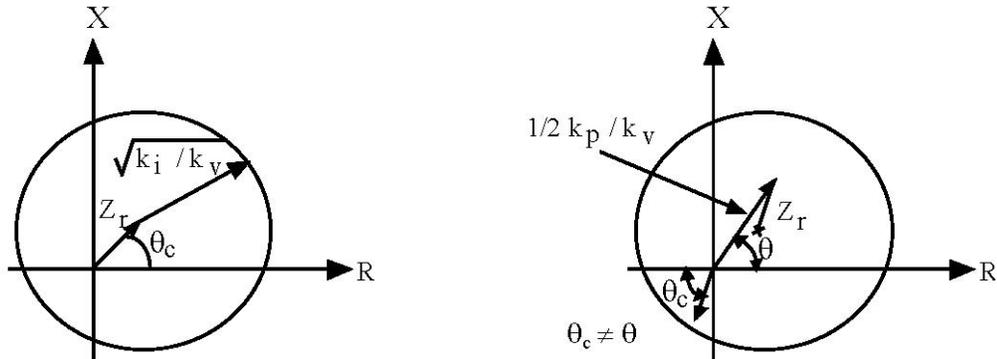


Figura 5.20.- Relé de Impedancia compensado Figura 5.21.- Relé de Admitancia compensado

Con la aparición de los elementos electrónicos semiconductores, se diseñaron relés electrónicos analógicos basados en circuitos con amplificadores operacionales, multiplicadores analógicos, etc., lo que permitió flexibilizar un poco la forma de las zonas de operación. Con esto, además de las formas típicas de los relés electromecánicos (de impedancia, de reactancia y de admitancia) se obtenían óvalos, líneas inclinadas, etc., pero los principios de operación y los criterios para la selección del tipo de relé se siguieron manteniendo.

Actualmente, con la tecnología digital, es posible obtener virtualmente cualquier forma de zona de operación y diseñar relés con cierto grado de “inteligencia” o adaptabilidad a la falla, usando para ello la forma de onda de los primeros ciclos, etc. Los relés electrónicos digitales (numéricos o con microprocesadores) incluyen normalmente 4 zonas de operación, cuyas características pueden ser las ya descritas; pero además, sus características constructivas les permiten disponer de una característica diferente, llamada cuadrilateral. Entre estos tipo de relés se encuentran, el DLPD de la General Electric [13] y el SEL 321 de Siemens [16], en el cual, la protección para fallas a tierra presenta características de distancia cuadrilaterales.

5.9. Principios generales de aplicación de los relés de distancia

5.9.1. Determinación de la impedancia de ajuste secundaria

Debido a la necesidad de reducir el voltaje y la corriente, los relés se conectan a través de transformadores de potencial y de corriente. La impedancia que “ve” el relé, desde el lado secundario de los transformadores de medida, es menor que la impedancia real. Designando por Z_s dicha impedancia, tendremos que:

$$Z_s = \frac{V_s}{I_s} = \frac{\frac{V}{R_v}}{\frac{I}{R_c}} = Z \left[\frac{R_c}{R_v} \right] \quad (5.56)$$

Donde R_v y R_c son las razones de transformación de los transformadores de potencial y de corriente respectivamente y Z es la impedancia real, siendo V e I el voltaje y la corriente primarios. Es decir, para obtener la impedancia secundaria que realmente ve el relé es necesario multiplicar la impedancia primaria por la razón R_c/R_v . Dicha razón es siempre menor que uno, por lo tanto Z_s es siempre menor que Z .

5.9.2. Zonas de alcance

Como estas protecciones se aplican fundamentalmente en líneas de transmisión, que tienen fuentes de cortocircuito en ambos extremos, ya que interconectan sistemas y además se requiere que en lo posible, las fallas se despejen simultáneamente para no afectar su estabilidad, se explota la particularidad que tienen para operar hasta distancias bien determinadas o zonas de alcance. Si en ambos extremos de una línea, se aplican protecciones direccionales de distancia cuyo alcance corresponde a su largo total, se las podría hacer operar en forma instantánea, sin tener problemas de coordinación, logrando una perfecta selectividad; sin embargo, esto es imposible en la práctica, por los siguientes motivos.

- Errores de medida, provenientes de todos los componentes que intervienen en la determinación de la impedancia tales como: Insuficiente transposición o ausencia de transposición de los conductores de la línea, errores de los transformadores de medida en régimen transitorio (durante las fallas), influencia de la temperatura en la resistencia de los conductores, errores propios de los relés, etc.
- Influencia de la resistencia de falla, la que se agrega a la impedancia del tramo de línea afectado.
- Variación del tipo de cortocircuito durante la falla: Un cortocircuito monofásico o bifásico, por ejemplo, puede transformarse en uno trifásico o en uno bifásico a tierra, por ionización del aire circundante.
- Cortocircuito entre fases de líneas en doble circuito: Cuando por las mismas estructuras se montan dos circuitos paralelos, pueden ocurrir cortocircuitos entre fases de circuitos diferentes, lo que es imposible manejar por la protección.
- Variación de la configuración del sistema.
- La pequeña impedancia que ofrece el sistema de barras de una subestación, lo que se traduce en una imprecisión del punto límite de operación de la protección a menos que se eleve la precisión a límites tales que hagan este tipo de relé absolutamente antieconómico.

Si en la subestación A del sistema representado en la Figura 5.22 se ajusta el relé 1 de modo que, opere para fallas en toda la zona AB, se corre el peligro, por las razones expuestas anteriormente, que el relé opere indebidamente para fallas que ocurran más allá de la subestación B. En la práctica este inconveniente se subsana ajustando el relé de modo que proteja en forma instantánea (de 1 a 3 ciclos) solamente entre el 80 y 95% de la línea, dejando el resto para posibles errores de operación del relé.

Para proporcionar protección al tramo final se ubica en A otro elemento de distancia que cubra todo el tramo AB y aproximadamente en 50% de tramo BC, pero con un cierto retardo de tiempo (de 1 a 2 segundos) de modo de evitar la descoordinación con el relé que protege la sección inicial de la línea BC (relé 3). Es costumbre disponer de un tercer elemento en A, con un retardo mayor (2,5 a 3 segundos) que el del segundo elemento, que cubra las zonas AB y BC y, aproximadamente, un 25% de la zona CD.

Para que la protección sea selectiva, el relé 3 en la subestación B, por ejemplo, no debe operar para fallas producidas a la izquierda de B, para lo cual es indispensable que la protección de distancia sea direccional, lo que según se vio en la sección 5.9, sólo cumple el relé de admitancia; por lo tanto, los relés de impedancia y reactancia deben proveerse con un elemento direccional para su correcto funcionamiento. Normalmente, las segundas zonas que alcanzan a los transformadores llegan hasta ese punto y las tercera zonas cubren totalmente el transformador. Debido a que los transformadores tienen una reactancia del orden de la de las líneas, esto se aprovecha para dar protección de respaldo (remoto) en segunda y tercera zona a los transformadores.

Si en el sistema de la Figura 5.22 se supone una falla en el punto F_1 , los 4 esquemas que “miran” hacia ese punto (1-3-4 y 6) se ponen instantáneamente en funcionamiento. La falla es despejada por las protecciones 3 y 4 que la “ven” en primera zona. Al despejarse la falla, los relés 1 y 6 se reponen. En caso que la falla no hubiera sido despejada por los relés de primera zona, habrían operado en forma temporizada los relés 1 y luego el 6.

Cuando la falla ocurre en el punto F_2 , se ponen en funcionamiento los mismos esquemas anteriores. El relé 3 operaría instantáneamente (primera zona) con lo que se repone el relé 1 (que ve la falla en segunda zona). El relé 4 opera con un cierto retardo de tiempo porque ve la falla en segunda zona y se repone el relé 6 que había comenzado a contar su tiempo de tercera zona.

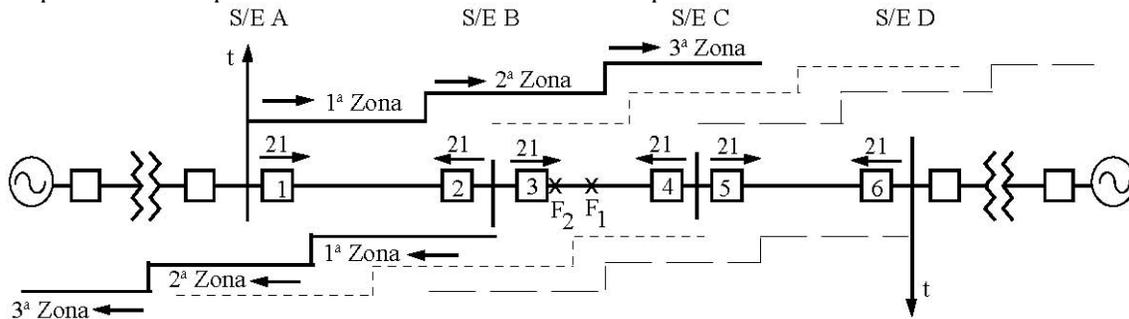


Fig. 5.22.- Sistema protegido con relés de distancia

5.9.3. Variación del límite de la zona de operación de la protección de distancia

En los sistemas donde existe generación en puntos que caen dentro de las zonas de operación de los relés de distancia, el límite de dichas zonas depende de la generación. En la sistema de la Figura 5.23, supóngase que el interruptor 1 es operado por un relé de distancia y que ocurre una falla en el

punto C, límite de la segunda zona. Si se conecta a la barra B un generador G_2 , la falla se verá alimentada desde las SS/EE A y B. Considerando que el voltaje de falla es cero, el voltaje en el punto de ubicación del relé será:

$$V = I_1 Z_1 + (I_1 + I_2) Z_2 \quad (5.57)$$

La impedancia que mide el relé en estas condiciones es:

$$Z_r = \frac{V}{I_1} = Z_1 + \frac{I_1 + I_2}{I_1} Z_2 \quad (5.58)$$

Sea:

$$k = \frac{I_1 + I_2}{I_1} \quad (5.59)$$

Entonces, la impedancia que mide el relé se puede escribir:

$$Z_r = Z_1 + k Z_2 \quad (5.60)$$

Cuando no hay alimentación desde B, el factor k vale 1. En general, el valor de k depende de la generación en ambos puntos de alimentación. De las ecuaciones anteriores se desprende que el límite de la segunda zona se aproxima al relé cuando aumenta la generación en B y se aleja cuando disminuye, si la generación en A se mantiene constante. Lo mismo ocurre con el límite de la tercera zona.

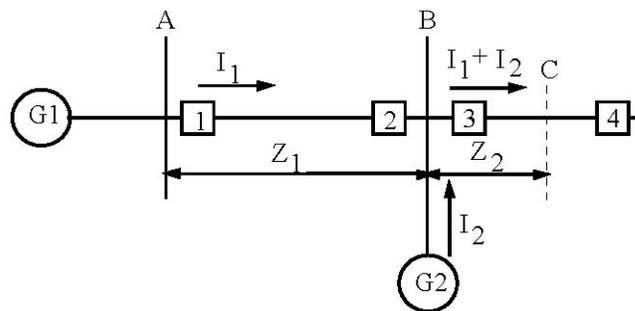


Figura 5.23.- Sistema con generación en un punto situado dentro de la zona de operación de los relés de distancia

5.9.4. Accesorios complementarios de los relés de distancia

Los relés de distancia pueden ser complementados con diversos accesorios para mejorar su funcionalidad, selectividad, rapidez y seguridad. Algunos de ellos se detallan a continuación.

– Transferencia de Desenganche

En líneas que son protegidas simultáneamente en ambos extremos con relés de distancia, es frecuente complementar la protección con la “transferencia de desenganche”, que consiste simplemente en que la señal de apertura de primera zona se transmite hacia el otro extremo para producir la operación inmediata del interruptor de poder. Como medida de precaución contra

aperturas indeseadas, causadas por fallas en el sistema de transmisión o similar, sólo se respeta esta orden si el relé receptor está viendo la falla al menos dentro de la tercera zona. Este esquema permite acelerar la apertura del extremo lejano a la falla, cuando ésta se encuentra en el tramo de la línea protegida por la segunda zona, convirtiendo el esquema prácticamente en una protección unitaria de operación instantánea.

– **Comparación Direccional**

La teoría de este esquema es que se usan dos relés ajustados en su operación instantánea a una distancia mayor a la de la línea protegida, pero la operación se produce sólo si ambos ven la falla simultáneamente.

Esto requiere de un sistema de comunicaciones altamente confiable, pero permite usar relés con alta sensibilidad ya que pueden ajustarse a una impedancia mucho mayor que la de la línea. Es muy usado en zonas donde la resistencia de pie de torre puede ser alta, causando altas impedancias de falla monofásica. El esquema se implementa con relés ajustados con su primera, segunda y tercera zonas en forma tradicional, pero con una cuarta zona ajustada a una alta impedancia e intercomunicados entre los dos extremos de la línea. El relé opera instantáneamente si ve la falla en cuarta zona y simultáneamente recibe una señal del otro extremo, indicando que también se está viendo la falla en cuarta zona. Si la señal no se recibe por falla de comunicación u otro, el relé opera en forma normal en sus primera zona instantánea y segunda y tercera zona retardadas.

En todo caso es conveniente ajustar la cuarta zona a un valor tal que el relé no alcance a ver la impedancia de la carga normal, dado que si en esas condiciones recibiera una señal falsa del otro extremo, podría provocar la apertura indeseada de la línea.

– **Bloqueo contra Oscilaciones de Potencia**

De acuerdo con lo indicado en el punto anterior, para líneas muy largas y/o para relés muy sensibles, es posible que la última zona de operación del relé se acerque a la zona de impedancia de carga. Esto se hace crítico cuando ocurren oscilaciones de potencia debido a fenómenos transientes entre las máquinas sincrónicas, ya que la impedancia de carga puede entrar a la zona de operación del relé durante un tiempo suficiente para hacer operar la protección. Para evitar esta operación indeseada, se agrega otra zona de operación, levemente mas grande que la anterior y se detecta el tiempo que transcurre en el paso de puntos de impedancia del sistema entre los límites de una zona y la otra. Si este tiempo es corto, el relé se comporta como tal de acuerdo a lo que ya se ha visto. Sin embargo, si este tiempo es mayor a un valor predeterminado, la operación se bloquea totalmente hasta que el punto de impedancia del sistema haya permanecido fuera de las zonas de operación del relé por un tiempo suficiente como para considerar que el fenómeno transiente ha desaparecido.