

7.3 TIPOS DE RELEVADORES DE DISTANCIA.

a) Tipo Reactancia.

Se utiliza para protección de líneas cortas. Ya que no es afectado por la resistencia de la falla, dicha resistencia puede ser de un valor muy grande comparada con la impedancia de la línea.

b) Tipo Admitancia (tipo “Mho”).

Se aplica para la protección de líneas de mayor longitud, ya que es ajustable para proteger una sección determinada de la línea, este relevador es menos afectado por otras condiciones anormales del sistema que no sean propiamente una falla en la línea.

c) Tipo Impedancia (tipo “Ohm”).

Se utiliza para la protección de líneas de longitud moderada, este relevador es afectado por la resistencia del arco.

7.4 TIPOS DE FALLAS EN LAS LÍNEAS DE TRANSMISIÓN.

En sistemas aterrizados pueden ocurrir fallas de los siguientes tipos:

- Una fase a tierra ($1\phi - T$)
- Entre fases (2ϕ)
- Dos fases a tierra ($2\phi - T$)
- Trifásicas (3ϕ)
- Trifásicas a tierra ($3\phi - T$)

Al ocurrir cualquiera de estas fallas en una línea de transmisión se producirán voltajes y corrientes de cortocircuito. Por consiguiente habrá relevadores de distancia destinados a proteger la línea contra fallas que no involucren la tierra (fallas 3ϕ y 2ϕ) y que se conocen como relevadores de distancia de fase.

Los relevadores que protegen la línea contra fallas a tierra ($1\phi - T$) se denominan relevadores de distancia de tierra.

Aunque se usa el mismo relevador para proteger contra fallas 2ϕ y 3ϕ , éste no medirá la misma distancia para ambos tipos de falla aunque ocurriesen en el mismo punto. Por ejemplo si tenemos un relevador de distancia de fase alimentado con la corriente de fase "B" y el voltaje entre las fases "B" y "C". La impedancia que medirá el relevador es:

$$Z = \frac{V_{bc}}{I_b} = \frac{V_b - V_c}{I_b}$$

Por lo tanto, usando las componentes simétricas:

$$Z = \frac{(a^2 I_1 Z_1 + a I_2 Z_2 + I_0 Z_0) - (a I_1 Z_1 + a^2 I_2 Z_2 + I_0 Z_0)}{a^2 I_1 + a I_2 + I_0} = \frac{(a^2 - a)(I_1 Z_1 - I_2 Z_2)}{a^2 I_1 + a I_2 + I_0}$$

En una línea de transmisión $Z_1 = Z_2$

$$Z = \frac{Z_1(a^2 - a)(I_1 - I_2)}{a^2 I_1 + a I_2 + I_0}$$

Para el caso de una falla entre las fases "B" y "C".

$$I_2 = -I_1$$

$$I_0 = 0$$

Por lo tanto:

$$Z = \frac{2I_1 Z_1(a^2 - a)}{I_1(a^2 - a)}$$

$$\underline{Z = 2Z_1}$$

Para una falla trifásica:

$$I_2 = I_0 = 0$$

Así que,

$$Z = \frac{I_1 Z_1(a^2 - a)}{a^2 I_1} = Z_1(1 - a^2)$$

$$Z = 3Z_1 \sqrt{3} \angle 30^\circ$$

La impedancia que se le presenta al relevador difiere no sólo en magnitud para las dos condiciones de falla, sino también en fase.

Es necesario por consiguiente proporcionar alguna forma de compensación, de tal forma que la impedancia que se le presente al relevador sea siempre la misma para ambas condiciones de falla.

Consideremos el caso en el que la corriente inyectada al relevador sea la diferencia de las corrientes en las dos fases falladas:

$$I_b - I_c = (a^2 I_1 + a I_2 + I_0) - (a I_1 + a I_2 + I_0) = (a^2 - a)(I_1 - I_2)$$

La impedancia que se le presenta al relevador es entonces:

$$Z = \frac{Z_1 (a^2 - a)(I_1 - I_2)}{(a^2 - a)(I_1 - I_2)}$$

$$\underline{Z = Z_1}$$

Esta ecuación es independiente de las componentes de secuencia de la corriente. El relevador está compensado totalmente, a que para ambos tipos de falla, aún en el caso de que éstas involucren tierra, al relevador siempre se le presentará la misma impedancia Z_1 . Esa compensación para los relevadores de distancia de fase se le conoce como “Corriente Delta”.

Un relevador de distancia de tierra, tendrá aplicado el voltaje de fase a tierra y la corriente correspondiente a la fase fallada. Para una falla de fase a tierra en la fase “A”, la impedancia que se le presenta al relevador es:

$$Z = \frac{V_A}{I_A}$$

$$Z = \frac{I_1 Z_1 + I_2 Z_2 + I_0 Z_0}{I_1 + I_2 + I_0}$$

La relación entre las componentes de secuencia de fase de la corriente para una falla de este tipo es:

$$I_1 = I_2 = I_0$$

Esta relación es válida cuando la línea constituye la única trayectoria hacia la falla. De aquí que la impedancia que se presenta al relevador, para $Z_1 = Z_2$ será:

$$Z = \frac{2Z_1 + Z_0}{3}$$

$$Z = Z_e$$

“ Z_e ” es la impedancia de la trayectoria que se le presenta a la falla.

Cuando la falla se presenta en un sistema que interconecta a varias fuentes o está aterrizado en varios puntos, o al existir ambas condiciones, la relación $I_1 = I_2 = I_0$ ya no se cumple para las corrientes en la línea, aunque siga siendo cierta para las corrientes de

falla, el relevador de distancia de tierra que es alimentada de esta forma, no medirá “ Z_e ”, ya que el valor de la impedancia depende ahora del número de fuentes y del número de neutros aterrizados en el momento de la falla. Para compensar al relevador por la presencia de corrientes en las otras fases no falladas, el voltaje aplicado al relevador es:

$$V_A = I_1 Z_1 + I_2 Z_2 + I_0 Z_0$$

Sumando y restando $I_0 Z_1$ en el segundo miembro, y tomando en cuenta que $Z_1 = Z_2$ tendremos:

$$V_A = (I_1 + I_2 + I_0) Z_1 + I_0 (Z_0 - Z_1) = I_A Z_1 + \frac{I_A + I_B + I_C}{3} (Z_0 - Z_1) = I_A Z_1 + (I_A + I_B + I_C) \left(\frac{Z_0 - Z_1}{3Z_1} \right) Z_1$$

$$Z = Z_1 = \frac{V_A}{I_A + 3I_0 \left(\frac{Z_0 - Z_1}{3Z_1} \right)}$$

Entonces, sí al relevador se le aplica un voltaje V_A , y la corriente de la fase fallada más una fracción $(Z_0 - Z_1)/3Z_1$ de la corriente residual $3I_0$, la impedancia que se le presenta al relevador es igual a $Z = Z_1$. A este tipo de compensación se le conoce como “Compensación Residual”.

De esta manera, es como se le suministra la información a los relevadores de distancia tanto de fase como de tierra, y será a partir de estos parámetros que reciben, la forma en como serán capaces de dar el sitio exacto del punto donde ha ocurrido la falla.

Generalmente los relevadores de distancia actuales son del tipo monofásico, es decir, que se emplean tres relevadores para protección contra fallas entre fases y tres para protección contra fallas a tierra, cada uno recibiendo voltajes y corrientes adecuadas a las fases que protege.

Del arreglo de seis relevadores de distancia sólo uno, ya sea de fase o de tierra recibirá los parámetros de voltaje, corriente y ángulo correspondiente al tipo de falla ocurrida, exceptuando la falla trifásica.

Solamente este relevador medirá con cierta precisión la distancia a la falla, porque ese relevador es el que está relacionado directamente con las fases o la fase fallada.

7.5 ESTRUCTURA DEL RELEVADOR DE DISTANCIA.

Para relevadores de alta velocidad le estructura más apropiada es la “Copa de Inducción” ó “Cilindro de Inducción”.

El elemento móvil es un cilindro metálico hueco que gira sobre su propio eje, y lleva montado el contacto móvil. El elemento que produce el par, consiste de cuatro o más polos, colocados radialmente alrededor de la parte exterior del cilindro y unidos por un núcleo de hierro. Para reducir el entrehierro sin aumentar la inercia, se introduce un núcleo estacionario de hierro dentro del cilindro o copa rotativa.

En el elemento admitancia o “unidad Mho” los polos son energizados con voltaje para producir el flujo de polarización. El capacitor en serie provee la “memoria”. El polo frontal se energiza con corriente y el posterior con voltaje. A esta estructura puede llamársele “elemento direccional con retención de voltaje”.

Dos de los polos tienen devanados energizados con potencial que producen un flujo, el cual induce corrientes de “eddy” en el cilindro de inducción o rotor, el cual reacciona con los flujos de los otros dos polos; de éstos, uno tiene dos devanados alimentados con corrientes provenientes de dos de las fases de forma que generan un flujo proporcional a la suma de su “delta”. El otro polo es energizado por el potencial entre el mismo par de fase.

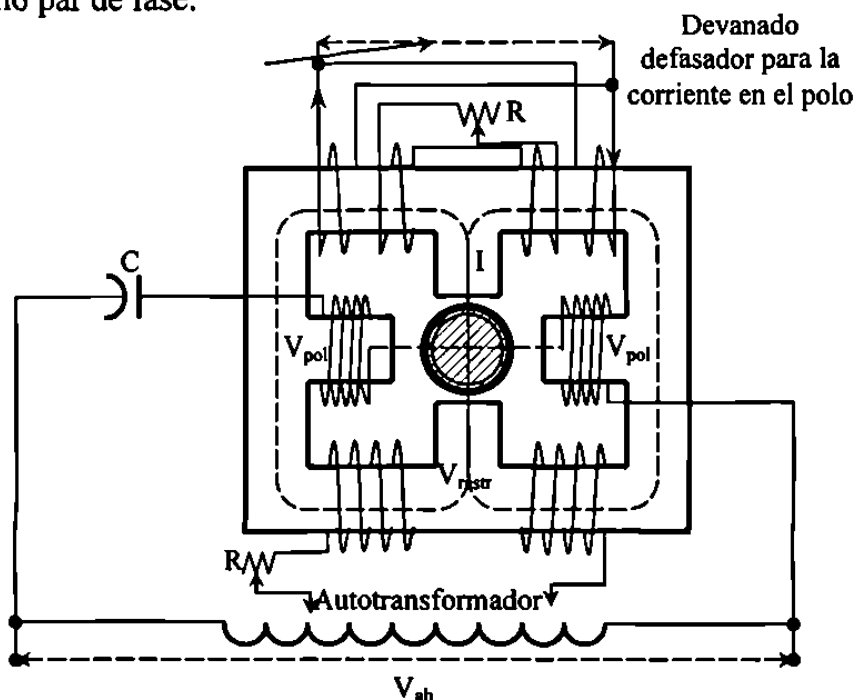
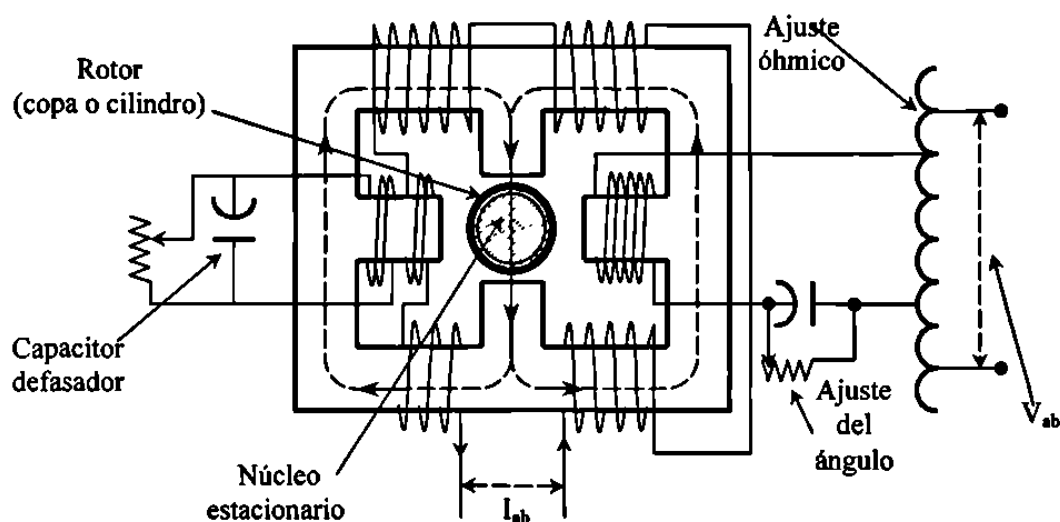


Figura 7.4 Elemento Direccional (Unidad Mho) tipo Reactancia

El elemento reactancia o “unidad Ohm” es un cilindro de inducción de cuatro polos, las bobinas de corriente producen un flujo en los polos frontal, posterior, y en el polo del lado derecho. El flujo en el polo lateral está desfasado con respecto al frontal y posterior, debido a un devanado secundario cuya trayectoria se cierra a través de una impedancia defasadora, y la interacción de los dos flujos produce un par de operación proporcional al cuadrado de la corriente y que tiende a cerrar los contactos.

La bobina de voltaje en el polo lateral izquierdo, produce un flujo el cual interactúa con el flujo de los polos frontal y posterior, para producir un par de retención proporcional a la potencia reactiva inductiva, o sea, $VI\text{Sen}\theta$ en donde “V” es el voltaje del relevador, “I” es la corriente y “ θ ” es el ángulo de la corriente atrás el voltaje. Para que opere el elemento reactancia, el par de operación deberá ser mayor que el par de retención.



Nota: Se muestra con línea punteada las trayectorias del flujo debido al devanado de corriente, el cual es doble, una parte lleva la I_a y la otra lleva I_b

Figura 7.5 Cilindro de Inducción (unidad “Ohm”) tipo Reactancia.

7.6 DEDUCCIÓN DE CANTIDADES QUE RECIBEN LOS (21).

Para analizar el comportamiento de éste relevador, se considera un sistema de potencia en términos de un equivalente con dos fuentes enlazadas por la línea de transmisión. Los voltajes que se generan en las dos fuentes se suponen iguales en

magnitud y en ángulo. Las impedancias equivalentes a la izquierda y a la derecha de la falla son las que a la postre limitarán la corriente de falla a los valores reales conocidos. La falla ocurre en dirección del disparo del relevador.

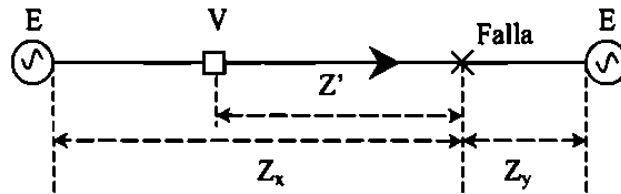


Figura 7.6 Sistema de equivalente con dos fuentes enlazadas por una L.T.

A continuación se da la nomenclatura, para identificar ciertos valores y combinaciones de las cantidades:

Z – Impedancia del sistema, vista a ambos lados de la falla:

$$Z = \frac{Z_x Z_y}{Z_x + Z_y}$$

C – Relación de la corriente en el relevador, I , a la corriente total en la falla:

$$C = \frac{Z_y}{Z_x + Z_y}$$

Z' – Impedancia “vista” por el relevador.

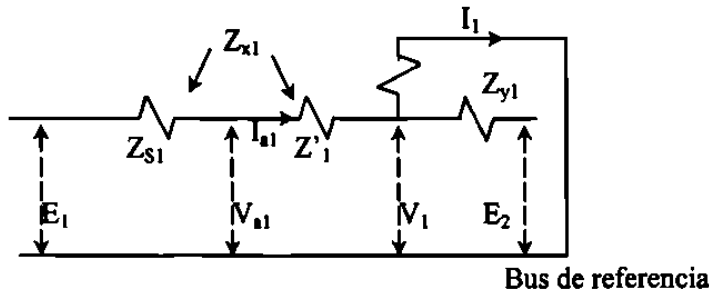
Z_x – Suma de la impedancia del sistema atrás del relevador más la impedancia desde la localización de éste hasta el punto de falla.

Z_y – Impedancia del sistema delante de la falla.

R_f – Resistencia de la falla.

Los subíndices a , b y c denotan las fases A, B y C. Y los subíndices 1, 2 y 0 las secuencias positiva, negativa y cero.

Una vez dada la nomenclatura, se procede a deducir las cantidades que recibe un relevador de distancia, dependiendo del tipo de falla que se presente a lo largo de la línea de transmisión (falla 3ϕ , falla 2ϕ , falla 1ϕ).

FALLA 3 ϕ Figura 7.7 Red de secuencia positiva para una falla 3 ϕ .

$$Z_1 = \frac{Z_{x1}Z_{r1}}{Z_{x1} + Z_{r1}}$$

$$C_1 = \frac{Z_{r1}}{Z_{x1} + Z_{r1}}$$

$$I_1 = \frac{E_1}{Z_1 + R_f}$$

$$I_{a1} = \frac{Z_{r1}I_1}{Z_{x1} + Z_{r1}} = C_1 I_1 = C_1 \frac{E_1}{Z_1 + R_f}$$

$$V_1 = I_1 R_f = \frac{E_1 R_f}{Z_1 + R_f}$$

$$V_{a1} = V_1 + I_{a1} Z'_1 = \frac{E_1 R_f}{Z_1 + R_f} + C_1 \frac{E_1 Z'_1}{Z_1 + R_f} \Rightarrow I_{a1} = \frac{C_1}{K}$$

$$V_{a1} = \frac{R_f}{K} + \frac{C_1 Z'_1}{K}$$

$$K I_{a1} = C_1 \Rightarrow K I_{a2} = 0 \Rightarrow K I_{a0} = 0$$

$$K V_{a1} = C_1 Z'_1 + R_f \Rightarrow K V_{a2} = 0 \Rightarrow K V_{a0} = 0$$

Sustituyendo estos valores de falla 3 ϕ en las ecuaciones generales de secuencia:

$$K I_a = C_1$$

$$K I_b = a^2 C_1$$

$$K I_c = a C_1$$

$$K V_a = C_1 Z'_1 + R_f$$

$$K V_b = a^2 (C_1 Z'_1 + R_f)$$

$$K V_c = a (C_1 Z'_1 + R_f)$$

FALLA 2 ϕ .

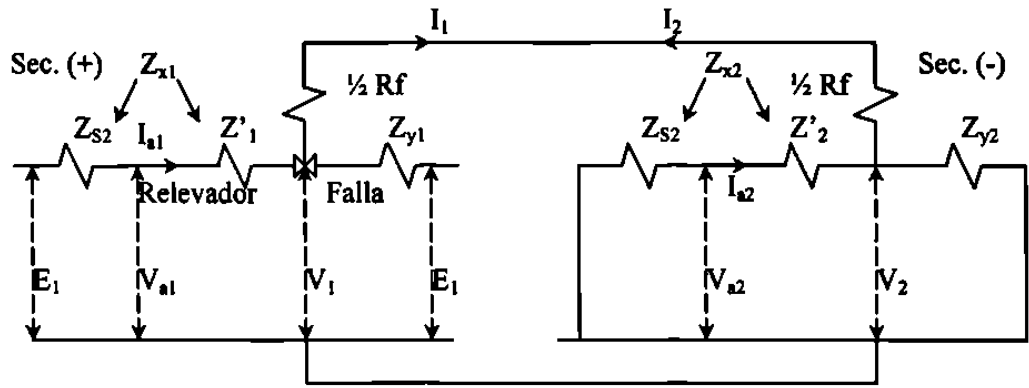


Figura 7.8 Redes de secuencia fase "A" para falla entre fases "B" y "C"

$$I_1 = \frac{E_1}{Z_1 + Z_2 + Rf} \Rightarrow Z_1 = Z_2 \Rightarrow I_1 = \frac{E_1}{2Z_1 + Rf} \Rightarrow \frac{1}{K} = \frac{E_1}{2Z_1 + Rf}$$

$$V_1 = (I_1 - I_2) \left(\frac{Rf}{2} \right) - I_2 Z_2 \Rightarrow I_1 = -I_2 \Rightarrow V_1 = I_1 Rf + I_1 Z_1$$

$$V_{a1} = V_1 + I_{a1} Z'_1 \Rightarrow I_{a1} = C_1 I_1 = \frac{C_1}{K} \Rightarrow V_{a1} = I_1 (C_1 Z'_1 + Z_1 + Rf) = \left(\frac{1}{K} \right) (C_1 Z'_1 + Z_1 + Rf)$$

$$KV_{a1} = C_1 Z'_1 + Z_1 + Rf$$

$$KI_{a1} = C_1$$

$$V_2 = -I_2 Z_2 = I_1 Z_1$$

$$V_{a2} = V_2 + I_{a2} Z'_2 \Rightarrow Z'_1 = Z'_2 \Rightarrow I_{a2} = C_2 I_2 \Rightarrow V_{a2} = I_1 Z_1 + C_2 I_2 Z'_2 \Rightarrow C_2 I_2 = -C_1 I_1$$

$$V_{a2} = I_1 Z_1 - C_1 I_1 Z'_1 = I_1 (Z_1 - C_1 Z'_1) = \left(\frac{1}{K} \right) (Z_1 - C_1 Z'_1)$$

$$KV_{a2} = Z_1 - C_1 Z'_1$$

$$KI_{a2} = -KI_{a1} = -C_1$$

Sustituyendo estos valores de falla 2 ϕ en las ecuaciones generales de secuencia:

$$KI_a = 0$$

$$KI_b = (a^2 - a)C_1$$

$$KI_c = -(a^2 - a)C_1$$

$$KV_a = 2Z_1 + Rf$$

$$KV_b = (a^2 - a)C_1 Z'_1 - Z_1 + a^2 Rf$$

$$KV_c = (a - a^2)C_1 Z'_1 - Z_1 + a Rf$$

FALLA 1φ.

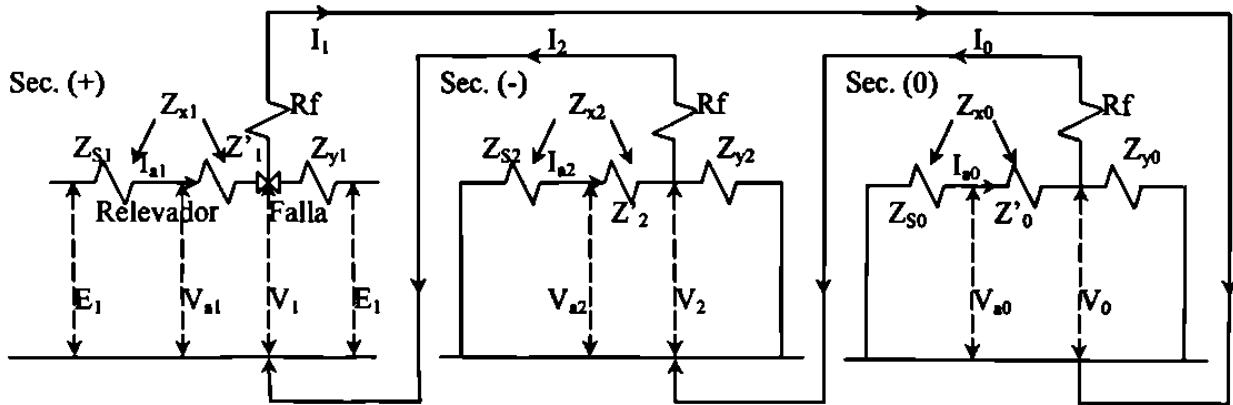


Figura 7.9 Redes de secuencia fase "A" para falla entre fase "A" y tierra.

$$I_1 = \frac{E_1}{Z_1 + Z_2 + Z_0 + 3Rf} \Rightarrow Z_1 = Z_2 \Rightarrow I_1 = \frac{E_1}{2Z_1 + Z_0 + 3Rf} = \frac{1}{K}$$

$$V_1 = I_1 Rf + I_2 (Rf + Z_2) + I_0 (Rf + Z_0) \Rightarrow I_1 = I_2 = I_0 \Rightarrow V_1 = I_1 (Z_1 + Z_0 + 3Rf)$$

$$V_{a1} = V_1 + I_{a1} Z_1 \Rightarrow I_{a1} = I_1 C_1 \Rightarrow I_1 = \frac{1}{K} \Rightarrow KV_{a1} = C_1 Z_1 + Z_1 + Z_0 + 3Rf$$

$$KI_{a1} = C_1$$

$$V_2 = -I_2 Z_2 = -I_1 Z_1$$

$$V_{a2} = V_2 + I_{a2} Z_2 \Rightarrow I_{a2} = C_2 I_2 = C_1 I_1 \Rightarrow Z_1 = Z_2 \Rightarrow I_1 = \frac{1}{K} \Rightarrow KV_{a2} = C_1 Z_1 - Z_1$$

$$KI_{a2} = C_1$$

Las ecuaciones son las siguientes:

$$V_0 = -I_0 Z_0$$

$$V_{a0} = V_0 + I_{a0} Z'_0 \Rightarrow I_{a0} = C_0 I_0 = C_0 I_1 \Rightarrow V_{a0} = I_1 (C_0 Z'_0 - Z_0)$$

$$KV_{a0} = C_0 Z'_0 - Z_0$$

$$KI_{a0} = C_0$$

Sustituyendo estos valores en las ecuaciones generales:

$$KI_a = C_0 + 2C_1$$

$$KV_a = 2C_1 Z'_1 + C_0 Z'_0 + 3Rf$$

$$KI_b = C_0 - C_1$$

$$KV_b = -C_1 Z'_1 + (a^2 - a)Z_1 + (a^2 - 1)Z_0$$

$$KI_c = C_0 - C_1$$

$$KV_c = -C_1 Z'_1 + (a - a^2)Z_1 + (a - 1)Z_0 + C_0 Z'_0 + 3aRf$$

Las impedancias que verán cada uno de los relevadores de fase y de tierra son: Z'_{ab} , Z'_{bc} , Z'_{ca} , medidas por el relevador de fase y Z'_a , Z'_b , Z'_c , medidas por el relevador de tierra.

$$Z'_{ab} = \frac{V_a - V_b}{I_a - I_b}$$

$$Z'_{bc} = \frac{V_b - V_c}{I_b - I_c}$$

$$Z'_{ca} = \frac{V_c - V_a}{I_c - I_a}$$

$$Z'_a = \frac{V_a}{I_a + \left(\frac{Z'_0 - Z'_1}{Z'_1} \right) (I_0)}$$

$$Z'_b = \frac{V_b}{I_b + \left(\frac{Z'_0 - Z'_1}{Z'_1} \right) (I_0)}$$

$$Z'_c = \frac{V_c}{I_c + \left(\frac{Z'_0 - Z'_1}{Z'_1} \right) (I_0)}$$

Las impedancias que se les presentan a los relevadores de distancia de fase para los tres tipos de falla.

FALLA 3 ϕ

$$Z'_{ab} = Z'_1 + \frac{Rf}{C_1}$$

$$Z'_{bc} = Z'_1 + \frac{Rf}{C_1}$$

$$Z'_{ca} = Z'_1 + \frac{Rf}{C_1}$$

FALLA 2 ϕ

$$Z'_{ab} = Z'_1 - j \frac{3Z_{x1} - a}{C_1} \frac{Rf}{C_1}$$

$$Z'_{ab} = Z'_1 + \frac{Rf}{2C_1}$$

$$Z'_{ab} = Z'_1 + j \frac{\sqrt{3}Z_{x1} - a^2}{C_1} \frac{Rf}{C_1}$$

FALLA 1 ϕ

$$Z'_{ab} = Z'_1 + j \frac{Z_{x1}}{3} + \frac{(1 - a^2)(Z_0 + 3Rf)}{3C_1}$$

$$Z'_{bc} = \infty$$

$$Z'_{ab} = Z'_1 - j \frac{Z_{x1}}{3} + \frac{(1 - a^2)(Z_0 + 3Rf)}{3C_1}$$

Las impedancias que se les presentan a los relevadores de distancia de tierra para los tres tipos de falla.

FALLA 3 ϕ .

$$\begin{aligned} Z'_a &= Z'_1 + \frac{Rf}{C_1} \\ Z'_b &= Z'_1 + \frac{Rf}{C_1} \\ Z'_c &= Z'_1 + \frac{Rf}{C_1} \end{aligned}$$

FALLA 2 ϕ .

$$\begin{aligned} Z'_a &= \infty \\ Z'_b &= Z'_1 - \frac{J}{3} \left(Z_{x1} - a^2 \frac{Rf}{C_1} \right) \\ Z'_c &= Z'_1 + \frac{J}{\sqrt{3}} \left(Z_{x1} - a \frac{Rf}{C_1} \right) \end{aligned}$$

FALLA 1 ϕ .

$$\begin{aligned} Z'_a &= Z'_1 + \frac{3Rf}{2C_1 + (C_0) \left(\frac{Z'_0}{Z'_1} \right)} \\ Z'_b &= Z'_1 + \frac{\sqrt{3} (jZ_1 + Z_0 \nabla 30^\circ - \sqrt{3} a^2 Rf)}{C_1 - (C_0) \left(\frac{Z'_0}{Z'_1} \right)} \\ Z'_c &= Z'_1 + \frac{\sqrt{3} (-jZ_1 + Z_0 \nabla -30^\circ - \sqrt{3} a Rf)}{C_1 - (C_0) \left(\frac{Z'_0}{Z'_1} \right)} \end{aligned}$$

Las impedancias que se le presentan a los relevadores de distancia de tierra "No Compensados" para los tres tipos de falla.

FALLA 3 ϕ .

$$\begin{aligned} Z'_a &= Z'_1 + \frac{Rf}{C_1} \\ Z'_b &= Z'_1 + \frac{Rf}{C_1} \\ Z'_c &= Z'_1 + \frac{Rf}{C_1} \end{aligned}$$

FALLA 2 ϕ .

$$\begin{aligned} Z'_a &= \infty \\ Z'_b &= Z'_1 - \frac{J}{3} \left(Z_{x1} - a^2 \frac{Rf}{C_1} \right) \\ Z'_c &= Z'_1 + \frac{J}{3} \left(Z_{x1} - a \frac{Rf}{C_1} \right) \end{aligned}$$

FALLA 1φ.

$$Z'_a = \frac{Z'_1 + [C_0(Z'_0 - Z'_1) + 3Rf]}{2C_1 + C_0}$$

$$Z'_b = \frac{Z'_1 + [C_0(Z'_0 - Z'_1) + j 3(aZ_0 - Z_1)]}{C_0 - C_1} + \frac{3a^2 Rf}{C_0 - C_1}$$

$$Z'_b = \frac{Z'_1 + [C_0(Z'_0 - Z'_1) - j 3(a^2 Z_0 - Z_1)]}{C_0 - C_1} + \frac{3a Rf}{C_0 - C_1}$$

7.7 TIEMPOS DE OPERACIÓN Y ZONAS DE PROTECCIÓN.

El tiempo de operación de un relevador de distancia es mínimo, este relevador es de alta velocidad (0.05 seg. o menos). Este tiempo de operación es independiente del valor de la corriente de falla y los cambios en la capacidad generativa o en la configuración del sistema no afectarán el tiempo.

Estas propiedades del relevador hacen posible la protección de la línea de transmisión mediante "zonas" que se aplican en ambos extremos de la línea. Por lo general, esta protección comprende tres zonas de protección, cada una de ellas con "alcance" y tiempo de operación fijos (figura 8.10).

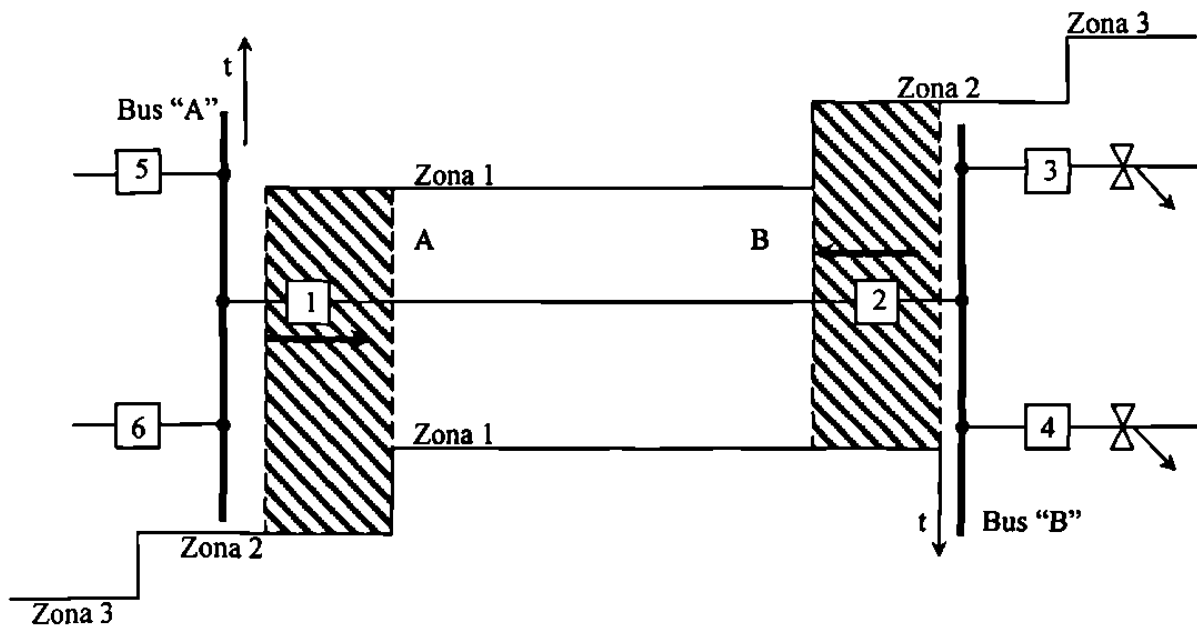


Figura 7.10 Diagrama esquemático zonas de la protección de distancia.

Los relevadores del interruptor 1 se ajustan para cubrir del 80% al 90% de la distancia del interruptor 2. A esta zona 1 no se le introduce ningún retardo de tiempo intencional, o sea, el tiempo de operación de la zona 1 es instantáneo.

El ajuste de alcance de la zona 2 de los relevadores el interruptor 1 debe extenderse más allá del extremo remoto (Bus "B") de la sección de línea protegida. Esto asegura que habrá operación de la zona 2 para todas las fallas en el extremo remoto.

Al tiempo de operación de la zona 2 se le introduce un retardo constante, es decir, el tiempo de esta zona será el mismo sin importar la localización de la falla que esté dentro de su cobertura.

Este retardo de tiempo se hace con el fin de coordinar los relevadores en los interruptores 3 y 4, para fallas en esas líneas, por ejemplo, la falla "F3" debe ser liberada por el interruptor 3 antes de que expire el tiempo de la zona 2 del interruptor 1. Lo mismo se aplica para "F4" y el interruptor 4. El alcance de la zona 3 se ajusta para abarcar mayor distancia que la zona 2 y con un retardo mayor de tiempo. La zona 3 proporciona protección de respaldo para fallas en buses remotos al igual que la zona 2, este retardo es con el fin de coordinar la protección con los interruptores remotos.

Existe otra razón para dar el retardo de tiempo en la zona 2 y es que el relevador de distancia es incapaz de discernir por razones obvias, si la falla ocurrió en el bus "B", poco antes del interruptor 2, o poco después de los interruptores 3 y 4.

Con este arreglo, las fallas que ocurran en la línea en el tramo entre "A" y "B" se librarán en forma instantánea por los relevadores de distancia de ambos extremos. Las fallas que ocurran en las áreas sombreadas se liberarán:

1. Instantáneamente por los relevadores cercanos a la falla.
2. En tiempo de zona 2 de los relevadores remotos.

En resumen, la zona 1 y parte de la zona 2 proporcionan protección "primaria" para una sección determinada de la línea de transmisión, mientras que la otra parte de la zona 2 (después del bus "B") y la zona 3 proporcionan protección de "respaldo" para buses y secciones adyacentes a la línea.

Para representar las zonas de protección del relevador de distancia, se utilizan dos formas de representación: el diagrama R-X y el diagrama Z-t, como se muestra en la figura 7.11.

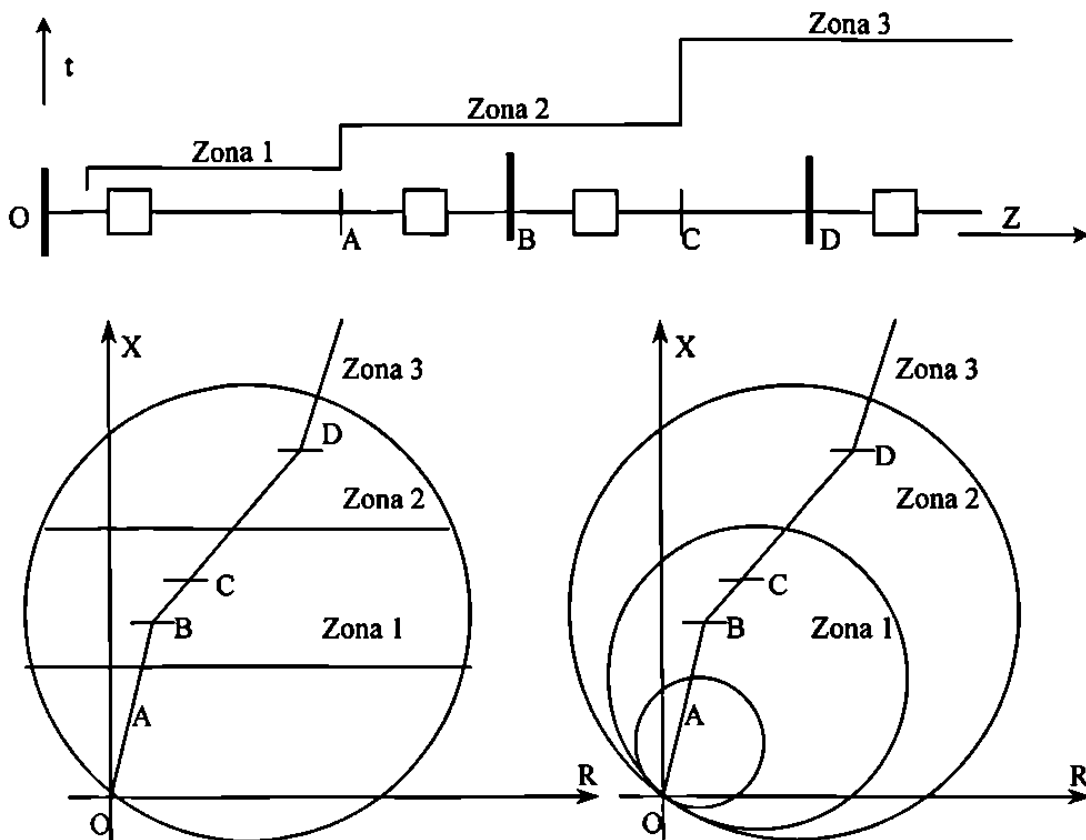


Figura 7.11 Diagramas Z-t y R-X

El diagrama de la izquierda muestra la característica tipo reactancia para las zonas 1 y 2 y la característica “Mho” que les da direccionalidad y hace las funciones de la zona 3. En el diagrama de la derecha las tres zonas tienen la característica “Mho”. El primer diagrama es para líneas cortas y el segundo diagrama es para líneas largas.

7.8 LÍNEAS MULTI-TERMINALES.

Hasta el punto anterior, sólo se ha mencionado la línea de transmisión con fuentes de generación en ambos extremos, o secciones de línea unidas entre sí por los diferentes buses de subestaciones intermedias pero sin generación.

Una línea con multi-terminal es un sistema compuesto por varias líneas de transmisión conectadas a diferentes buses, generadores o subestaciones, y forman parte de la que es conocido como un sistema de transmisión o una red de distribución. En la figura 7.12 se representa un diagrama de una línea multi-terminal, la cual es una porción de un sistema de transmisión.

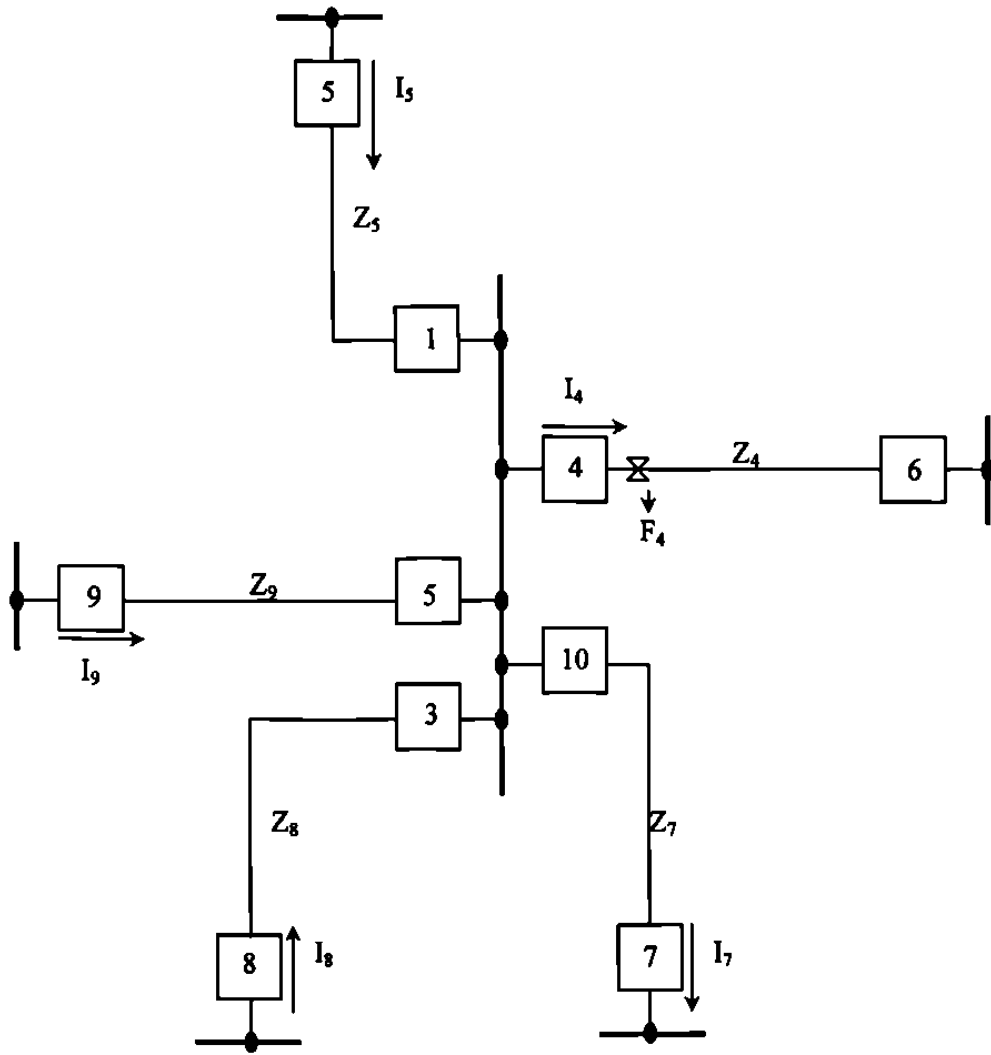


Figura 7.12 Diagrama líneas multi-terminales.

Para analizar las líneas multi-terminales (3 ó más), suponemos que existen fuentes de generación en los buses A, B y C, representado en la figura 7.13.

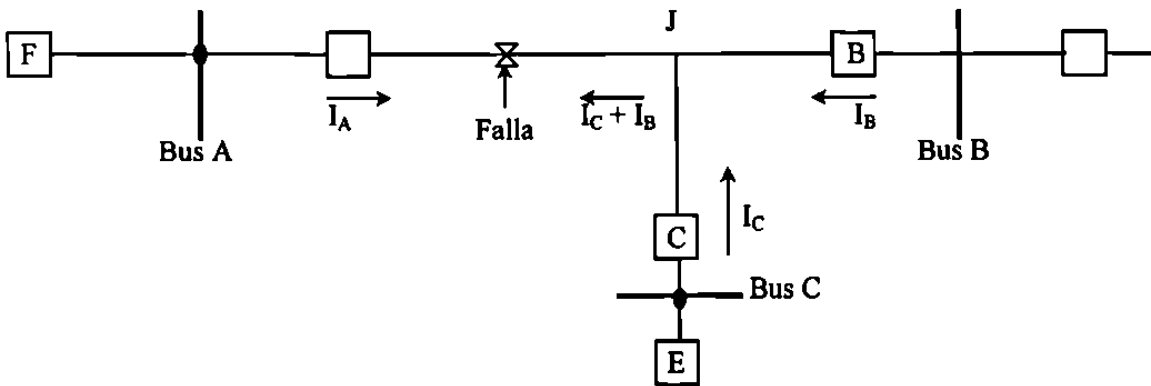


Figura 7.13 Diagrama línea de transmisión tres terminales

La impedancia real del interruptor “C” al punto de falla “F” es:

$$Z_{CJ} + Z_{JF}$$

Para una falla en el punto “F”, la distancia medida por los relevadores en el interruptor “C” tendrán un voltaje:

$$V_C = Z_{JF}(I_B + I_C) + Z_{CJ}I_C$$

La corriente en los relevadores es I_C y la impedancia medida es:

$$Z_C = \frac{V_C}{I_C}$$

$$Z_C = Z_{CJ} + \left(1 + \frac{I_B}{I_C}\right)Z_{JF}$$

De acuerdo con la relación (I_B/I_C) , la impedancia aparente puede variar desde el valor real de la impedancia del tramo de la línea Z_{JF} hasta un valor que puede ser muy grande a los ajustes del relevador “C”. A este fenómeno se le conoce con el nombre “infeed”, y su efecto es provocar un bajo alcance en los relevadores de distancia, es decir, que la impedancia de la línea se “estirara” o el alcance del relevador se “comprimiera”. Este efecto se reconoce sobre todo en el ajuste de las zonas 2 y 3 del relevador, ya que existe la posibilidad de que se “atravesen” fuentes intermedias en su cobertura.

Durante la falla de una fase a tierra cercana a un bus con fuertes cooperaciones de $3I_0$ (fuentes grandes de secuencia cero), los relevadores remotos tendrán que esperar a que abra algún interruptor cercano a la falla, antes de que se concentre suficiente $3I_0$ para que puedan operar los relevadores remotos.

Al presentarse cambios en las condiciones del sistema adyacente a las terminales A o B, las corrientes de falla I_A e I_B , pueden presentar variaciones en su magnitud.

Supongamos que en la terminal “B” existe una planta, la cual se tienen que sacar de servicio una o más unidades durante los períodos de carga baja, o por razones de mantenimiento. Durante esos períodos la corriente I_B puede tener una magnitud de tan sólo el 50% de su valor comparada con el valor que pudiera presentar en los períodos de alta demanda, cuando todas las unidades están en servicio.

Ahora supongamos una línea de alta generación conectada a la terminal "A", cuando sale de servicio para mantenimiento, la magnitud de la corriente I_A sufre decrementos muy considerables.

Tales cambios en el sistema pueden afectar drásticamente el valor de impedancia que se les presentan a los relevadores de distancia en una línea multi-terminal y los ajustes de ellos bajo condiciones normales, deberán examinarse con respecto a otras condiciones que pudieran afectar su comportamiento.

7.9 EFECTOS DE LAS OSCILACIONES DEL SISTEMA.

Las oscilaciones de un sistema de potencia, son variaciones severas en las transmisiones de energía a través de la línea de transmisión. Estas pueden ocurrir después de haberse librado una falla, o al haberse sincronizado erróneamente algún generador del sistema.

La diferencia entre la condición de oscilación y la de falla, es que la impedancia de falla está confinada a puntos a lo largo de la característica de impedancia de la línea de transmisión y su valor aparece instantáneamente; la impedancia de una oscilación no tiene un valor definido y va entrando más o menos lentamente al área de disparo del relevador.

La condición de oscilación está relacionada con la condición de inestabilidad por la que va atravesando el sistema de potencia en ese momento, o sea, son los desplazamientos angulares entre las fuentes generadoras en ambos extremos de la línea de transmisión, los que van aumentando constantemente, con o sin posibilidades de recuperación.

Para analizar las oscilaciones del sistema, en la práctica se emplea su circuito equivalente, que consta de dos fuentes unidas a la línea de transmisión.

Cuando estas dos fuentes o grupos de máquinas están girando fuera de sincronismo u oscilando, habrá un momento en que cada una de las oscilaciones o cada ciclo de deslizamiento, ocasionarán que el defasamiento de los voltajes internos de las fuentes sea de 180° . En este momento, los voltajes en el punto aparente de falla son cero y las corrientes en la línea son máximas (semejante al cortocircuito).

Lo anterior puede ocasionar que el relevador de distancia pueda operar por una falla que no existe.

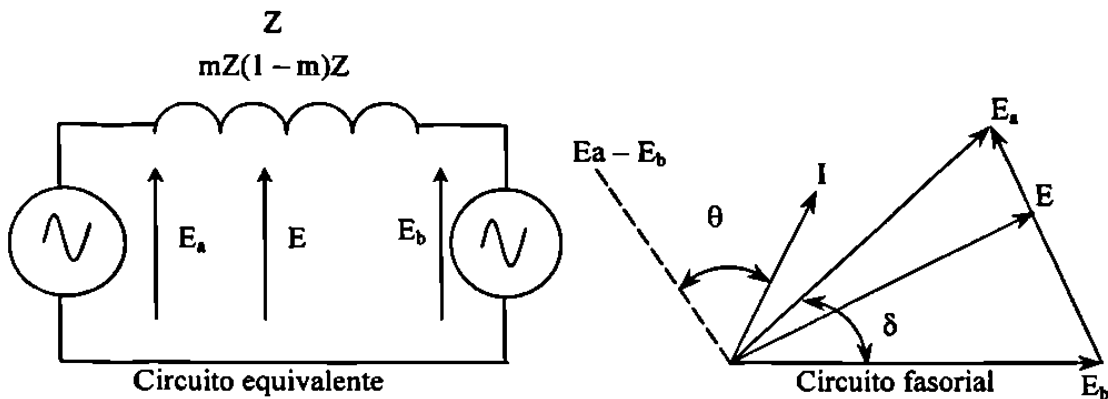


Figura 7.14 Diagramas equivalente y fasorial de un sistema de potencia

E_a y E_b son los voltajes detrás de la reactancia transitoria, los cuales se suponen constantes en magnitud pero variando fasorialmente durante las oscilaciones.

E_a va delante de E_b en un ángulo variable δ . La corriente en cualquier parte del circuito serie es:

$$I = \frac{E_a \angle \delta - E_b}{Z}$$

Z es la impedancia que une a los sistemas o máquinas.

Si todas las impedancias tienen el mismo ángulo, la impedancia total “ Z ” queda dividida por la localización del relevador en el punto “ M ”, en dos partes: mZ y $(1 - m)Z$, donde “ m ” es un número real menor que la unidad.

En el punto “ M ” el voltaje E , respecto a E_b es entonces:

$$E = (1 - m)E_a \angle \delta + mE_b$$

La impedancia que se le presenta al relevador de distancia en “ M ” es:

$$Z_r = \frac{(1 - m)E_a \angle \delta + E_b}{E_a \angle \delta - E_b}$$

Si E_a , E_b y m son constantes y el ángulo δ varía, el locus es la impedancia que “ve” el relevador. Si la gráfica “ Z_r ” que se obtiene en el diagrama R-X, será un círculo cuando $E_a \neq E_b$, o una línea recta cuando $E_a = E_b$.

Para demostrar la trayectoria de oscilación en el plano R-X como una línea recta que pasa por el centro eléctrico del sistema suponemos $E_a = E_b$.

Tomando como referencia la ecuación para calcular “Zr”, está la dividimos entre la impedancia “Z”, y eliminamos los voltajes $E_a = E_b$ porque son iguales, y nos queda lo siguiente:

$$\begin{aligned}
 \frac{Z_r}{Z} &= \frac{(1-m)\angle\delta + m}{\angle\delta - 1} \\
 &= \frac{-m(\angle\delta - 1) + \angle\delta}{\angle\delta - 1} \\
 &= -m + \frac{1 + \angle\delta}{1 - \angle - \delta} \\
 &= -m + \frac{1 + \angle\delta}{(1 - \angle - \delta)(1 + \angle\delta)} \\
 &= -m + \frac{1 + \angle\delta}{1 + \angle\delta - \angle - \delta - 1} \\
 &= -m + \frac{1 + \angle\delta}{\angle\delta - \angle - \delta} \\
 &= -m + \frac{1 + \cos\delta + \text{Sen}\delta}{2j\text{Sen}\delta} \\
 &= (\frac{1}{2} - m) - j \left(\frac{1 + \cos\delta}{2\text{Sen}\delta} \right) \\
 \frac{Z_r}{Z} &= (\frac{1}{2} - m) - j \frac{1}{2} C \text{tg} \left(\frac{\delta}{2} \right)
 \end{aligned}$$

Esta ecuación representa una línea vertical, porque la parte imaginaria varía como una función de δ . Multiplicando ambos miembros de la ecuación por la impedancia “Z” obtendremos el locus de “Zr”, las longitudes quedarán multiplicadas por la magnitud de “Z”, y la línea vertical girará en contra de las manecillas del reloj en un ángulo “ θ ”, que es el ángulo de la impedancia “Z”.

Si los dos sistemas están en fase, la corriente en la línea es cero, y por consiguiente, la impedancia aparente es infinita.

Si los dos sistemas llegasen a estar desfasados 180° , el voltaje se hace cero a la mitad de la línea, y aparecerá como un cortocircuito en el punto $m = 0.5$.

Si E_a difiere en magnitud respecto a E_b el lugar de los puntos es circular y entonces la impedancia aparente no llegará nunca a ser infinita.

La impedancia “Zr” vista por cualquier relevador, el cual este conectado de cualquier manera y localizado en cualquier parte de un sistema de potencia reducido a su

equivalente de dos fuentes, en el cual se presente una falla o no, varía de la siguiente forma:

1. Si los voltajes internos E_a y E_b , son de magnitud constante pero variando su ángulo de fase δ , la impedancia " Z_r " variará sobre un locus, que podrá ser, o una línea recta o un círculo.
2. Cada relación de las magnitudes E_a/E_b , generará un locus diferente, de los cuales, todos menos uno, serán círculos. Cada círculo circunscribe a uno u otro punto llamado polo, que son dos. Los centros de estos círculos están sobre la línea recta que une a estos dos polos. Sólo para la relación $E_a/E_b = 1$ se obtiene una línea recta.
3. Si el defasamiento del ángulo δ es constante y lo que varía es la relación E_a/E_b , entonces el locus de la impedancia " Z_r " es un arco, o una serie de arcos que pasan por los dos polos.
4. Los arcos generados considerando magnitud constante y los generados considerando defasamiento constante, son ortogonales entre sí. La gráfica resultante se denomina "carta de impedancias".

Con esta información, se puede determinar el comportamiento de los relevadores de distancia bajo las condiciones mencionadas en un sistema de potencia.

Con el análisis realizado, se podrá explicar las operaciones incorrectas de estos relevadores y a su vez la aplicación de nuevos relevadores, entre ellos, el relevador tipo Mho para bloquear el disparo del relevador de distancia, y el relevador tipo reactancia modificado para permitir el disparo del relevador de distancia.

Al superponer las características de los relevadores de distancia estándares sobre las cartas de impedancia, estas nos indicaran si los relevadores son susceptibles de operar o no bajo condiciones de oscilación. Esto también mostrará la carga máxima que podrá transmitir sobre una línea de transmisión sin ocasionar un disparo indeseable.

En la representación de nuestro sistema supuesto, el cual consta de una línea de transmisión que interconecta dos fuentes de generación, el centro eléctrico de tal sistema no es un punto fijo, sino que variará en la medida en que varíen las impedancias detrás de las terminales de la línea.

Cuando existe la pérdida de sincronismo en el relevador, la impedancia de la línea es pequeña con relación a la de los sistemas, es probable que las diferentes zonas del relevador operarán para oscilaciones de las cuales no se recuperará el sistema.

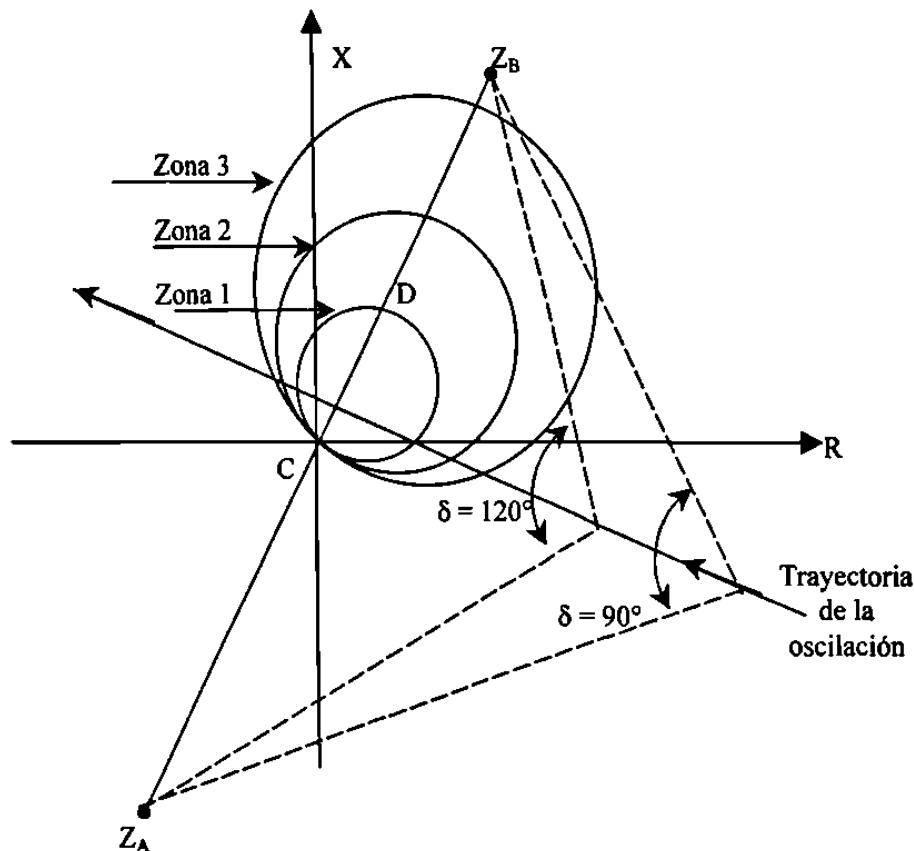


Figura 7.15 Efecto de la pérdida de sincronismo la impedancia de la L.T. pequeña.

Si la línea es corta (menos de 150 mi), los relevadores en ambos extremos de la línea verán el mismo locus de oscilación.

Si la línea es larga, la capacitancia shunt de la línea tendrá su efecto en el locus de la oscilación y los relevadores de ambas terminales no verán lo mismo.

En líneas de 200 a 300 mi de longitud, el relevador en una terminal verá el locus para $n < 1$, mientras que el otro verá el locus para $n > 1$. En ambos casos, los relevadores en cada terminal aún verán la oscilación y operarán para separar los sistemas.

Para determinar si una de las operaciones de respaldo operará durante una oscilación, se empleará el método mostrado en la figura 7.16.

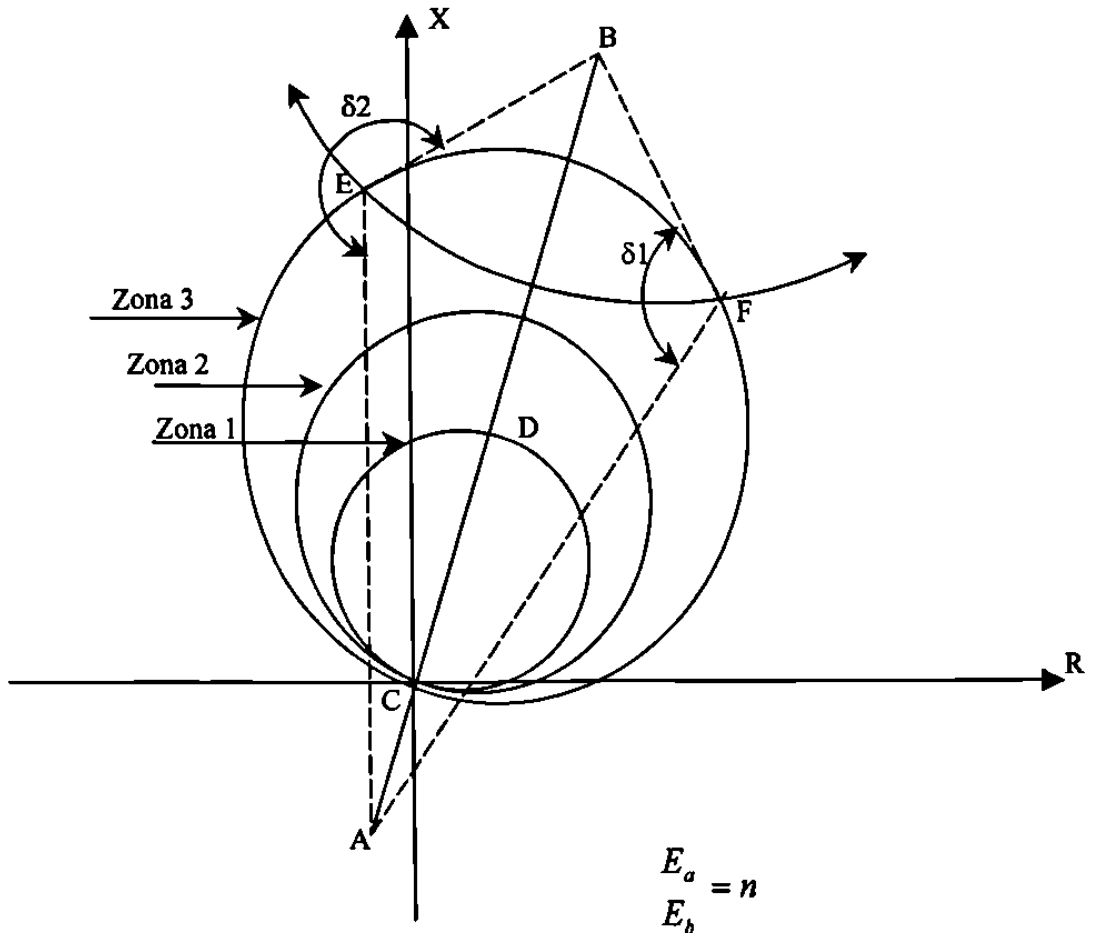


Figura 7.16 Método para determinar la tendencia de operación durante una oscilación.

De este diagrama se puede obtener la expresión para determinar el tiempo que tardará la oscilación en atravesar la característica del relevador.

$$t = \frac{\delta_2 - \delta_1}{S}$$

Esta expresión nos da el tiempo “t” que le toma a la oscilación viajar del punto “E” al punto “F”. De donde “S” es la velocidad del deslizamiento en grados /seg.

Si el tiempo es mayor que el de la zona 3, el relevador operará y mandará el disparo a su interruptor.

En la figura 7.17 se muestra un caso, en el cual la impedancia de la línea es grande en comparación a la del sistema, las zonas del relevador no sólo mandarán el disparo de su interruptor cuando se presenten las condiciones de oscilación o inestabilidad, sino también cuando ocurra una oscilación de la cual no se pudo haber recuperado el sistema.

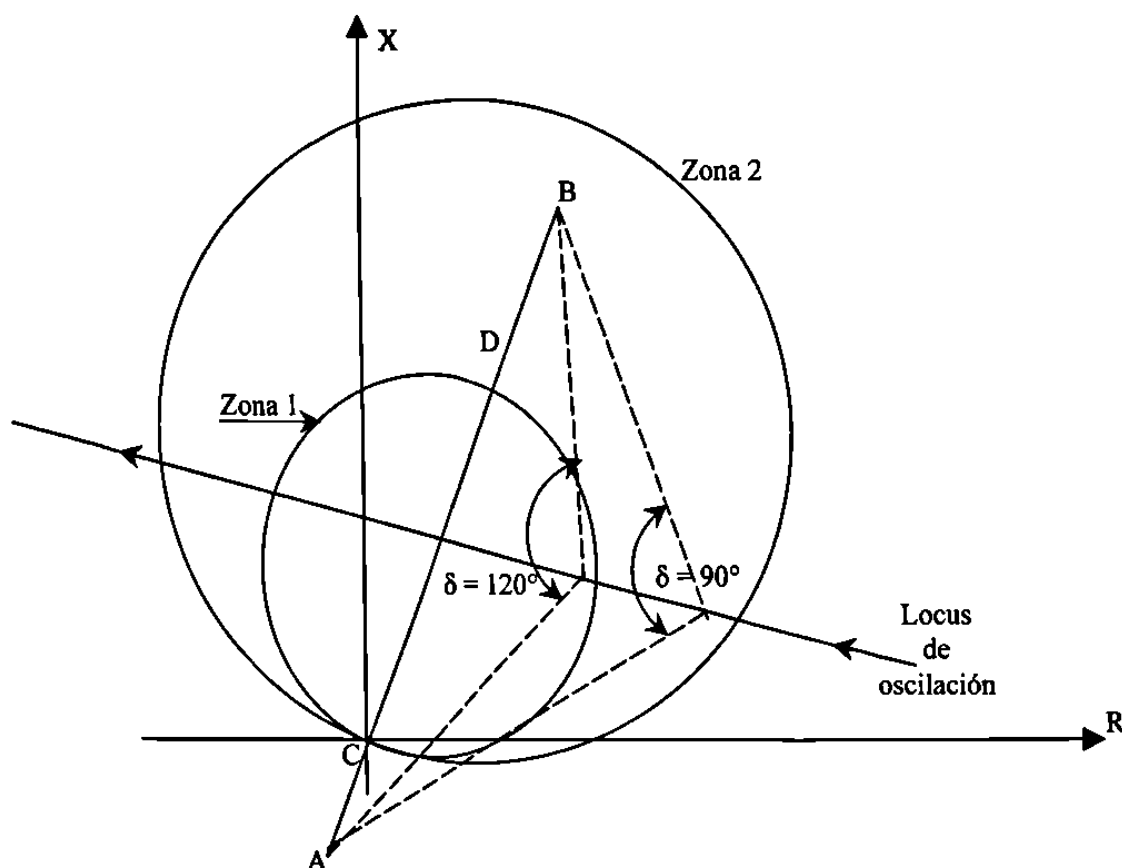


Figura 7.17 Efecto de la oscilación impedancia de L.T. grande.

La zona 2 verá la oscilación, antes de que los sistemas lleguen a estar desfasados 90° , mientras que la zona 1 verá la oscilación antes de que el desfase sea de 120° .

En ambos casos, los relevadores mandarían el disparo durante la oscilación de la cual el sistema pudiera recuperarse. En estas circunstancias, se deberá estipular un método para permitir el bloqueo de tales disparos, o si se deseará permitir el disparo, el área que cubre las características del relevador deberá restringirse.

El método anterior no se aplica al relevador de distancia a tierra, ya que su característica "Mho" la cual da la direccionalidad a las unidades de reactancia, no podrá "ver" las oscilaciones, ya que el fenómeno que se está tratando es balanceado. Pero sin embargo, el disparo de este tipo de relevador se evita al ser supervisado por detectores de sobrecorriente de secuencia cero ($3I_0$), por razones de seguridad.

7.10 BLOQUEO DE DISPARO A CAUSA DE LAS OSCILACIONES.

El tipo de relevador utilizado para lograr esta operación es del tipo admitancia con unidad de "Offset", es decir, que su característica desplazada no pasa por el origen, sino que lo circunda. La unidad opera en combinación con las unidades del tipo "Mho" de los relevadores de protección de la línea, esto para proporcionar un bloqueo del disparo durante alguna oscilación severa, o bloquear el recierre automático después de un disparo ocasionado por una operación fuera de sincronismo.

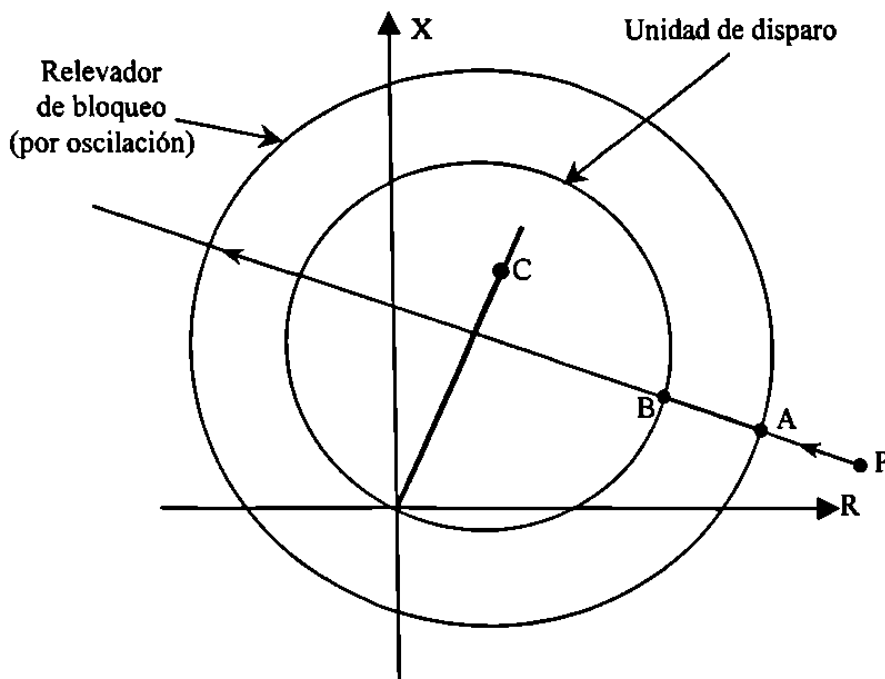


Figura 7.18 Bloqueo por oscilación con una unidad Mho con "Offset".

El alcance óhmico de la unidad de bloqueo se ajusta de tal manera que su característica sea mayor y concéntrica con la característica de los relevadores de disparo. Durante la oscilación, el locus de la impedancia se mueve hacia las características de los relevadores y entra primero en el círculo de bloqueo en el punto "A". Instantes después se pasa al punto "B" y entra al círculo del relevador de disparo. Si el tiempo de transición de A hasta B excede a unos cuantos ciclos, la unidad de bloqueo operará un dispositivo auxiliar que bloqueará a los relevadores de distancia de fase.

Cuando se requiera bloquear el recierre, se permitirá el disparo a los relevadores de fase y el dispositivo auxiliar incapacitará al recierre automático.

La operación de este esquema de bloqueo por oscilación, se basa en el hecho de que existe un cambio progresivo en la impedancia que se les presenta a las unidades del relevador, y no un cambio instantáneo como ocurriría durante una falla. Por ejemplo, al ocurrir una falla en el punto "C", existirá un cambio instantáneo de impedancia del punto "P" al punto "C", las unidades de disparo y de bloqueo operarán al presentarse esta condición.

7.11 DISPARO A CAUSA DE UNA OSCILACIÓN.

Consiste de dos unidades tipo reactancia modificada, cuyas características son las líneas A y B mostradas en la siguiente figura.

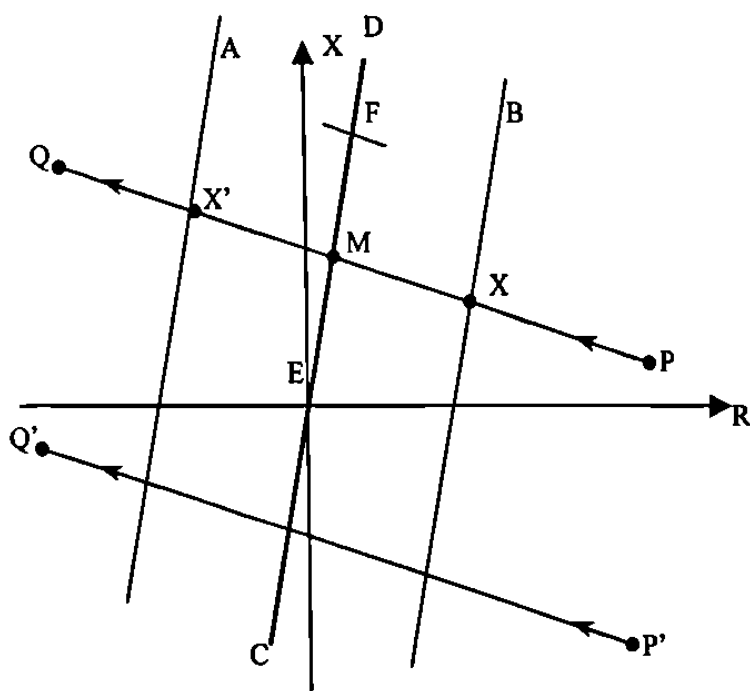


Figura 7.19 Característica de disparo por oscilación.

Las características pueden ajustarse a que sean casi paralelas a la línea que representa la impedancia de la línea de transmisión y los sistemas equivalentes. Al ocurrir la oscilación, el locus de la oscilación entrará eventualmente al área de las características del relevador y emerge a la izquierda del relevador en "A". Esta secuencia de eventos será reconocida por los relevadores en "A" y en "B", y evaluada por los relevadores auxiliares asociados, para cerciorarse de que está ocurriendo una oscilación. Estos relevadores dispararán entonces al interruptor local, o iniciarán una

señal de disparo transferido, si se desea que un interruptor remoto sea el que se dispare. El disparo sobrevendrá después de que el locus de la oscilación pase por el punto "X".

Este esquema reconocerá la condición de oscilación para el locus que vayan de "P" hasta "Q" o de "Q" hasta "P". El esquema detectará una oscilación que ocurra detrás de la terminal "E", donde se encuentra el relevador. Una unidad instantánea de sobrecorriente supervisa la operación del esquema.

La desventaja de esto, es que a menudo es difícil implementar un esquema de relevadores para detectar las condiciones de oscilación. La dificultad estriba primordialmente, en la obtención de una información confiable del sistema para poder ajustar los relevadores en:

1. Localizaciones de los locus de la oscilación durante diferentes condiciones del sistema.
2. El deslizamiento máximo entre los sistemas o las áreas.

La segunda parte de la información sólo puede obtenerse del resultado de estudios de estabilidad transitoria, para poder determinar el máximo deslizamiento.

7.12 AJUSTE Y COORDINACIÓN (TIEMPOS DE OPERACIÓN).

Los factores que deben de tomarse en cuenta para determinar los ajustes del relevador, ya sean, como protección primaria o de respaldo incluye lo siguiente:

1. Corriente de falla, voltaje y ángulo fasorial.
2. Impedancia de la línea u otro equipo protegido.
3. Oscilaciones transitorias y constantes de inercia.
4. Configuraciones normales y anormales del sistema de potencia.
5. Capacidad del equipo de potencia.
6. Tipo y función de los relevadores.

A continuación se describe la manera de ajustar los diferentes tipos de relevadores de distancia (de fase línea con dos terminales, de fase líneas con tres terminales y de tierra), así como la coordinación de los tiempos de operación de cada uno de ellos.

7.12.1 DE FASE LÍNEA CON DOS TERMINALES.

7.12.1.1 AJUSTE.

Alcance de las zonas.

- a) El elemento de la zona 1, dispara instantáneamente. Dependiendo del tipo de relevador y del ángulo de la línea, los relevadores de distancia tienen limitado el sobrealcance transitorio deben ajustarse para cubrir aproximadamente del 80% al 90% de la longitud eléctrica de la línea a la terminal remota adyacente.
- b) El elemento de la zona 2, cuando se usa para permitir el disparo por carrier y/o disparar como respaldo, debe ajustarse para un alcance mínimo del 120% de la línea protegida. Debe intentarse en donde sea posible obtener un alcance del 100% de la línea protegida más el 50% del tramo adyacente de línea, considerando “infeed” mínimo para cualquier contingencia razonable del sistema.
- c) El elemento de la zona 3, cuando se usa como función permisiva para carrier y/o para respaldo remoto debe ajustarse como sigue:
 1. Como permisivo para el carrier, el alcance cubrirá 100% de la línea protegida, más el 50%. El tramo adyacente de línea, considerando “infeed” mínimo para cualquier contingencia razonable del sistema.
 2. Cuando esta zona se usa para respaldo remoto, su alcance deberá cubrir aproximadamente el 10% del tramo coadyacente, tomando en cuenta “infeed” mínimo en ese bus adyacente.
 3. Bajo ninguna circunstancia deberá este ajuste limitar a la carga que pueda, e un momento dado, llevar la línea, y considerarse debidamente la sensibilidad a la falla remota.

Cuando la zona 3 se invierte para arrancar al carrier o disparar como respaldo invertido de zona 3, su ajuste debe ser así:

1. Cuando es para “arrancar” al carrier, el alcance debe ser mayor que el que tiene la unidad como permisiva para el carrier en el extremo opuesto de la línea, en una proporción de por lo menos 1.25 veces.

2. Cuando se usa como respaldo remoto invertido de la zona 3, el alcance deberá ser aproximadamente el 20% del tramo coadyacente más corto considerando “infeed” mínimo en esa terminal.
3. El alcance no deberá limitar la máxima carga que pueda llevar la línea, considerando la sensibilidad para una falla remota.

7.12.1.2 COORDINACIÓN.

El tiempo de operación de la zona 2, deberá ser de 0.25 a 0.30 segundos (15 a 18 ciclos), para limitar los daños ocasionados por la falla y minimizar la inestabilidad del sistema. Este ajuste supone un margen de 10 ciclos en el que debieron haber librado fallas en líneas que caen dentro del alcance de la zona 2.

El tiempo de operación de la zona 3, deberá ser de 0.5 a 0.6 segundos (30 a 36 ciclos), o un margen de 10 ciclos arriba del tiempo en que se libre una falla que esté dentro de su alcance.

Si las zonas 2 ó 3 llegasen a traslaparse en líneas adyacentes bajo condiciones normales de operación, entonces se requerirán mayores tiempos para la coordinación.

7.12.2 DE FASE LÍNEAS CON TRES TERMINALES.

7.12.2.1 AJUSTE.

Alcance de las zonas.

- a) El elemento de la zona 1, dispara instantáneamente. Dependiendo del tipo del relevador y del ángulo de la línea, los relevadores de distancia que tengan sobrealcance transitorio limitado, deben ajustarse para cubrir aproximadamente del 80 al 90% de la longitud eléctrica de la línea, sin “infeed”, a la terminal inmediata.
- b) El elemento de la zona 2 cuando se usa para “aceptar” al carrier y/o disparar como respaldo debe ajustarse:
 1. Para “aceptar” al carrier, tendrá un alcance mínimo de 1.1 veces la impedancia aparente máxima de la terminal más lejana de las dos secciones adyacentes.

2. Para respaldo remoto, tendrá un alcance de aproximadamente el 50% del tramo adyacente más corto, considerando “infeed” mínimo hacia ese tramo más corto de línea, pero que esto no represente menos de 1.2 veces la impedancia a la terminal más lejana.
- c) El elemento de la zona 3, cuando se use para “aceptar” al carrier y/o dispara como respaldo, deberá ajustarse:
1. Como permisivo del carrier, debe tener un alcance de por lo menos 1.25 a 1.5 veces la impedancia aparente máxima de la terminal más lejana de las dos secciones adyacentes.
 2. Para respaldo remoto, el alcance será de aproximadamente el 10% del tramo coadyacente más corto, considerando “infeed” mínimo en el tramo adyacente.
 3. Bajo ningún caso deberá limitarse la capacidad de manejo de carga de la línea, dando consideración a la sensibilidad a la falla.

Si el elemento de la zona 3 se invierte y se usa para arrancar al carrier o para dispara como respaldo invertido de la zona 3, su ajuste será el siguiente:

1. Exceder el mayor de los alcances de la unidad para “detener” el carrier en las otras dos terminales opuestas, por un mínimo de 1.25 veces.
2. Alcanzar hasta un 20% aproximadamente del más corto de los tramos coadyacentes de la línea, considerando mínimo “infeed” hacia ese tramo coadyacente.
3. No limitar la máxima carga que se puede transmitir por la línea, dando consideración a la sensibilidad para la falla.

7.12.2.2 COORDINACIÓN.

El tiempo de operación de la zona 2, deberá ser de 0.25 a 0.30 segundos (15 a 18 ciclos), para limitar los daños ocasionados por la falla y minimizar la inestabilidad del sistema. Este ajuste supone un margen de 10 ciclos en el que debieron haber librado fallas en líneas que caen dentro del alcance de la zona 2.

El tiempo de operación de la zona 3, deberá ser de 0.5 a 0.6 segundos (30 a 36 ciclos), o un margen de 10 ciclos arriba del tiempo en que se libre una falla que esté dentro de su alcance.

Es mucho más factible que ocurran traslapes de las zonas 2 y 3, requiriéndose mayores tiempos con fines de coordinación.

7.12.3 DE TIERRA.

7.12.3.1 AJUSTE.

Los ajustes para estos relevadores se efectúan generalmente en:

1. Las zonas 1, 2 y 3.
2. Ajustes para los temporizadores de las zonas 2 y 3.
3. Ajuste para el detector de sobrecorriente de secuencia cero
4. Ajuste para el transformador compensador auxiliar por corriente de secuencia cero.

Para los sistemas aterrizados sólidamente y para líneas aéreas, en los cuales las impedancias de secuencia cero y positiva tienen aproximadamente el mismo ángulo, se deben de ajustar de la siguiente forma:

Alcance de las zonas.

a) Zona 1.

La unidad compensada tipo reactancia de la zona 1 para disparo instantáneo, de ajustarse para un alcance de aproximadamente del 70 al 80% de la longitud de la línea a la terminal opuesta, dependiendo de la exactitud del cálculo de la impedancia de secuencia cero de la línea, de los efectos mutuos de secuencia cero debido a las líneas paralelas, y de qué tan bien se podrán compensar estos efectos.

Para líneas con tres terminales, el alcance deberá ser de un 70 a un 80% de la terminal remota más cercana sin "infeed".

- #### b) Zona 2.
- La unidad compensada tipo reactancia de la zona 2 debe alcanzar por lo menos un 110% de la sección de las líneas protegidas, y si es posible, no más allá del 40 ó 50% del tramo más corto adyacentes de línea, considerando los efectos tales como:

1. Mínimo “infeed” en el bus remoto para una contingencia razonable del sistema.
2. Una compensación inapropiada para efectos mutuos debido a un interruptor abierto en el circuito paralelo.
3. Efectos mutuos no compensados debido a circuitos paralelos parcialmente.

En líneas con tres terminales la zona 2 deberá tener un alcance:

1. Por lo menos 1.1 veces la impedancia máxima aparente (máximo “infeed”) del tramo adyacente más lejano.
2. Aproximadamente un 40 o un 50% del tramo de línea adyacente más corto.

c) El elemento de la zona 3, el cual opera como una unidad direccional de arranque tipo “Mho” no compensada, se utiliza para dar direccionalidad de las zonas 1 y 2. También para que actúe como respaldo de la zona 3, y como no es una unidad que mida con exactitud la distancia para fallas de una fase a tierra, deberá:

1. Tener un alcance lo suficientemente grande para detectar fallas en cualquier parte de la línea protegida con un factor de seguridad de 1.25.
2. Limitar su alcance con un margen del 10% por lo menos de manera que las unidades de la zona 3 de las fases no falladas no operen para una falla de fase a tierra, provocando un bloqueo del disparo del relevador indicado.

Las unidades tipo reactancia para la zona 3 deberán:

1. Ajustarse de 1.25 a 1.5 veces de la impedancia a la terminal remota. Para líneas con tres terminales deberá ajustarse para un alcance de por lo menos 1.25 a 1.5 veces de la impedancia aparente máxima (máximo “infeed”) del tramo de línea más lejano de los dos adyacentes.
2. Tener un alcance de aproximadamente el 10% de la sección de línea coadyacente más corta considerando un mínimo “infeed” para respaldo remoto.

Algunos tipos de relevadores de distancia de tierra del tipo reactancia utilizan un principio de operación, según el cual, se requiere de una corriente mínima de falla a tierra de 1.4 veces la corriente máxima de carga.

7.12.3.2 COORDINACIÓN.

Zona 2.

El tiempo de operación de esta zona debe ser de 0.25 a 0.3 segundos (15 a 18 ciclos) para reducir el daño por la falla y reducir las posibilidades de inestabilidad.

Este ajuste supone un margen de 10 ciclos arriba del tiempo de disparo de 5 a 8 ciclos de interruptores que son cubiertos por esta zona.

Zona 3.

El tiempo de operación de esta zona deberá ser de un 0.5 a 0.6 segundos (30 a 36 ciclos) o un margen de 10 ciclos arriba del tiempo de apertura de otros interruptores dentro de su alcance.

Si existiera un traslape de zonas estas otras de secciones con adyacentes bajo condiciones normales, se aumentarán estos tiempos para fines de coordinación.

8

RELEVADORES TIPO PILOTO

8.1 INTRODUCCIÓN.

Un requisito fundamental que deberán de cumplir las protecciones de las líneas de transmisión de enlace de un sistema eléctrico de potencia, es lograr el disparo simultáneo con alta velocidad de los interruptores de todos los terminales de la línea para todos los cortocircuitos internos. Las protecciones direccionales de sobrecorriente y de distancia solamente cumplen este requisito para los cortocircuitos en la porción central de la línea, pero para fallas cercanas a sus terminales la protección cercana opera con alta velocidad, mientras que las restantes terminales (en el caso general de una línea multi-terminal) operan con retardo de tiempo (a menos que las condiciones del sistema sean tales, que ocurra el disparo secuencial, es decir, la aceleración de la operación de las protecciones remotas después del disparo de la protección cercana a la falla).

La protección tipo piloto garantiza el disparo simultáneo con alta velocidad de todos los interruptores de la línea y se obtienen las siguientes ventajas:

1. Mejora la estabilidad transitoria del sistema eléctrico de potencia.
2. Al aplicar el recierre automático de alta velocidad:
 - 2.1 Mejora la estabilidad transitoria.
 - 2.2 Reduce los tiempos de interrupción.
 - 2.3 Mejora las condiciones de voltaje en parte de la carga.

3. Reduce la posibilidad de daño de conductores y equipos, debido a la corriente de falla.

8.2 PRINCIPIOS DE OPERACIÓN Y CLASIFICACIONES.

La protección tipo piloto tiene selectividad absoluta y basa su funcionamiento en la comparación directa o indirecta de las señales provenientes de todas las terminales de las líneas de transmisión. En la figura 8.1 se muestra la necesidad de esa comparación para lograr la protección alta velocidad para cortocircuitos en cualquier punto de la línea.

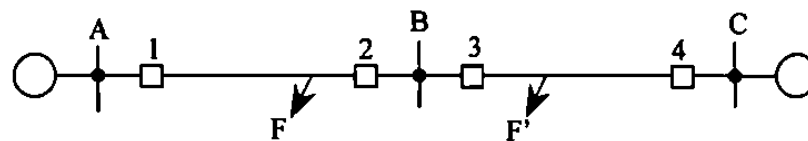


Figura 8.1 Fundamentación necesidad de protección piloto para una L.T.

Si la protección 1 de la línea ubicada en el extremo “A” de la línea de transmisión, recibe información correspondiente a ese terminal solamente (protección direccional de sobrecorriente o de distancia), resulta prácticamente imposible que sea capaz de discriminar correctamente entre los cortocircuitos F’ y F”, que ocurren en puntos muy cercanos entre si y por tanto dan lugar a valores muy semejantes de la corriente o la impedancia medida por la protección 1. Sin embargo, al llegar la información al extremo “B” de los dos cortocircuitos, se presentan condiciones muy diferentes, debido a que existe una variación de aproximadamente 180° en el ángulo de la corriente de uno a otro caso.

En la protección tipo piloto la protección 1 recibe información desde la subestación “B”, que define la ubicación precisa del cortocircuito, con lo que se puede decidir si se origina o no el disparo instantáneo del interruptor de esa terminal de la línea. De igual manera, la protección 2 recibe información desde la subestación “A”.

De lo anterior, se deduce la necesidad de disponer de un canal de comunicación que enlace las terminales de la línea; este canal se denomina canal piloto. Existen en la actualidad cuatro tipos de canales de comunicación factibles de utilizar con esta finalidad:

- a) Par de conductores complementarios tendidos a lo largo de la línea protegida (hilo piloto).
- b) Canal de onda portadora de alta frecuencia que utiliza los propios conductores de la línea protegida.
- c) Canal de enlace por radio en la banda de microondas.
- d) Cable de fibra óptica.

De acuerdo con el canal de comunicación utilizado, las protecciones tipo piloto se subdividen en:

- a) Protección por hilo piloto (incluye la variante de fibra óptica).
- b) Protección piloto por onda portadora.
- c) Protección piloto por microondas.

Una segunda posible clasificación de las protecciones tipo piloto es tomando en cuenta el principio de detección del cortocircuito. Pueden establecerse las siguientes comparaciones entre las señales provenientes de las terminales de la línea protegida:

- a) Comparación directa de los valores instantáneos de las corrientes (protecciones diferenciales de corriente) o de sus fases (protecciones diferenciales de fase de corriente o por comparación de fase).
- b) Comparación indirecta de las direcciones relativas de las corrientes o de las potencias, a partir de la operación de relevadores direccionales o de distancia (protecciones por comparación direccional).

En la práctica se utiliza de preferencia el principio diferencial de comparación directa de los valores instantáneos de las corrientes. Por el contrario, en las protecciones piloto por onda portadora y por microondas han encontrado mayor aplicación los principios de comparación directa de fase (o protección diferencial de fase) y de comparación indirecta direccional.

Otra variante de clasificación es la basada en la utilización que se hace del canal de comunicación. Con este aspecto pueden identificarse los siguientes tipos de protecciones piloto:

- a) Protecciones piloto de bloqueo.

El canal se utiliza solamente para evitar el disparo de los interruptores en caso de cortocircuitos externos. Para cortocircuitos internos no se requiere

señal en el canal para que tenga lugar la operación de la protección. Una variante consiste en transmitir una señal de bloqueo solamente cuando los relevadores detectan un cortocircuito externo, y esta señal bloquea el disparo de todas las terminales. Una segunda variante que se denomina “de pérdida de bloqueo”, cuando ocurre un cortocircuito interno, esas señales desaparecen y se permite el disparo de todas las terminales.

b) Protecciones piloto de disparo (disparo transferido).

El canal se utiliza para transmitir señales de disparo de uno a otra u otras terminales de la línea en caso de cortocircuitos internos; no existen señales de disparo en el canal para cortocircuitos externos. De acuerdo con la forma de provocar el disparo, la protección piloto de disparo transferido tiene dos variantes: de sobrealcance y de subalcance.

8.3 CANALES PILOTO.

8.3.1 HILO PILOTO.

Este canal consiste en un par de conductores, generalmente de tipo telefónico, por los que la información puede transmitirse mediante señales de corriente directa (actualmente en desuso), de corriente alterna de frecuencia del sistema (50 ó 60 Hz) la cual es la variante más difundida, o de corriente alterna con una frecuencia del orden de 1000 a 3000 Hz (tonos de audio). Estos conductores deben de ser subterráneos para garantizar un adecuado nivel de confiabilidad del canal; no se recomienda utilizar conductores aéreos para esta finalidad, aunque esta variante se aplica en la práctica.

Existen valores límites admisibles de la resistencia serie y la capacidad paralelo del hilo piloto; aunque se dispone de medios para compensar parcialmente los efectos de estos parámetros sobre el funcionamiento del canal, ellos constituyen restricciones a la longitud del canal y al calibre mínimo de conductor a utilizar. No es recomendable la aplicación de la protección por hilo piloto en líneas superiores a unos 25 Km.

Un problema que se confronta en este tipo de canal de comunicación es el de los sobrevoltaje, que están determinados por dos causas fundamentales. Una de ellas es la

inducción electromagnética entre los conductores piloto y la línea de transmisión. En este caso la situación más crítica es la de los cortocircuitos a tierra, en que la corriente de secuencia cero puede inducir valores altos de voltaje. Si los conductores se disponen trenzados, en ambos se inducen voltajes prácticamente iguales, por lo que entre ellos no aparecen grandes diferencias de potencial que puedan provocar la operación incorrecta de la protección. Sin embargo, los valores de ese potencial con respecto a tierra pueden ser altos, y deben tratar de reducirse. La variante más común a este fin, consiste en colocar una pantalla en el par trenzado de conductores con una cubierta metálica, que se pone a tierra en ambos extremos y en distintos puntos de longitud. Esta conexión debe estar aislada de la malla de tierra de la subestación. Cuando ocurre un cortocircuito a tierra, la corriente que circula por el apantallamiento tiene un sentido tal, que reduce el campo magnético asociado con la corriente de cortocircuito. Un buen apantallamiento puede reducir el sobrevoltaje por inducción electromagnética a menos de la mitad de su valor.

La segunda causa de los sobrevoltajes, es la elevación que experimenta el potencial de la malla de tierra de la subestación cuando ocurre un cortocircuito a tierra en la línea debido a la circulación de parte de la corriente de retorno por tierra a través del paso resistivo que existe entre la tierra remota y la malla de tierra. En las subestaciones con altos niveles de cortocircuito a tierra, la elevación de este potencial puede ser considerable, y ello precisamente hace recomendable que el apantallamiento del hilo piloto se aisle de la malla de tierra (si se conecta también a la malla de tierra, las corrientes circulantes resultantes del sobrevoltaje pueden incluso dañarlo). El sobrevoltaje aparece, por tanto, entre los conductores de hilo piloto y su apantallamiento, que está conectado a la tierra remota. Es conveniente que el aislamiento de los conductores sea capaz de soportar este sobrevoltaje, y en caso contrario habrá que disponer de una protección especial contra el mismo.

Al instalar dispositivos especiales de protección contra los dos tipos de sobrevoltaje mencionados anteriormente, se garantiza la seguridad del personal y de los equipos conectados al canal. El funcionamiento de estos dispositivos no deberá afectar el funcionamiento normal de la protección por hilo piloto. Adicionalmente existirá la necesidad de brindar protección contra sobrevoltajes por descargas atmosféricas o por

contactos con circuitos de potencia, en cuyo caso no se considera indispensable garantizar el buen funcionamiento de la protección piloto.

El asegurarse de los altos niveles de confiabilidad en la protección implica la necesidad de supervisar sin interrupciones el estado del canal. Por esto, se utilizan equipos de supervisión que comprueban el estado del hilo piloto inyectando en éste una corriente directa, que permiten detectar cortocircuitos, circuito abiertos o contactos a tierra.

Los diferentes elementos que componen la protección y supervisión del hilo piloto en una de las terminales de la línea de transmisión, se muestran en la figura 8.2.

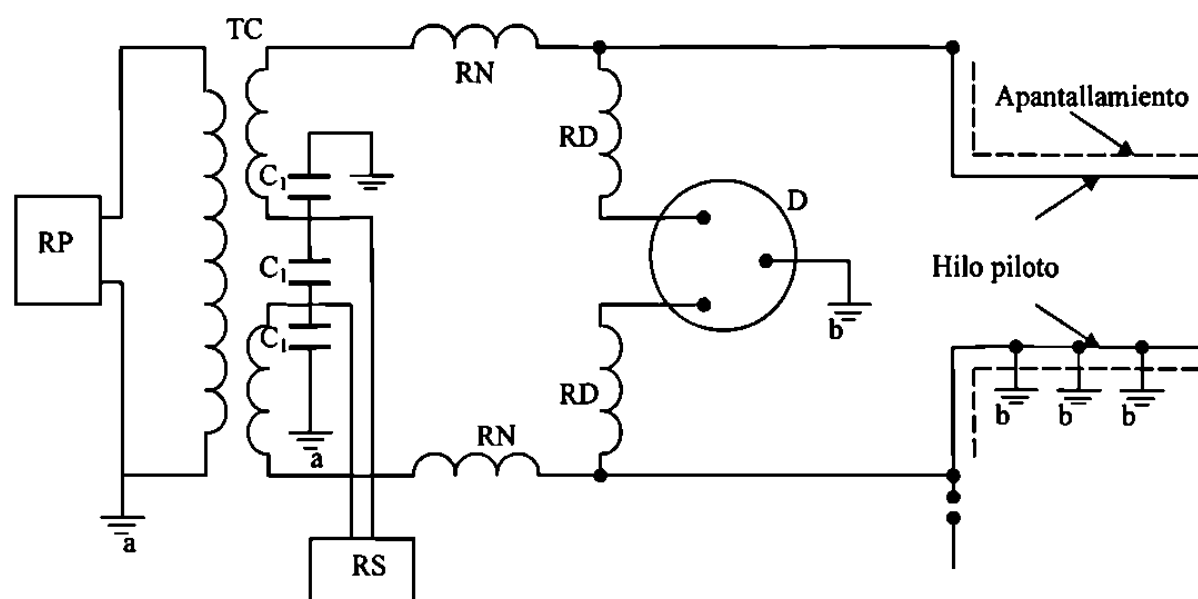


Figura 8.2 Protección y supervisión del hilo piloto y de los equipos terminales.

El relevador piloto "RP" se conecta al canal a través del transformador de aislamiento "T_a", con una relación de transformación del orden de 1 a 6 con un aislamiento con respecto a tierra capaz de soportar alrededor de 15 Kv en el lado de alta. La protección contra sobrevoltajes por inducción electromagnética se obtiene con el descargador "D" (tubo de descarga), que permite la descarga a tierra de cualquiera de los dos conductores en el que haya ocurrido un sobrevoltaje. Los reactores de drenaje "RD" tienen dos funciones:

1. Hace que los dos conductores sean puestos a tierra por el descargador, aunque solo uno de ellos tenga sobrevoltaje, para evitar la aparición de

un sobrevoltaje transitorio entre conductores que pudiera provocar la operación incorrecta de la protección.

2. Evita que durante la descarga a tierra, exista algún posible cortocircuito entre los conductores que impida la transmisión normal de la señal por el canal.

La protección contra sobrevoltaje por elevación del potencial de la malla de tierra de la subestación se brinda con el reactor de neutralización de dos devanados, cuya corriente de magnetización circula entre la malla de tierra y la tierra remota a través de los capacitores " C_1 " y la capacitancia distribuida a tierra del hilo piloto. A través de estos reactores aparece la diferencia de potencial existente entre la malla de tierra y la tierra remota, por lo que los conductores piloto tienen prácticamente el potencial de la tierra remota, mientras que el lado que corresponde al transformador de aislamiento se encuentra al potencial de la malla de tierra. El reactor "RN" presenta una impedancia baja al paso de la señal normal de protección. Esta protección también puede brindarse con un transformador de neutralización que desempeña la misma función que el reactor "RN", pero se conecta en forma diferente. La protección contra sobrevoltaje por elevación del potencial de la malla de tierra no es necesaria si los aislamientos a tierra del transformador de aislamiento y el hilo piloto son capaces de soportar esa elevación de potencial.

En la figura 8.2 se designa con la letra "a" las tierras correspondientes a la malla de tierra de la subestación, y con la "b" las correspondientes a la tierra remota. En el caso del descargador "D", que se encuentra en la subestación y requiere ser conectado a una tierra remota, es necesario hacer la conexión mediante un conductor aislado que se pone a tierra fuera de los límites de la subestación.

La protección contra sobrevoltajes por descargas eléctricas atmosféricas o por contacto con circuitos de potencia es brindada por el pararrayos "P", que por lo general es de 3 Kv. Es evidente que durante la operación del pararrayos el canal óptico se encuentra inhabilitado para transmitir señales de protección.

El relevador de supervisión "RS" se conecta al canal a través del capacitor C_2 , colocado entre los dos devanados del transformador de aislamiento.

8.3.2 CANAL DE ONDA PORTADORA.

Este canal por lo general se basa principalmente en la utilización de los propios conductores de la línea protegida para transmitir señales en la banda de frecuencias comprendida entre 30 y 300 kHz. En la práctica la variante más difundida es aquella en que se utiliza una sola fase de la línea, y la señal se aplica entre esa fase y tierra; otras variantes involucran dos o las tres fases, y requieren más equipos. La señal de onda portadora transmitida puede ser de frecuencia única, de dos frecuencias (sistema de corrimiento de frecuencia) o de modulación por simple banda lateral. La señal de frecuencia única es siempre de bloqueo; el sistema de corrimiento de frecuencia es modulado por tonos de audio portadores de la información.

En la figura 8.3 se muestra el esquema general del canal de onda portadora de una fase de una línea de transmisión. El canal está formado por:

1. Los conductores de la línea protegida (las tres fases participan en la propagación de la señal, aún cuando la señal se aplique a una sola fase).
2. Trampas de onda.
3. Capacitores de acoplamiento.
4. Reactores de drenaje.
5. Sintonizadores.
6. Transmisores receptores.

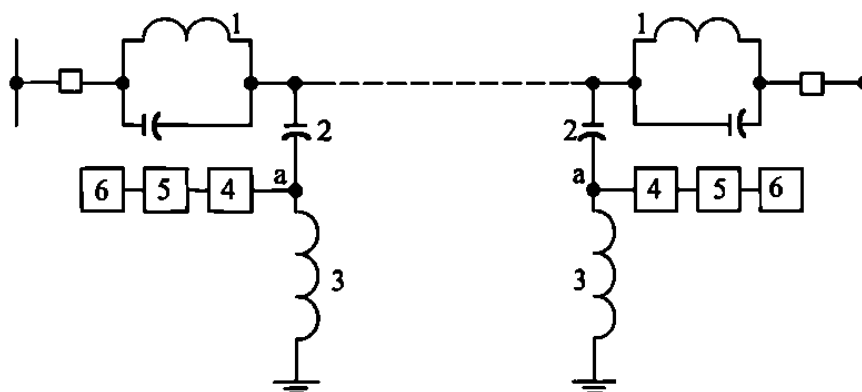


Figura 8.3 Esquema general canal de onda portadora una fase de una L.T.

Las trampas de onda son circuitos resonantes paralelos que constituyen pasos de alta impedancia a la señal de radiofrecuencia, y de baja impedancia a la señal de

frecuencia de potencia. Su función es evitar las pérdidas de señal de onda portadora hacia las barras de las subestaciones adyacentes, lo que reduce la señal en la dirección deseada y origina interferencias en los canales de onda portadora cercanos. Las trampas también evitan que las fallas externas a la línea protegida constituyan cortocircuitos para las señales de onda portadora de la línea. Las trampas de onda se diseñan para permitir continuamente la circulación de la corriente normal de la línea con pérdidas reducidas, y para soportar la máxima corriente de cortocircuito de la línea. Existen distintos tipos de trampas de onda, que pueden sintonizarse a una o dos frecuencias, o a toda una banda de frecuencias.

La señal de radiofrecuencia generada por cada transmisor-receptor se aplica a la línea de transmisión a través de los capacitores de acoplamiento, compuestos por un conjunto de capacitores en serie, montados dentro de un aislador de porcelana. Los sintonizadores que por lo general están situados en la base de los capacitores de acoplamiento, garantizan la adaptación de impedancia entre el cable coaxial de la salida de los transformadores-receptores y la línea de transmisión; cada sintonizador conforma con el capacitor de acoplamiento un filtro pasa-banda, que puede estar sintonizado a una, dos o toda una banda de frecuencias de la señal de onda portadora. Por otra parte, los capacitores de acoplamiento presentan una impedancia muy alta a la señal de frecuencia de potencia (50 a 60 Hz) de la línea de transmisión.

Los reactores de drenaje que por lo general también están montados en las propias unidades de capacitores de acoplamiento, constituyen un paso de baja impedancia al flujo de la corriente de frecuencia de potencia a través de los capacitores a tierra, con lo que se evita que aparezcan altos valores de voltaje de esa frecuencia entre los puntos "a" y tierra (figura 8.3). Por otra parte, a las frecuencias de onda portadora los reactores tienen una alta impedancia, lo que reduce el nivel de pérdidas de esa señal a tierra en ese punto. Por lo general en paralelo con los reactores de drenaje se colocan descargadores para protección contra sobrevoltajes. En algunas instalaciones, sobre todo para líneas de 500 Kv o voltajes superiores, las unidades de capacitores de acoplamiento se utilizan también como transformadores de potencial capacitivos.

La interacción de los relevadores de protección con los transmisores-receptores del canal de una onda portadora es bidireccional: las señales de salida de los relevadores de protección controlan el arranque y parada de la transmisión de señal de radiofrecuencia. Las líneas aéreas de transmisión tienen impedancias características del orden de 200 a 500 ohms de fase a tierra; el canal de onda portadora hace la adaptación a esta impedancia para obtener la condición de máxima transferencia de potencia a la radiofrecuencia. Las derivaciones y otras discontinuidades de la línea de transmisión puedan dar lugar a grandes pérdidas de señal. La aplicación de los sistemas de onda portadora a los cables de potencia es prácticamente imposible, debido a que tienen valores bajos de impedancia característica y pérdidas mucho mayores que las de las líneas aéreas.

En los canales de onda portadora es de gran importancia mantener la atenuación de la señal en niveles aceptables; la atenuación tiene lugar en todos los elementos del canal, y especialmente en la línea de transmisión, y depende de un gran número de factores. La atenuación de la señal constituye uno de los limitantes fundamentales a la máxima longitud de línea utilizable como canal de onda portadora.

Estos canales se ven afectados por ruidos o interferencias de distintos tipos, que también afectan la longitud admisible de la línea, al imponer un límite a la atenuación del canal. Como fuentes de ruidos están la propia línea (efecto corona, arco del cortocircuito o de desconexiones en aire, operación de interruptores, etc.), y factores externos, tales como canales cercanos de radiofrecuencia, descargas eléctricas atmosféricas o estaciones de radio. El efecto de los ruidos generados por la propia línea se atenúa con una adecuada selección del nivel de sensibilidad del receptor de señal; el efecto de los ruidos de origen externo puede reducirse considerablemente con una adecuada selección de las frecuencias de trabajo del sistema de onda portadora.

Un inconveniente de los canales de onda portadora es su posible afectación por la presencia de un cortocircuito en la línea. El caso más crítico en este sentido es el del cortocircuito trifásico a tierra, aunque también puede afectarse bastante la propagación de la señal durante cortocircuitos a tierra cercanos a la trampa de onda en la fase de la línea donde está el canal.

8.3.3 CANAL DE MICROONDAS.

Este canal consiste en un enlace por radio en la banda de microonda, usualmente en el intervalo de frecuencias de 2 a 12 GHz, con antenas entre las que debe existir un enlace “visual” directo. Cuando no se dispone de estaciones repetidoras intermedias, la máxima longitud del canal es alrededor de 60 Km.

La información puede transmitirse por el canal de dos formas:

1. Por un tono de audio o una señal de una frecuencia que oscila entre la de audio y varios cientos de KHz modula directamente la frecuencia de microonda (modulación de base banda).
2. Cuando se requieren más canales se aplica directamente a un canal de voz de tonos de audio en el intervalo de frecuencias de 400 a 3000 Hz; este canal de voz es una señal de frecuencia comprendida entre la de audio y varios cientos de KHz que modula la frecuencia de microonda.

Ventajas:

1. Como la señal de microonda es independiente de la línea protegida, esta origina que las señales no sean afectadas por los cortocircuitos.
2. Admite muchos canales de banda ancha; esto hace que una vez establecido el enlace de microonda la adición de nuevos canales no implique un costo elevado.

Los sistemas de protección piloto que utilizan los canales de onda portadora y de microonda se basan por lo general en los mismos principios de detección del cortocircuito, que son esencialmente los de comparación de fase y comparación direccional, por lo que para su estudio no se establece diferencia entre ellos por el tipo de canal, sino por el principio de operación.

8.3.4 CANAL DE FIBRA OPTICA.

Este canal consiste en un cable de fibra óptica d pequeño diámetro (del orden de 100 micrómetros), no conductor de electricidad, por el que la información se transmite

con técnicas de modulación de luz. Este canal es de gran capacidad y está libre de los problemas relacionados con voltajes inducidos y aislamiento eléctrico.

El canal de fibra óptica presenta altos niveles de atenuación de las señales, lo que, como en el caso del hilo piloto, limita su aplicación a líneas de transmisión de longitud relativamente pequeña. Por lo general, no se utilizan técnicas de modulación de amplitud, debido precisamente a la atenuación y a la falta de consistencia de las características transferenciales de los transductores electro-ópticos utilizados en la interfaz entre la protección y el canal de comunicación. Son de mayor aplicación las técnicas de modulación de fase (modulación por periodos de pulsos) o las digitales.

Para proteger el canal de fibra óptica contra daños mecánicos consiste en colocarlo en el interior del conductor que se utiliza como hilo de guarda de la línea de transmisión.

8.4 PRINCIPIO DE OPERACIÓN PROTECCIÓN DIFERENCIAL.

Es una protección con selectividad absoluta en la cual se hace una comparación directa de las señales eléctricas provenientes de todas las interconexiones del elemento protegido por el resto del sistema (protecciones diferenciales longitudinales) o una comparación directa de las señales eléctricas provenientes de dos o más circuitos que llegan a un mismo nodo (protecciones diferenciales transversales).

Sobre la base de esa comparación, la protección diferencial discrimina entre los cortocircuitos en la zona protegida y los cortocircuitos externos; es una protección instantánea, de tipo primario y debe ser completada con protecciones de respaldo.

En las protecciones diferenciales longitudinales se comparan por lo general los valores instantáneos de las corrientes, sus módulos y fases, o solamente sus fases; la comparación de los módulos de las corrientes solamente o de los voltajes no permite discriminar si el cortocircuito está dentro o fuera de la zona protegida. Estas protecciones son aplicables a todos los elementos del sistema eléctrico de potencia; cuando se utilizan en generadores, motores, transformadores y barras, el canal de comunicación es alámbrico; en las líneas de transmisión pueden utilizarse los cuatro tipos de canales de comunicación.

En las protecciones diferenciales transversales pueden compararse los valores instantáneos, las fases o los módulos de las corrientes, y también las potencias. Su aplicación está limitada a casos como el de dos o más líneas que salen de una barra, o el de dos o más pasos en paralelo del devanado de estator de un generador. En ellas se utiliza un canal de comunicación alámbrico.

Las protecciones diferenciales longitudinales son las que más amplio campo de aplicación, y que por simplicidad se denominarán protecciones diferenciales.

En la figura 8.4 se muestra el esquema de la variante más sencilla de protección diferencial con canal alámbrico de enlace, para una fase de un elemento del sistema que tiene dos terminales.

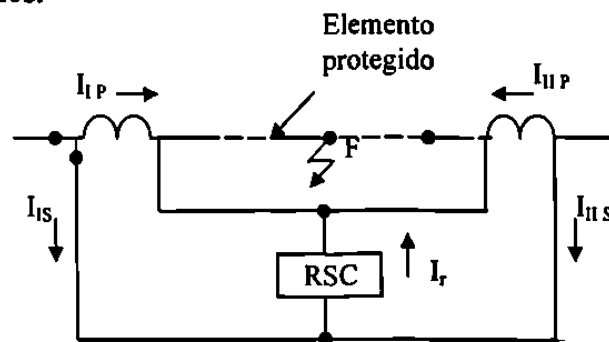


Figura 8.4 Protección diferencial de una fase elemento de dos terminales.

En las terminales del elemento protegido se instalan transformadores de corriente con iguales relaciones de transformación, sus secundarios se interconectan en la forma mostrada en la figura anterior, y entre los conductores de unión se conecta un relevador de sobrecorriente.

La conexión del relevador se hace de tal forma, que cuando no hay cortocircuito interno en la corriente " I_r " es cero en el caso ideal, mientras que, para cortocircuitos en la zona protegida, " I_r " tiene un valor igual al de la corriente de cortocircuito referida al secundario.

Tomando como positivos los sentidos señalados en la figura 8.4 para las corrientes se tiene:

$$I_r = I_{1s} + I_{2s}$$

Para condiciones normales de operación, oscilaciones de potencia o cortocircuitos externos, si se desprecia la admitancia transversal en el elemento protegido son:

$$I_{lp} + I_{llp}$$

Si los transformadores de corriente no tienen errores, es también:

$$I_{ls} = -I_{lls} \quad I_r = 0$$

La protección no opera, pues no existe diferencia entre la corriente que entra y la que sale del elemento protegido, de ahí el nombre de protección diferencial.

En el caso de un cortocircuito en la zona protegida (punto "F"), las corrientes I_{lp} e I_{llp} son en general diferentes, y su suma es igual a la corriente de cortocircuito:

$$I_{cc} = I_{lp} + I_{llp}$$

Por tanto, so no hay errores en los transformadores de corrientes:

$$I_r = \frac{I_{cc}}{n_{lc}}$$

Si esta corriente es mayor que la de arranque del relevador de sobrecorriente, esté opera e inicia la acción de disparo de los dos interruptores del elemento protegido.

Si existe alimentación por un solo extremo, para una falla en la zona protegida es, por ejemplo, $I_{llp} = 0$. En ese caso puede considerarse que la corriente I_{ls} circula en su totalidad por el relevador de sobrecorriente, sin desviarse por el secundario del transformador de corriente que no tiene corriente primaria, ya que éste presenta una impedancia muy alta, prácticamente igual a la de magnetización referida al secundario. En esta condición es también:

$$I_r \approx I_{ls} = \frac{I_{cc}}{n_{lc}}$$

En la conexión analizada en cualquier condición está circulando corriente entre los transformadores de corriente y solo un cortocircuito interno da lugar a corriente por el relevador. Por esto se le denomina esquema de corrientes circulantes, y es el más utilizado en la práctica. El principio de la protección diferencial también puede cumplirse con otra conexión denominada de voltajes en oposición, en que por el canal circula corriente solamente si ocurre un cortocircuito en la zona protegida, que rompa el equilibrio existente entre voltajes generados a partir de las corrientes de ambas terminales; esta variante presenta desventajas que han limitado su aplicación práctica.

El principio de la protección diferencial es también aplicable a los elementos del sistema que tienen más de dos terminales, como puede apreciarse en la figura 8.5. En este caso cuando no existe cortocircuito interno es:

$$I_r = \sum_{l=1}^n I_{ls} = 0$$

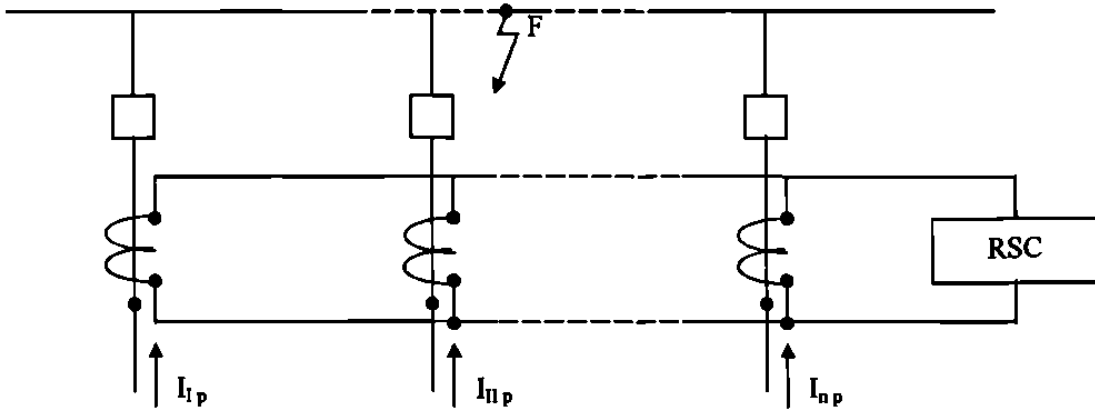


Figura 8.5 Protección diferencial elemento de dos terminales.

Cuando ocurre un cortocircuito en la zona protegida (punto "F") se cumple:

$$I_r = \sum_{l=1}^n I_{ls} = \frac{I_{cc}}{n_{tc}}$$

En el análisis supuesto los transformadores de corriente se comportan idealmente; en el caso real existen errores de transformación, que pueden ser diferentes para los distintos transformadores de corriente, lo que da lugar a una corriente diferencial de desbalance o de error " I_d " que circula por el relevador de sobrecorriente, aún sin falla interna. La corriente " I_d " puede tomar valores altos para cortocircuitos externos, en que se presenta la saturación de los transformadores de corriente. Esta corriente, para la cual no debe operar la protección diferencial, fija un límite mínimo a su corriente de arranque, y afecta, por tanto, su sensibilidad.

Las diferentes investigaciones realizadas sobre el comportamiento de la corriente " I_d " en los estados transitorio y estable han demostrado lo siguiente:

1. Se puede presentar una componente aperiódica con una constante de tiempo del orden de menos de un segundo, y durante ese tiempo puede tener valores varias veces superiores a los de estado estable

(normalmente no son superiores al 10% de la corriente nominal de los TC'S).

2. Se ha observado que al ocurrir el cortocircuito externo no se presenta de inmediato la saturación de los transformadores de corriente, por lo que la corriente de desbalance tiene un valor reducido durante un pequeño tiempo inicial, después del cual aumenta considerablemente.
3. Un incremento de la impedancia de la rama diferencial de la protección reduce el valor de " I_d ", sobre todo el régimen de saturación severa de los transformadores.

La corriente de arranque del relevador de sobrecorriente del esquema diferencial se selecciona de modo que no opere incorrectamente por el efecto del máximo valor posible de corriente de desbalance, es decir:

$$I_{ar} \geq kI_{d_{max}}$$

Al coeficiente " k " puede asignarse un valor del orden de 1.5. Para la determinación de $I_{d_{max}}$ se utiliza la mayor corriente que puede circular por la protección diferencial sin falla interna, sea ésta debida a un cortocircuito externo, o a una oscilación de potencia. Es necesario también considerar la posibilidad de que accidentalmente se abra el circuito secundario de alguno de los transformadores de corriente, en cuyo caso la corriente correspondiente a ese transformador pasa por el relevador de sobrecorriente, por lo tanto, es recomendable comparar el valor calculado por la ecuación anterior con la corriente de carga correspondiente al transformador de corriente más cargado en régimen normal y, en caso de ser menor, aumentar el valor de I_{ar} para que el relevador tolere esa condición.

Para la comprobación de la sensibilidad de la protección se plantea un cortocircuito interno mínimo, para el que por lo general se considera la condición de alimentación de la red por un solo extremo:

$$k_s = \frac{I_{cc_{int\ min}}}{I_{op}} = \frac{I_{cc_{int\ min}}}{n_{tc} I_{ar}}$$

Se toma por lo general un valor mínimo de 2 para " k_s ". En la mayoría de los casos este esquema elemental de protección diferencial no garantiza la sensibilidad necesaria.

Existe una gran cantidad de variantes para elevar la sensibilidad de la protección diferencial sin afectar su propiedad de no operar incorrectamente cuando no existe falla interna.

La utilización de los transformadores de corriente con núcleo de aire (acopladores lineales) o con entrehierro (transreactores) se debe a que estos transformadores casi no se saturan, por lo que el problema de la corriente de desbalance se resuelve. El hecho de que su salida es de voltaje, modifica el esquema diferencial, que se conforma con la conexión en serie de los secundarios de los transformadores a un relevador de sobrecorriente de alta sensibilidad. Esta variante, aunque se ha utilizado, no es muy popular ya que requiere un tipo especial de transformador de corriente, que es de uso exclusivo para la protección diferencial.

Para reducir la posibilidad de operación incorrecta durante el tiempo en que se presenta la componente aperiódica de la corriente de desbalance se establece un cierto retardo de tiempo en la protección diferencial, pero este retardo afecta la velocidad de operación de la protección para fallas internas. Por esta razón no es recomendable la utilización de esta variante, salvo en redes de voltajes relativamente bajos.

La elevación de la impedancia de la rama diferencial se aplica por lo general en la práctica utilizando un relevador de sobrevoltaje en lugar de un relevador de sobrecorriente en la rama diferencial. Lo anterior se basa en el hecho de que al saturarse uno de los transformadores de corriente por una falla externa, su impedancia de magnetización al quedar en paralelo con la rama diferencial limita a un valor pequeño el voltaje que aparece en el relevador de sobrevoltaje.

8.4.1 RELEVADORES DE PORCENTAJE DIFERENCIAL.

La corriente de desbalance del esquema diferencial aumenta cuando crece la corriente que circula a través del esquema hacia un cortocircuito externo o por una oscilación de potencia. El relevador de porcentaje diferencial es aquel cuya corriente de arranque crece automáticamente con el incremento de la corriente que circula a través del esquema. De esta forma es posible garantizar que no opere incorrectamente para grandes corrientes fluyendo hacia el exterior, sin perder la sensibilidad de operar para

fallas internas. En la figura 8.6 se muestra el diagrama esquemático de la variante más común del relevador de porcentaje diferencial.

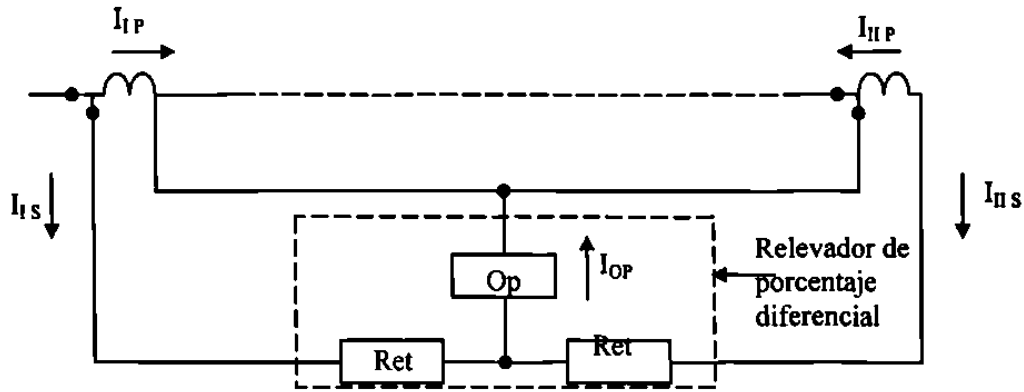


Figura 8.6 Diagrama esquemático de un relevador de porcentaje diferencial.

Se trata en esencia de un órgano de medición que realiza la comparación de amplitud de la corriente de operación “ I_{op} ” (corriente diferencial del esquema) con una corriente de retención “ I_{ret} ” formada a partir de las corrientes I_{Is} e $I_{II s}$, y que en general dependen de la corriente que circula hacia el exterior del esquema diferencial (falla externa u oscilación de potencia).

La formación de las señales de operación y de retención apropiadas para la comparación de amplitud se hace en los elementos correspondientes, mostrados en la figura 8.6 la corriente de operación está dada por:

$$I_{op} = I_{Is} + I_{II s}$$

En la figura 8.7 se muestran los diagramas fasoriales de las corrientes del esquema diferencial para cortocircuitos internos y externos.



Figura 8.7 Diagramas fasoriales de cortocircuitos externos (a) e internos (b)

La corriente de operación para la falla externa es igual a la de desbalance y para la falla interna es igual a la de cortocircuito referida al secundario. Como posibles corrientes de retención existen diversas variantes, que de alguna forma reflejan la corriente que circula hacia la falla externa. Una de ellas por ejemplo, es la corriente $I_{Is} - I_{IIs}$, que, como puede apreciarse en la figura 8.7 tiene un valor grande para cortocircuito externo, y pequeño para cortocircuito interno.

En resumen, las variantes de corrientes de retención que se han aplicado en la práctica en los relevadores de porcentaje diferencial son:

$$\begin{array}{ll} I_{ret} = I_{Is} + I_{IIs} & I_{ret} = I_{Is} \\ I_{ret} = \frac{I_{Is} - I_{IIs}}{2} & I_{ret} = I_{IIs} \\ & I_{ret} = I_{Is} + I_{IIs} \end{array}$$

En la figura 8.8 se muestra la característica de operación de un relevador de porcentaje diferencial en el que se hace directamente la comparación de las corrientes de operación y de retención.

La condición de operación es:

$$I_{op} > k I_{ret}$$

La característica de operación es la recta:

$$I_{op} = k I_{ret}$$

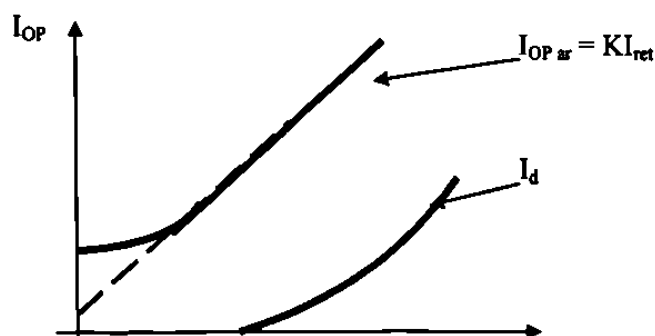


Figura 8.8 Característica de operación

Como se puede observar el nombre del relevador está dado por el hecho de que su posición tiene lugar cuando el porcentaje de la corriente de operación representa de la de retención rebasa cierto valor.

En el caso real se toman medidas de diseño para que la característica no comience en el origen de coordenadas y así evitar la operación incorrecta del relevador sin corriente diferencial.

En la figura 8.8 se muestra la variación de la corriente de desbalance del esquema diferencial con la de retención. La característica del relevador de insensibilizarse para grandes valores de corrientes de retención reduce considerablemente su posible afectación por la corriente de desbalance.

El principio de la protección de porcentaje diferencial se extiende a elementos del sistema con más de dos terminales, es deseable en ese caso que la señal de corriente proveniente de cada terminal en que hay generación se aplique a un elemento de retención.

Los relevadores de porcentaje diferencial han encontrado gran aplicación en la protección de todos los tipos de elementos del sistema eléctrico de potencia.

8.5 PROTECCIÓN POR HILO PILOTO.

Por lo general se realiza la comparación directa de los valores instantáneos de las corrientes de las terminales de la línea protegida, y se utilizan relevadores del tipo de porcentaje diferencial.

Al aplicarse las conexiones de los relevadores diferenciales surgen una serie de inconvenientes para esta variante:

1. Se requiere de un total de tres relevadores, uno por fase, cada uno de los cuales provocará el disparo de todos los interruptores del elemento protegido. Este arreglo ocasionaría el empleo de ocho conductores en el canal piloto (seis para la conexión de los relevadores y otros dos para la transmisión de las señales de disparo a los interruptores).
2. Las altas cargas que estos conductores imponen a los transformadores de corriente y los elevados valores de corriente que pueden circular por estos conductores, impedirá utilizar como canal una línea telefónica.

Para evitar esta serie de problemas en la protección de cada terminal se emplea:

1. Un filtro combinado de secuencia, que generará un voltaje monofásico de salida a partir de las corrientes de las tres fases.
2. Además, se dispondrá de un relevador de porcentaje diferencial en cada terminal, que actuará sobre el interruptor correspondiente.

Con estas medidas la protección por hilo piloto se reducirá a un par de conductores solamente.

En la protección por hilo piloto se pueden emplear las variantes de protección diferencial conocidas como de corrientes circulantes y de voltajes en oposición. La figura 8.9 muestra los diagramas esquemáticos de estas variantes, así como la circulación de corrientes correspondientes a la condición en que no existe falla interna, se representa una fase solamente de la línea protegida por razones de simplicidad del esquema y se omiten los filtros de secuencia.

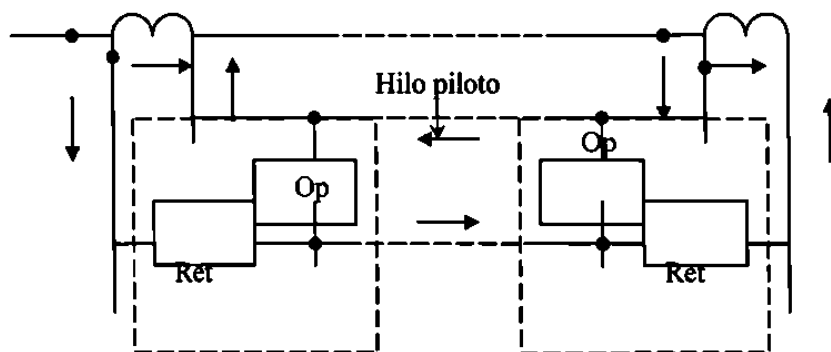


Figura 8.9a Protección piloto de corrientes circulantes.

En el esquema de corrientes circulantes (figura 8.9a) la condición representada, no presenta falla interna, implica que la corriente circule por los conductores piloto, y por los elementos de retención de ambos relevadores; las corrientes de operación tienen valores pequeños, dados por los errores de los transformadores de corriente. En caso de falla interna, aparece una corriente diferencial en el esquema que se divide entre ambos elementos de operación y que puede provocar la operación de los relevadores de ambos extremos.

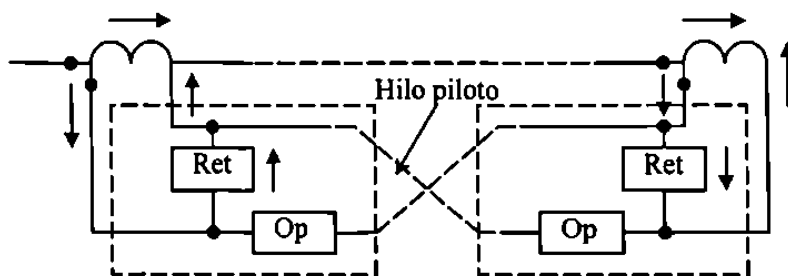


Figura 8.9b Protección piloto voltajes en oposición.

En el esquema de voltajes en oposición cuando no existe falla interna no circula corriente por el canal piloto (figura 8.9b). La corriente de cada transformador de corriente circula por el elemento de retención del relevador de ese propio terminal, y por los elementos de operación circulan corrientes pequeñas, dadas por las capacitancias entre los conductores piloto y por los errores de los transformadores de corriente. Si ocurre un cortocircuito interno aparece una corriente diferencial en el esquema, que circula por el canal piloto y por los elementos de operación, y puede provocar la operación de los relevadores de ambos extremos.

Las fallas del canal piloto tienen efectos contrarios sobre los dos esquemas analizados. Un cortocircuito en el hilo piloto puede provocar el disparo incorrecto del esquema de voltajes en oposición, o bloquear indebidamente el disparo del esquema de corrientes circulantes. La apertura del circuito del canal piloto, por el contrario, puede provocar el disparo incorrecto del esquema de corrientes circulantes, o bloquear indebidamente el disparo del esquema de voltajes en oposición. Esto debe tomarse en cuenta al decidir el tipo de acción a realizar por el equipo de supervisión del canal piloto al detectar cortocircuitos o circuitos abiertos. Por lo general se hace que el equipo de supervisión emita una alarma en la condición que implica el bloqueo indebido de la operación de la protección; en la condición de posible disparo incorrecto, el equipo de supervisión deberá bloquear ese disparo. Para ello es necesario introducir un cierto retardo de tiempo en la operación e la protección por hilo piloto (de manera que el equipo de supervisión tenga tiempo de bloquearla si es necesario), lo cual constituye una desventaja de este tipo de protección.

En la figura 8.10 se muestra el diagrama esquemático de una protección por hilo piloto de corrientes circulantes. La protección de cada terminal de la línea consta de:

1. Un filtro combinado de secuencia FCS.
2. Transformador saturable "T_s"
3. Relevador diferencial "RD"
4. Transformador de aislamiento "T_a"

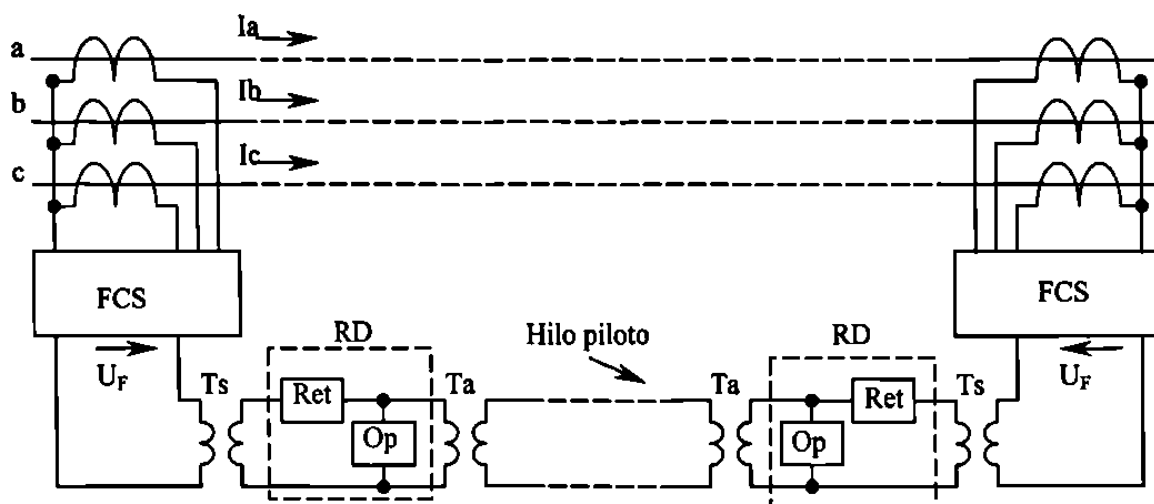


Figura 8.10 Diagrama esquemático protección hilo piloto de corrientes circulantes

El filtro combinado de secuencia emite un voltaje alterno de salida que está dado por la ecuación:

$$V_F = k_1 I_1 + k_2 I_2 + k_0 I_0$$

Donde:

I_1 , I_2 e I_0 Componentes de secuencia positiva, negativa y cero de las corrientes de línea.

K_1 , k_2 , k_0 Coeficientes constantes.

En algunas protecciones se omiten en el filtro los términos correspondientes a las componentes de secuencias negativa o cero, pero ello afecta la sensibilidad de la protección. En todos los tipos de cortocircuitos está presente la componente de secuencia positiva, pero para cortocircuitos a tierra el término $k_0 I_0$ da una mayor sensibilidad a la protección que si la detección se hace sobre la base de I_1 o a I_2 . Por otra parte, el término $k_2 I_2$ es necesario para lograr que la protección tenga igual sensibilidad para cortocircuitos trifásicos y bifásicos; la omisión de este término hace que la sensibilidad para cortocircuitos bifásicos sea $\sqrt{3}/2$ veces menor que para los trifásicos (para $Z_1 = Z_2$), debido a que la corriente del cortocircuito bifásico es $\sqrt{3}/2$ veces menor que la del trifásico en el mismo punto de la línea.

El transformador saturable “ T_s ” (figura 8.10) tiene la función de limitar el voltaje aplicado al canal piloto para grandes valores de corriente en la línea protegida; su voltaje máximo de salida es por lo general del orden de 15 volts. Cuando este transformador trabaja en régimen de saturación severa la protección tipo piloto opera por comparación de fase de las corrientes y no por comparación de sus valores instantáneos, toda vez que el voltaje secundario del transformador prácticamente solo porta información sobre las fases de las corrientes, debido a la saturación. El transformador de aislamiento “ T_a ” tiene la función de aislar la protección del canal piloto y tiene una relación de transformación que hace que el voltaje en el canal no pase de alrededor de 90 volts.

Este sistema tiene la posibilidad de provocar el disparo de los interruptores de las dos terminales de la línea aunque por alguno de ellos no exista contribución al cortocircuito interno. En ese caso la corriente de la protección de la terminal de la línea en que existe generación se divide entre el elemento de operación del relevador local y el elemento de operación del relevador remoto, que queda conectado en serie con el canal piloto. Si la corriente de cortocircuito es lo suficientemente elevada puede tener lugar la operación de ambos relevadores, lo cual es deseable en algunos casos.

El sistema puede extenderse en principio a líneas de tres terminales, para lo cual los tres pares de hilos piloto deberán de conectarse formando una estrella, cuyos brazos deberán tener impedancias iguales; se recomienda utilizar resistores adicionales para compensar las diferencias de impedancias debidas a las diferentes longitudes de los hilos piloto. Sin embargo, la aplicación de la protección por hilo piloto a líneas de tres terminales debe de hacerse con precaución, sobre todo debido a los transformadores saturables que afectan la linealidad de la relación existente entre las corrientes de la línea protegida y la señal que utiliza la protección.

Los problemas que presenta la protección por hilo piloto son:

1. La confiabilidad el canal propiamente dicho (par de conductores aéreos).
2. El costo crece casi proporcionalmente con la longitud de la línea.
3. Se tienen que tomar medidas de protección contra sobrevoltajes de diversa índole.

Algunos de estos problemas se resuelven empleando el canal de fibra óptica, aunque es necesario seguir perfeccionando este canal desde el punto de vista de la atenuación de la señal, que aun limita la longitud de la línea a proteger y del costo.

La protección por hilo piloto utiliza solamente señales de corriente, por lo que no se requieren transformadores de potencial; esta protección se basa en el principio de la protección diferencial, por lo que no es afectada por las oscilaciones de potencia y pérdida de sincronismo o por inducción mutua entre la línea protegida y las líneas adyacentes.

El hilo piloto puede utilizarse también como canal de comunicación de protecciones piloto por comparación de fase o por comparación direccional; en este caso la información se transmite en forma de tonos de audio, en la banda de frecuencia de 1000 a 3000 Hz.

8.6 PILOTO POR COMPARACIÓN DE FASE.

Debido a la saturación del transformador saturable se pueden generar altos valores de corriente, por esta causa la protección por hilo piloto basa su principio de operación en la comparación de fase.

El principio de la comparación de fase de las corrientes de las terminales de la línea protegida (protección diferencial de fase) se puede aplicar en forma general en cualquiera de los tipos de canales de comunicación. La figura 8.11 muestra el diagrama esquemático simplificado de una protección piloto por comparación de fase para una línea de dos terminales.

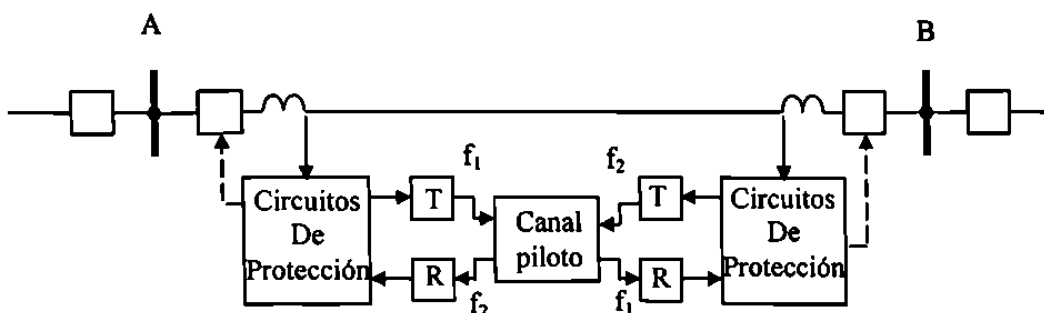


Figura 8.11 Protección piloto por comparación de fase.

Las señales provenientes de los transformadores de corriente conectados en estrella ($I_a, I_b, I_c, 3I_0$), se aplican a los circuitos de protección de cada terminal que también reciben señales de los receptores locales. En los circuitos de protección se hace la comparación de fase de las corrientes de ambas terminales y se emite en caso de ser necesario la señal de disparo al interruptor local; se controla además la transmisión de señales hacia el terminal remoto portadoras de información sobre la fase de las corrientes del terminal local.

La información puede transmitirse mediante señales de naturaleza intermitente (sistema "ON-OFF"); la presencia de una señal representa un "1" lógico y su ausencia un "0". Por lo general es este caso se utiliza una frecuencia única en los equipos transmisores y receptores de todos las terminales de la línea ($f_1 = f_2$). Los circuitos de protección controlan el arranque y la parada de los respectivos transmisores y los receptores emiten como salida un "1" o un "0" dependiendo de si existe o no una señal presente en el canal.

El otro sistema posible es el de corrimiento de frecuencia, en que cada transmisor emite en forma continua una señal que puede tener uno de dos valores de frecuencia cercanos entre sí, por ejemplo:

$$\begin{array}{ll} f_1 + \Delta f & \\ f_1 - \Delta f & \text{Transmisor del extremo "A"} \\ f_2 + \Delta f & \\ f_2 - \Delta f & \text{Transmisor del extremo "B"} \end{array}$$

Los circuitos de protección controlan la emisión por los transmisores de señales de una u otra frecuencia, y los receptores tienen dos salidas independientes, una para cada frecuencia; en cada salida del receptor existe una señal presente si se está recibiendo la señal de la frecuencia correspondiente a esa salida.

En el sistema de corrimiento de frecuencia es obligatorio que cada transmisor tenga una frecuencia base diferente a las demás ($f_1 \neq f_2$). Una variante de este sistema es la que utiliza tres frecuencias: una central, que implica ausencia de información, y dos extremas, que representan respectivamente el "1" y el "0" lógicos de los tres canales de comunicación.

En los circuitos de protección se incluye por lo general un filtro combinado de secuencia semejante al de la protección por hilo piloto, su voltaje monofásico de salida es $V_f = k_1 I_1 + k_2 I_2 + k_0 I_0$ aunque en ocasiones se omite alguna componente de secuencia, o se comparan por separado las diferentes componentes. Existe un tipo de protección que no tiene filtro, y hace la comparación de las corrientes totales de las fases.

Por conveniencia las señales solo se deberán de transmitir cuando exista un cortocircuito, esto ayuda para la seguridad del sistema. Por esta razón se utilizan detectores de falla, que por lo general son dos detectores en cada terminal; uno de ellos, el de mayor sensibilidad, inicia la transmisión de la señal, mientras que el otro permite o no el disparo del interruptor local. Estos detectores son generalmente de sobrecorriente, y su corriente de arranque debe de estar por encima de la carga máxima y por debajo de la mínima de cortocircuito en la línea protegida. En líneas largas o muy cargadas en que no puede cumplirse este criterio, es necesario emplear relevadores de distancia como detectores de falla, con el inconveniente de que se requieren adicionalmente transformadores de potencial para la protección.

La protección piloto por comparación de fase es en principio aplicable a líneas de más de dos terminales; con el sistema "ON-OFF" se mantiene el criterio de utilizar una frecuencia única, por lo que el equipo necesario en cada extremo es básicamente igual a los utilizados en las líneas de dos terminales. En el sistema de corrimiento de frecuencia existe una gran variedad de frecuencias diferentes como terminales tiene la línea, por lo que en cada extremo se requiere de un receptor para la frecuencia correspondiente a cada terminal remoto. Por ejemplo, en una línea de tres terminales se necesita un transmisor y dos receptores en cada terminal. En la práctica es difícil de aplicar la protección piloto por comparación de fase a líneas de más de dos terminales por razones de sensibilidad.

En la figura 8.12 se muestra el principio de operación de la protección piloto por comparación de fase.

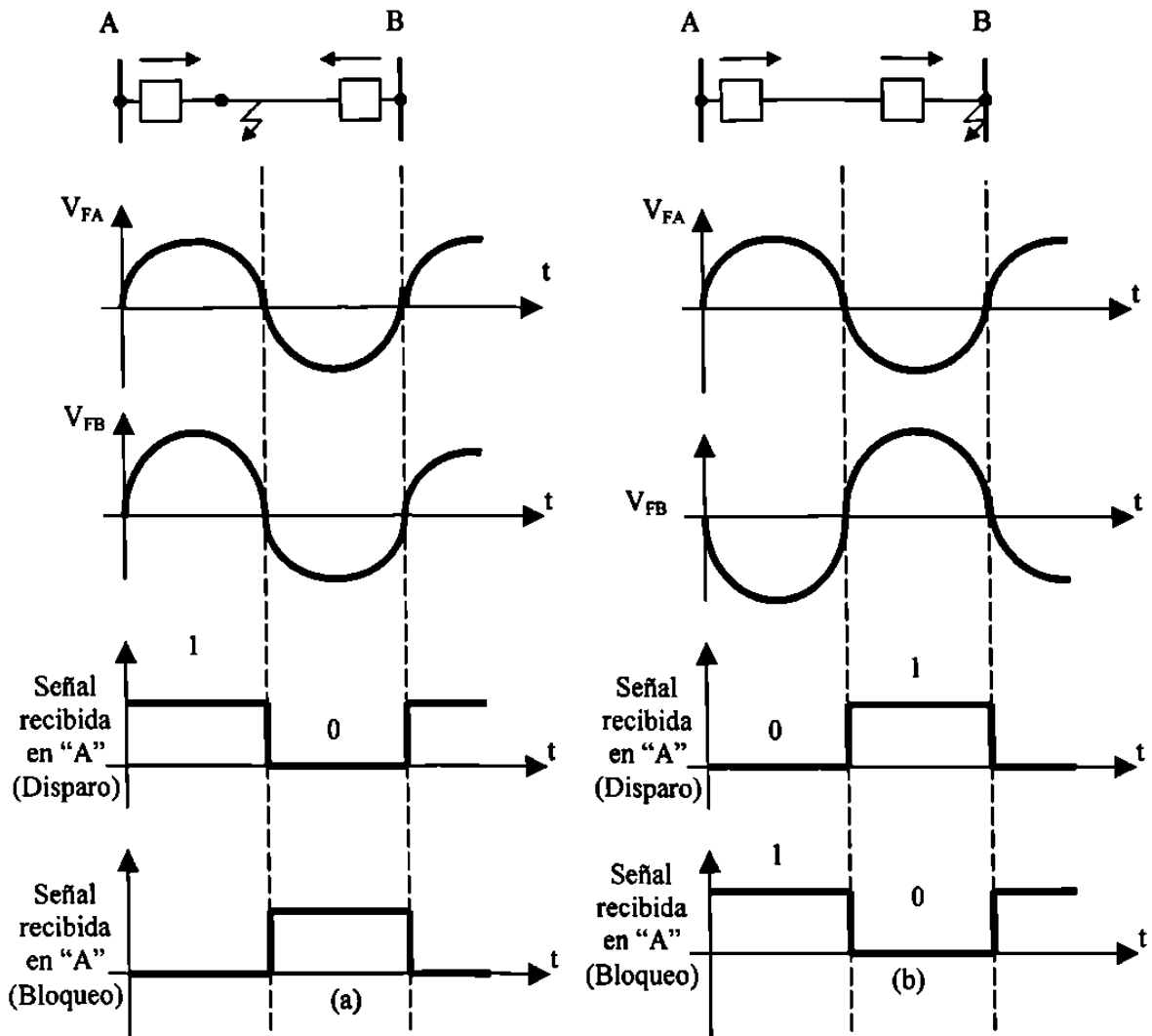


Figura 8.12 Principio de operación por comparación de fase

En la figura anterior se muestran los cortocircuitos internos y externos, los voltajes de salida de los filtros combinados de secuencia de las terminales "A" y "B" (V_{FA} y V_{FB}), así como las señales recibidas en "A", en dos variantes posibles (disparo y bloqueo). En la terminal "A" se realiza la comparación de fase de la señal " V_{FA} " y la señal recibida desde el extremo remoto.

En la variante de piloto de disparo, el "1" lógico de la señal recibida en "A" corresponde al medio ciclo positivo de " V_{FA} " para falla interna y tiene un defasaje de 180° una para falla externa. En la figura 8.13a se muestra la lógica de la comparación de las señales en el esquema de comparación de fase (ECF) de los circuitos de protección;

esta protección piloto es de disparo, pues la señal transmitida por el canal es de disparo, y si la señal se encuentra ausente (por algún daño del canal) el disparo no ocurrirá.

En la variante de piloto de bloqueo, el "1" lógico de la señal recibida en "A" corresponde al medio ciclo negativo de la señal " V_{FB} ". En la figura 8.13b se muestra la lógica de comparación de donde se deduce que la señal recibida es de bloqueo, y el disparo puede tener ocurrir en ausencia de la señal. La comparación de fase que se ha analizado hasta aquí es de media onda, pues solamente se utiliza la información de determinados semiciclos de las señales. Esto presenta un inconveniente, las señales de disparo se emiten una vez por ciclo, lo que afecta la velocidad de operación; si el cortocircuito aparece durante el semiperíodo en el que no hay comparación, la señal de disparo no puede originarse hasta el siguiente semiciclo.

Este retardo de tiempo, cuyo valor máximo es de un semiperíodo, es casi siempre tolerable, pero en casos críticos es conveniente hacer la comparación de onda completa. Los circuitos de protección son en este caso de mayor complejidad, positivos y negativos. Para la comparación de onda completa se requieren de frecuencias diferentes en los distintos transmisores.

Un aspecto importante a tomar en cuenta es el referente a los límites angulares del esquema de comparación por fase. En un caso ideal (Fig. 8.12) las señales de entrada al esquema de comparación (Fig. 8.13) están exactamente en fase para falla interna, y desfasados exactamente 180° para una falla externa.

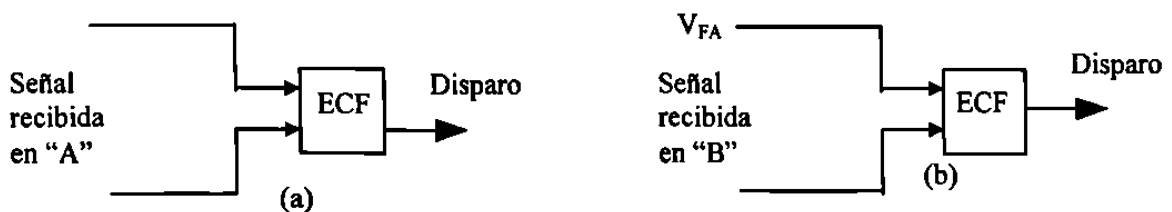


Figura 8. 13 Comparación de fase de señales de disparo (a) y de bloqueo (b)

En realidad existen errores de fase debidos a:

1. La posible saturación de los transformadores de corriente.
2. Al defasaje entre las corrientes originado por el efecto capacitivo de la línea protegida.

3. A diferentes comportamientos de los filtros combinados de secuencia.
4. Al tiempo de propagación de señales por el canal piloto.
5. Retardos de tiempo que introducen los transmisores y los receptores.

En el caso de los cortocircuitos internos a los factores anteriores se añade el hecho de que existe un defasaje entre las corrientes de las distintas terminales, debido al defasaje entre las "FEM" y las diferencias de ángulos de las impedancias de los generadores equivalentes correspondientes a esas terminales. Se ha demostrado que esos errores no son mayores de 40° ni aún en el caso más crítico de los cortocircuitos internos. Por tanto, se considera adecuado un valor de límite angular de 65° a 90° para el esquema de comparación de fase, es decir, que su operación tenga lugar para todo defasaje entre las señales de entrada que este comprendido, por ejemplo, entre -90° y $+90^\circ$.

A continuación se presenta una breve descripción de los tipos fundamentales de protecciones piloto por comparación de fase, y se analizan algunos otros aspectos de estas protecciones.

8.6.1 PILOTO DE MEDIA ONDA DE BLOQUEO ("ON-OFF")

Es la variante más difundida de protección piloto por comparación de fase, y se utiliza con todos los tipos de canales piloto. su diagrama esquemático se muestra en la figura 8.14 el cual esta compuesta por:

1. El esquema de comparación de fase "ECF".
2. El filtro combinado de secuencia "FCS" (incluye un formador de ondas cuadradas a su salida).
3. Los detectores de falla de disparo (DF_D) y de control de la transmisión (DF_T).
4. El transmisor "T".
5. El receptor "R".

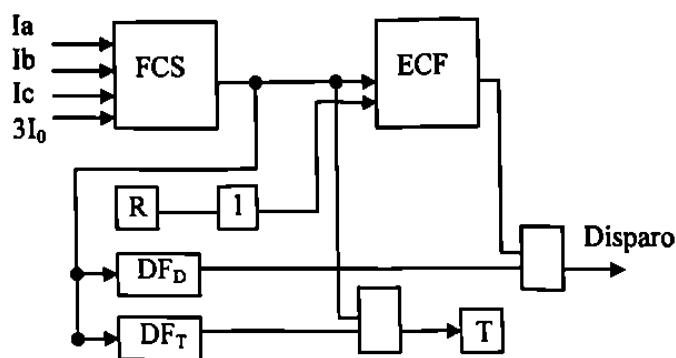


Figura 8.14 Esquema de media onda de bloqueo (“ON-OFF”)

En regímenes normales de operación de la línea protegida no existen señales de salida en los detectores de falla, por lo que no existe posibilidad de disparo del interruptor local, ni se transmite señal hacia el terminal remoto.

Para cortocircuitos externos (Figura 8.12b) las señales de salida de “FCS” y del receptor local tienden a estar en fase, pero las señales de entrada a “ECF” están aproximadamente a 180° (Debido a la compuerta lógica inversora), y no se origina señal de disparo del interruptor local aunque haya señal de salida en “DF_D”. Por otra parte, la señal de salida de “DF_T” prepara la compuerta lógica “Y” que emite una señal de salida (y pone en funcionamiento el transmisor) en cada medio ciclo negativo de la señal de salida de “FCS” (por efecto de la entrada negada de dicha compuerta). Con esta transmisión se bloquea también el disparo del extremo remoto de la línea.

Para cortocircuitos internos (Figura 8.12a) las señales de entrada a “ECF” están aproximadamente en fase, y éste emite por tanto, una señal de salida; como también hay señal de “DF_D”, se origina la señal de disparo del interruptor local. Como en el caso anterior, en cada medio ciclo negativo de la señal de salida de “FCS” se pone en funcionamiento el transmisor, pero estas señales no bloquean el disparo del otro extremo de la línea, pues están aproximadamente a 180° del voltaje de salida del “FCS” de esa terminal. Tiene lugar, por tanto, el disparo instantáneo de los interruptores de ambas terminales de la línea.

La operación de los detectores de falla puede resumirse en la forma siguiente: en caso de cortocircuito el detector “DF_D” opera y da la posibilidad del disparo local (que tiene lugar si la falla es interna y opera “ECF”); el detector “DF_T” también opera e inicia

la transmisión de la señal, que cesa durante los semiciclos positivos de la señal de salida de “FCS”. Es evidente que si por alguna razón el detector “DF_D” local opera más rápidamente que el “DF_T” remoto para un cortocircuito externo, puede tener lugar la operación incorrecta del interruptor local, por ausencia de señal de bloqueo; otro tanto ocurre si el detector “DF_D” responde al cortocircuito, y no responde “DF_T”. Por estas razones es que “DF_T” debe ser más sensible que “DF_D”.

8.6.2 PILOTO DE MEDIA ONDA DE DISPARO (“ON-OFF”)

El diagrama esquemático de esta variante se muestra en la figura 8.15, que se puede analizar suponiendo inicialmente que no existen el detector “DF_T” y la compuerta lógica inversora.

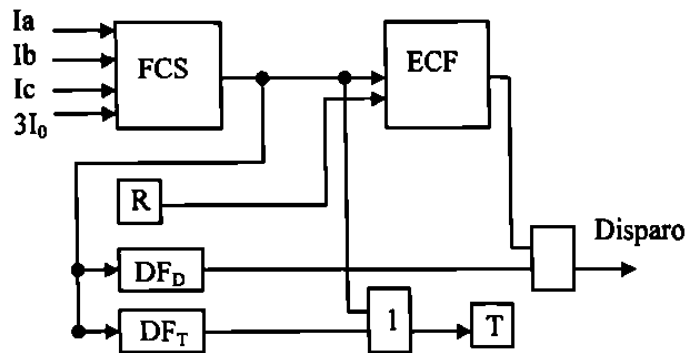


Figura 8.15 Esquema de media onda de disparo (“ON-OFF”)

Para cortocircuitos internos (figura 8.12a) las señales de entrada al “ECF” están aproximadamente en fase, y éste emite una señal de salida que, combinada con la señal de “DF_D”, conforma la señal de disparo del interruptor local; en este caso los transmisores de ambas terminales emiten señales de disparo aproximadamente en fase, que coinciden en tiempo con los semiciclos positivos de las señales de salida de los “FCS” de ambas terminales.

Para cortocircuitos externos (figura 8.12b) las señales de entrada al “ECF” están aproximadamente a 180° , por lo que no tiene lugar el disparo. Debe observarse que en este caso los transmisores de ambas terminales emiten señales de disparo que están desfasadas aproximadamente 180° ; es por ello necesario utilizar frecuencias diferentes

en ambos transmisores, de modo que ningún receptor local pueda recibir las señales generadas localmente (lo que origina un disparo incorrecto). Esta necesidad de utilizar dos frecuencias, aunque la transmisión sea de tipo "ON-OFF", ha limitado seriamente la aplicación práctica de esta variante.

El detector "DF_T" y la compuerta lógica inversora son necesarios para permitir el disparo de la línea si ocurre un cortocircuito estando abierto el interruptor de una de las terminales. En esa condición el "FCS" de la terminal abierta no tiene señal de salida, y el transmisor no transmite señales de disparo, por lo que la otra terminal no puede disparar aunque haya un cortocircuito. La combinación del "DF_T" y la compuerta lógica inversora hacen que cuando no existe señal de salida en el "FCS", se pone en funcionamiento en forma continua el transmisor local, esta señal se recibe en la terminal remoto, y puede tener el disparo si el "DF_D" detecta el cortocircuito.

8.6.3 PILOTO DE MEDIA ONDA DE BLOQUEO (CORRIMIENTO DE FRECUENCIA).

En la figura 8.16 se muestra el diagrama esquemático de esta variante que funciona de la misma forma que el esquema de media onda de bloqueo.

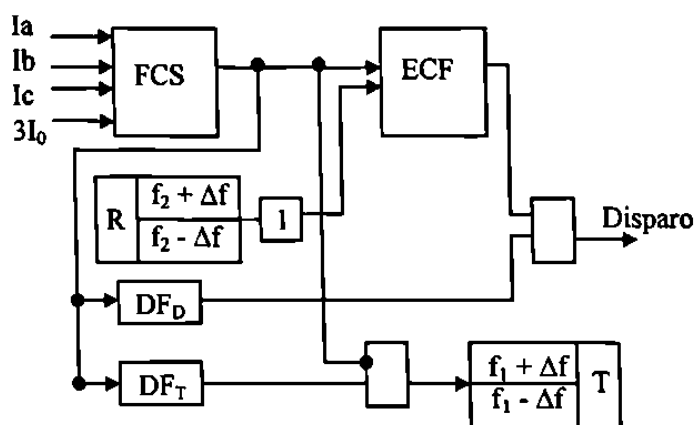


Figura 8.16 Esquema de media onda de bloqueo (Corrimiento de frecuencia)

La diferencia que existe entre el esquema de media onda de bloqueo (corrimiento de frecuencia) con el otro esquema de media onda de bloqueo ("ON-OFF") está en la transmisión y recepción de la señal que tiene dos frecuencias posibles. Cada transmisor

esta conectado de tal forma que si no recibe señal de entrada emite continuamente una señal de frecuencia $f + \Delta f$, que pasa a la frecuencia $f - \Delta f$ cuando llega una señal de entrada al transmisor. Por otra parte, de cada receptor solamente se utiliza la salida correspondiente a $f - \Delta f$; por ello, la recepción de una señal de frecuencia $f - \Delta f$ da lugar a una señal de salida del receptor "1" lógico, mientras que la señal de frecuencia $f + \Delta f$ corresponde al "0" lógico.

La ventaja de este esquema (corrimiento de frecuencia) con respecto al esquema ("ON-OFF") es que la transmisión en forma continua de las frecuencias ($f_1 + \Delta f$) y ($f_2 + \Delta f$) por ambos transmisores permite comprobar en todo momento el estado del canal, midiendo la señal en cada receptor; esto da la posibilidad de bloquear automáticamente la protección y dar una alarma en la terminal en donde se haya perdido la recepción de la señal. Sin embargo, esta ventaja, no compensa totalmente la menor velocidad de operación y la mayor afectación por el ruido (puede provocar disparo incorrecto para cortocircuitos externos) de este sistema con respecto al que se utiliza transmisión "ON-OFF". Inclusive, en el sistema "ON-OFF" existe la posibilidad de comprobar periódicamente el estado del canal. Por estas razones se prefiere generalmente el esquema de "ON-OFF" que el de corrimiento de frecuencia.

8.6.4 PILOTO DE MEDIA ONDA DE DISPARO (CORRIMIENTO DE FRECUENCIA).

Esta variante se muestra en la figura 8.17, funciona en forma semejante al esquema de media onda de disparo ("ON-OFF") pero a diferencia de ésta, se ha encontrado cierta aplicación en la práctica fundamentalmente en los canales de microondas y de hilo piloto.

El canal de onda portadora no se recomienda para una protección de disparo, pues la señal tiene que transmitirse a través de la línea fallada para que el disparo se origine, y eso puede crear la pérdida de la señal en algunos casos, y el fallo del disparo.

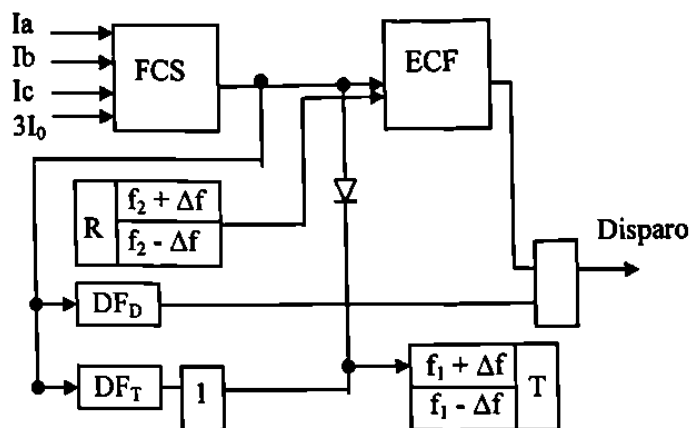


Figura 8.17 Esquema de media onda de disparo (Corrimiento de frecuencia)

8.6.5 PILOTO DE MEDIA ONDA DE PÉRDIDA DE BLOQUEO (CORRIMIENTO DE FRECUENCIA).

En este esquema se transmite en forma continua una señal de bloqueo, que debe desaparecer para que tenga lugar el disparo para cortocircuitos internos. Se utiliza con cualquiera de los tipos de canales piloto y en los últimos años se ha incrementado su aplicación. La figura 8.18 muestra el diagrama esquemático de este sistema, en el que no es necesario el detector de falla “DF_T” debido a que constantemente se está transmitiendo señal, inclusive en un régimen de operación normal.

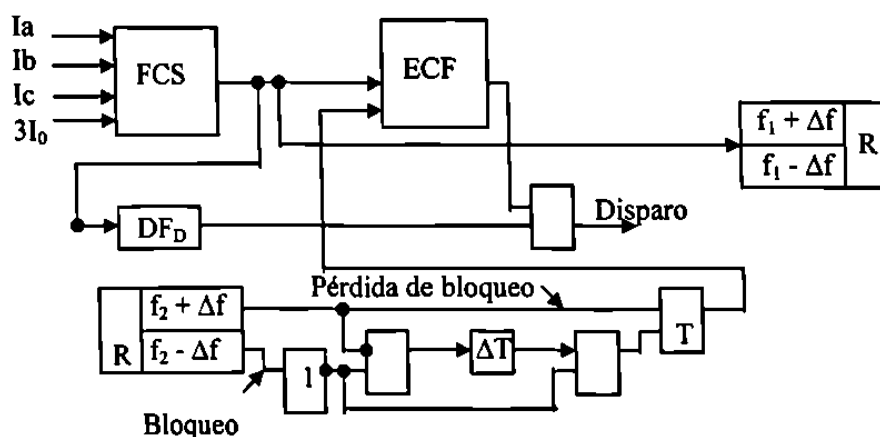


Figura 8.18 Esquema de media onda de pérdida de bloqueo (Corrimiento de frecuencia)

Este caso utiliza las señales de las dos frecuencias que se transmiten en cada terminal: una de ellas ($f_1 - \Delta f$ y $f_2 - \Delta f$) porta información de bloqueo y la otra ($f_1 + \Delta f$ y $f_2 + \Delta f$) representa la condición de pérdida de bloqueo. Se puede apreciar que la

diferencia entre el esquema de pérdida de bloqueo y el esquema de disparo (corrimiento de frecuencia) es el canal de bloqueo $f_2 - \Delta f$; si no existiera ese canal, el piloto sería de disparo, y la señal de frecuencia $f_2 + \Delta f$ sería de disparo y no de pérdida de bloqueo.

El canal de bloqueo realiza dos funciones:

1. Generar la señal de bloqueo cuando no exista falla interna.
2. Dar la posibilidad de disparo cuando se pierde el bloqueo, aunque no aparezca la señal de pérdida de bloqueo, es decir, el disparo puede tener lugar con la simple pérdida del bloqueo.

En su operación desempeña una función importante el circuito de tiempo " ΔT ", el cual introduce un retardo de unos 150 MS entre la aparición de un "1" lógico a su entrada y la emisión de un "1" a su salida. Normalmente su señal de salida es un "0" lógico y la compuerta "Y" con entrada negada que está conectada a su salida se mantiene preparada para dejar pasar continuamente la señal de bloqueo negada proveniente de la compuerta lógica inversora.

Para cortocircuitos externos el receptor local recibe las señales de frecuencias $f_2 - \Delta f$ y $f_2 + \Delta f$ en tal sucesión que genera una señal de salida que se encuentra aproximadamente en fase con la señal de salida del "FCS" local; esa señal, al pasar por las compuertas lógicas inversora y "0" implica una condición de señales desfasadas alrededor de 180° a la entrada del "ECF", que no opera; el transmisor local se encuentra generando en semiciclos alternos señales de frecuencias $f_1 - \Delta f$ y $f_1 + \Delta f$, que hacen que la operación de la terminal remoto sea semejante a la terminal local, y tampoco ocurre el disparo. Mientras tanto, las señales de pérdida de bloqueo (salida de $f + \Delta f$ de cada receptor) tienen la forma de la señal de disparo de la figura 8.2b, por lo que están en fase con la señal de bloqueo negada que se aplica a la otra entrada de la compuerta lógica "0".

Cuando existe un cortocircuito interno, se invierten las fases de las señales de bloqueo y de pérdida de bloqueo. Por ambas razones las señales de entrada del "ECF" están aproximadamente en fase, si opera el "ECF" y, si también operó el "DF_D", se genera la señal de disparo del interruptor local. De la misma forma funciona la terminal remoto es esa condición.

Si durante el cortocircuito interno el canal se encuentra dañado o por alguna otra razón desaparece la señal de bloqueo y no aparece la de pérdida de bloqueo, la operación es de todas formas posibles. En ese caso en ambas salidas del receptor hay señales de “0” lógicos, y en la entrada del circuito de tiempo “ ΔT ” aparece un “1”. Durante 150 MS su salida está en “0”, por lo que la compuerta “Y” que le sigue tiene un “1” a su salida, y el “ECF” tiene a su entrada una condición de señales en fase, que lo hace operar. Si el “DF_D” está operando se emite la señal de disparo del interruptor. Al cabo de 150 MS el esquema se comporta como de pérdida de bloqueo, y después de ese tiempo pasa a ser un piloto de disparo, se aprovechan con esto las ventajas de ambos sistemas. La operación del circuito de tiempo se utiliza también para emitir una señal de alarma que indica problemas en el canal.

8.6.6 PILOTO DE COMPARACIÓN DE FASE DE ONDA COMPLETA.

Se necesita cuando se desea reducir el tiempo máximo de operación. Se requiere en este caso frecuencias diferentes en las distintas terminales, por lo que generalmente se utiliza el sistema de corrimiento de frecuencia. Es necesario hacer por separado la comparación de fase de los semiciclos positivos y negativos, por lo que se necesitan dos “ECF” y dos salidas en el “FCS” de fases opuestas.

En la figura 8.19 se muestra el diagrama esquemático de una protección piloto de bloqueo de onda completa. La comparación de los esquemas de onda completa y el de media onda (corrimiento de frecuencias), revela que para cada semiciclo se hace la comparación con criterio de bloqueo, y la señal de disparo se emite a través de lógica “0”, es decir, si se cumple la condición de operación en cualquiera de los semiciclos. En este caso el “FCS” genera dos señales de salida en oposición de fase, representándose por (+) y (-) en la figura 8.19. La transmisión continúa de señal hace que no se requiera un detector de falla “DF_T”.

La comparación de fase de onda completa aumenta la velocidad de operación, pero tiene un esquema más complejo que la media onda. No obstante, su nivel de aplicación se ha incrementado en los últimos años.

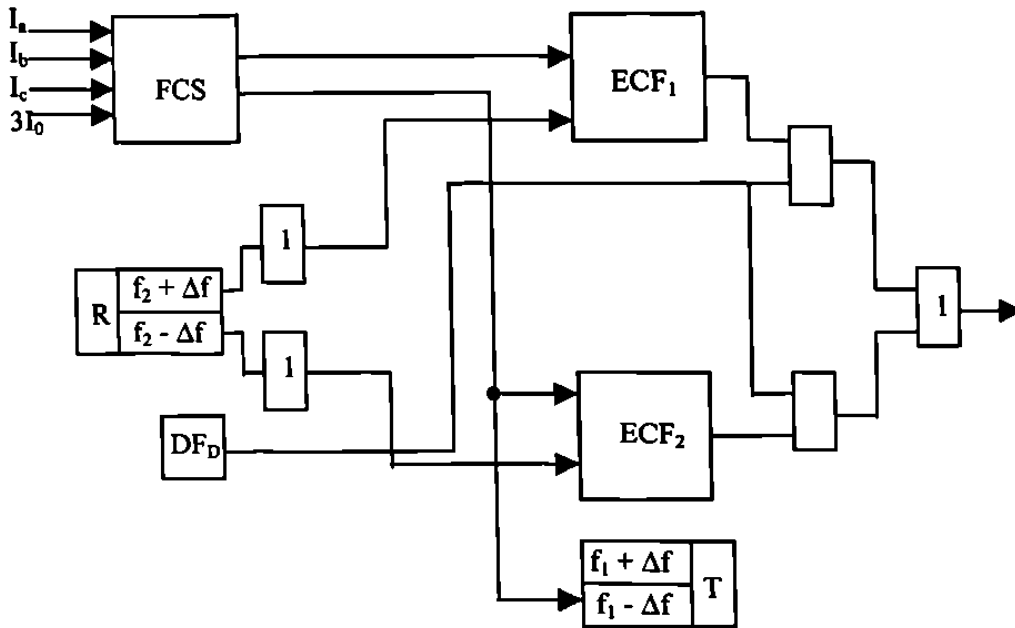


Figura 8.19 Protección piloto por comparación de bloqueo fase onda completa

8.6.7 CONSIDERACIONES ACERCA DE LAS SEÑALES A COMPARAR.

La selección de las señales a ser comparadas es un problema complejo, pues esas señales deben de cumplir con la condición de que el ángulo de defasaje entre las señales de las distintas terminales varíe apreciablemente (idealmente de 0° a 180°) entre los regímenes de cortocircuitos internos externos, y sea poco afectado por la corriente de carga y el tipo de cortocircuito.

Una variante posible es la comparación por separado de las distintas fases (comparación de fase segregada), que resulta muy costosa, pues se requieren, tres protecciones con sus respectivos sistemas de comunicación. La utilización de las componentes simétricas de las corrientes da la posibilidad de lograr la protección con un solo sistema, pero plantea la interrogante de que componentes simétricas utilizar y en que proporción; el problema es diferente al de la protección por hilo piloto (comparación de valores instantáneos de corrientes), pues en este caso la comparación es de fase.

La componente de secuencia positiva es aparentemente una buena opción, pues se encuentra presente para todos los tipos de cortocircuitos, pero es afectada por la corriente de carga.

La componente de secuencia negativa se encuentra libre del efecto de la corriente de carga y está presente para la mayoría de los tipos de cortocircuitos, pero no para el cortocircuito trifásico.

De lo anterior se deduce la conveniencia de combinar distintas componentes de secuencia. Estudios realizados demuestran que la componente de secuencia cero (su circulación en el sistema es diferente a las corrientes de secuencia positiva y negativa) introduce variaciones complejas en el ángulo de fase, difíciles de tener en cuenta, y es conveniente no utilizarla.

La utilización combinada de las componentes de las secuencias positiva y negativa puede hacerse en distintas variantes:

- Una de ellas consiste en hacer por separado las comparaciones de ambas componentes de secuencia, con una salida por lógica “0”, donde el “FCS” es en un caso de secuencia positiva y en otro caso de secuencia negativa.
- Otra variante consiste en utilizar un solo esquema, pero con dos filtros (uno de secuencia positiva y otro de secuencia negativa) y un detector de cortocircuitos trifásicos. Normalmente la salida del filtro de secuencia negativa está conectada al esquema, pero en caso de cortocircuitos trifásicos, el detector conmuta el esquema hacia el filtro de secuencia positiva.
- Otra alternativa es utilizar un solo filtro, pero controlado por el detector de cortocircuitos trifásicos, de modo que su salida sea de secuencia positiva para este tipo de cortocircuito y de secuencia negativa para todos los restantes.
- La variante más utilizada es aquella en que el filtro de secuencia es combinado y su voltaje de salida depende de las componentes de secuencias positiva y negativa. Se ha demostrado que los mejores resultados se obtienen con un voltaje de salida del filtro dada por:

$$V_F = k'(I_2 - \frac{I_1}{k})$$

donde: “k” Coef. Cte. de valor ajustable con valor típico de “5”.

8.6.8 COMPARACIÓN DE FASE SEGREGADA.

La protección piloto por comparación de fase se aplica a líneas largas con compensación serie capacitiva; esta protección responde solamente con corriente, no es afectada por las variaciones del ángulo de defasaje entre el voltaje y la corriente que introducen los capacitores de compensación, a diferencia de la protección piloto por comparación direccional. Actualmente existe un gran número de este tipo de protecciones en la modalidad de onda completa con filtro combinado de secuencia, funcionando satisfactoriamente en este tipo de líneas.

Sin embargo, las líneas largas con compensación en serie son una fuente de armónicos durante los cortocircuitos que pueden afectar la operación de las protecciones piloto por comparación de fase con filtros de secuencia. Ello se debe a que estos filtros tiene parámetros dependientes de la frecuencia, y sus señales de salida sufren distorsión por efecto de los armónicos presentes en las corrientes de entrada. Cuando este problema se hace crítico, la solución es la comparación segregada que consiste en la comparación por separado de las señales provenientes de las distintas fases en lugar de conformar un solo voltaje para las tres fases. La señal de voltaje formada para cada fase es independiente de la frecuencia y por lo tanto, de la forma de onda de la corriente.

Una variante consiste en comparar en tres sistemas separados las corrientes I_a , I_b e I_c ; otra posibilidad es comparar $I_a - I_b$ en un sistema e I_c en otro sistema.

Otro posible campo de aplicación de la protección piloto de fase segregada es el de las líneas con disparo y recierre monopolar de los interruptores. En este caso existe la necesidad de determinar con precisión las fases falladas para provocar la apertura de solamente esas fases del interruptor. Hay distintas variantes para la determinación de la fase fallada y una de ellas es precisamente la comparación de fase segregada en la modalidad de tres sistemas.

Es evidente que las protecciones por comparación de fase segregada son complejas y su costo es elevado, por lo que sus aplicaciones se limitan a los casos en que las variantes basadas en un solo sistema no satisfacen los requerimientos de la línea protegida.

8.6.9 VENTAJAS.

La protección piloto por comparación de fase es inherentemente diferencial y se basa en la comparación de corrientes por lo que tiene las siguientes ventajas:

1. No requiere transformadores de potencial (excepto en el caso en que se utilicen relevadores de distancia como detectores de falla).
2. No es afeada por la inducción mutua entre la línea protegida y las líneas adyacentes.
3. No es afectada por regímenes asimétricos de la línea protegida, tales como los relacionados con el recierre de interruptores o el disparo y recierre monopolar.
4. Es aplicable a la protección de líneas largas con compensación serie capacitiva.
5. No es afectada por las oscilaciones de potencia y pérdidas de sincronismo.

La protección piloto por comparación de fase tiene problemas con la discriminación entre las corrientes de carga y de cortocircuito, lo que limita su aplicación a los casos en que existe una diferencia apreciable entre ambas corrientes. Por esta misma razón su aplicación es difícil e líneas con alimentación débil en una terminal o en líneas multi-terminales.

8.7 PILOTO POR COMPARACIÓN DIRECCIONAL.

Esta protección hace una comparación indirecta de las direcciones relativas de las corrientes o de las potencias, a partir de la operación de relevadores que tienen direccionalidad (direccional o de distancia). Este principio se ha utilizado con todos los tipos de canales, tanto en la versión "ON-OFF", como en la de corrimiento de frecuencia. En la figura 6.20 se muestra el diagrama esquemático simplificado de una protección piloto por comparación direccional para una línea de dos terminales.

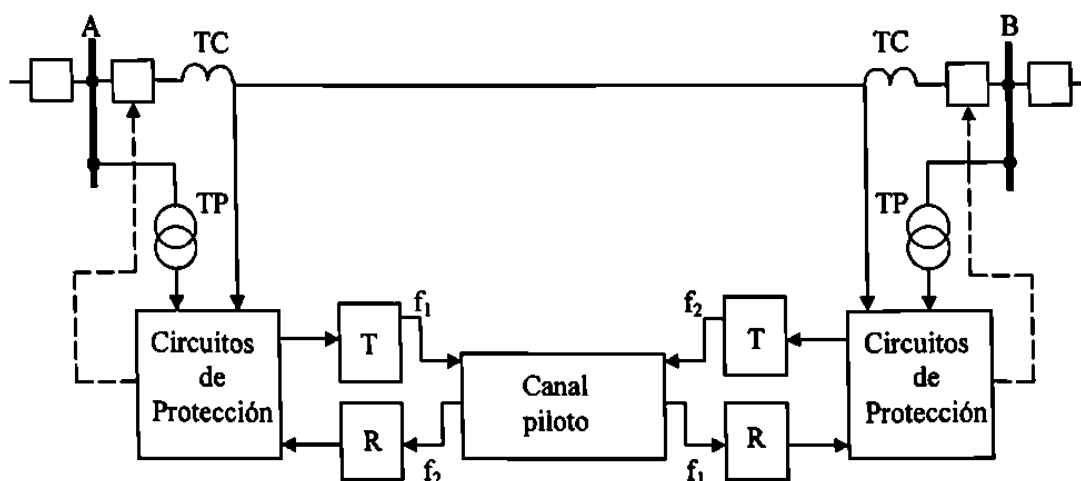


Figura 8.20 Protección piloto por comparación direccional.

Debe de notarse la diferencia de este esquema con le de la protección piloto por comparación de fase, que está dada por la necesidad de llevar señales de voltaje (además de las corrientes) a los circuitos de protección para la discriminación direccional.

Este principio s aplicable a líneas de mas de dos terminales donde resulta ventajoso con respecto al de comparación de fase. Si se utiliza el sistema "ON-OFF", los equipos necesarios en cada extremo son los mismos que en una línea de dos terminales, mientras que con el sistema de corrimiento de frecuencia hay que disponer en cada extremo de un receptor por cada terminal remoto.

La protección piloto por comparación direccional al igual que la de comparación de fase, no realiza la función de respaldo para cortocircuitos externos, por lo que deben complementarse con protecciones de distancia o direccionales de sobrecorriente. La protección de fase generalmente es de distancia, mientras que la de tierra puede ser de distancia o direccional de sobrecorriente.

Por lo general también se utilizan algunos de los elementos de medición de los esquemas de distancia o direccionales de sobrecorriente como detectores de falla para la protección piloto por comparación direccional.

Enseguida se describen los tipos fundamentales de protecciones piloto por comparación direccional, sobre el tipo de canal más utilizado en cada caso, y se hacen algunas otras consideraciones sobre estas protecciones.

8.7.1 PROTECCIÓN PILOTO DE BLOQUEO.

Es el más antiguo de los sistemas de protección piloto por comparación direccional y sigue siendo muy utilizado por su flexibilidad y versatilidad, es particularmente apropiado para líneas multi-terminales. Por lo general se aplica con un canal de onda portadora de tipo "ON-OFF", por el que se transmiten señales de una frecuencia única, aunque pueden utilizarse otros tipos de canales de comunicación.

Su aplicación consiste en que para cortocircuitos internos, que representan una condición de corriente entrante por todas las terminales de la línea, se permite el disparo instantáneo de todos los interruptores. Para cortocircuitos externos se genera y transmite una señal de bloqueo de disparo a partir de la información de que la corriente está fluyendo hacia fuera de la línea por una terminal. En cada terminal se requieren dos detectores de falla: un detector de falla de control de transmisión (DF_T), que inicia la transmisión de la señal de bloqueo cuando ocurre un cortocircuito; y un detector de falla de disparo (DF_D), que detiene la transmisión de la señal cuando el cortocircuito es en la dirección de disparo y habilita el sistema para el disparo local, a menos que se reciba una señal de bloqueo de otra terminal. En la figura 8.21a se muestran las zonas de operación de esos detectores de falla para la línea protegida "AB" y en la figura 8.21b se muestran sus características de operación para el caso de que sean relevadores de distancia tipo "Mho".

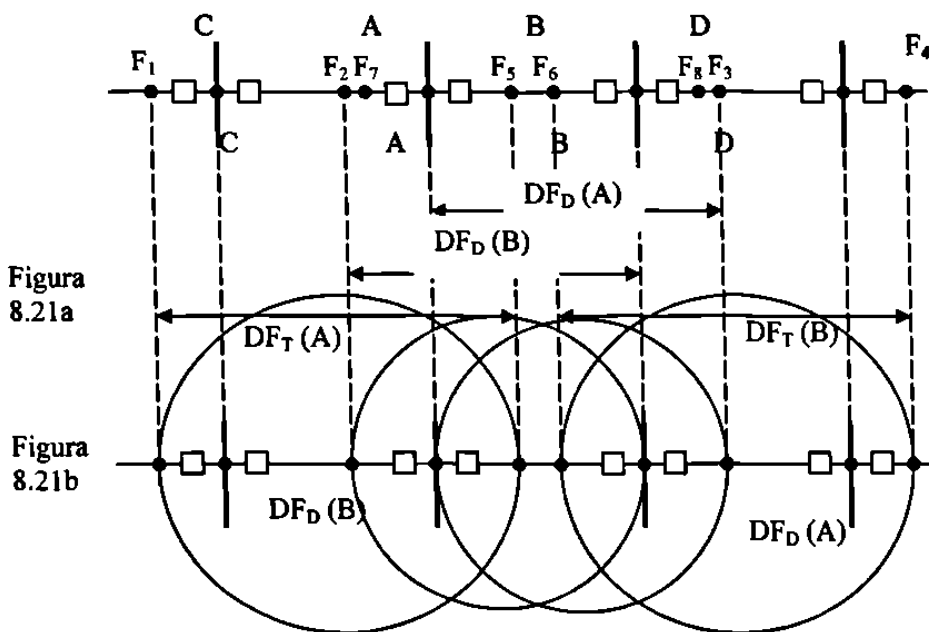


Figura 8.21 Zonas de operación (a) y características de operación (b) detectores de falla.

La variante de sobrecorriente tiene el inconveniente de que la extensión de las zonas de operación depende en gran parte del régimen del sistema.

Los detectores de falla de disparo “DF_D” tienen que ser direccionales y sobrealcanzar la o las terminales remotos de la línea.

Los detectores de falla de control de transmisión “DF_T” deben cubrir hacia fuera de la línea protegida una zona mayor que la de los “DF_D” de la otra u otras terminales. Así por ejemplo, el detector “DF_T” de la terminal “A” alcanza hasta el punto “F₁”, situado más lejos de “A” que el punto “F₂”, hasta el que alcanza el detector “DF_D” de la terminal “B”. Con esto se garantiza que todo cortocircuito externo que haga operar los “DF_D” de las terminales remotos, también quede dentro de la zona de operación del “DF_T” local, y éste pueda iniciar la transmisión de la señal de bloqueo. Generalmente se utiliza en calidad de “DF_T” la tercera zona de protección de distancia, que debe estar desplaza hacia el tercer cuadrante del plano complejo impedancia (tercera zona invertida, es conveniente mantener cierto desplazamiento de la característica hacia la línea protegida (puntos “F₅” y “F₆”) para garantizar la operación de los relevadores tipo “Mho” para cortocircuitos trifásicos limpios en el inicio de las líneas adyacentes (puntos “F₇” y “F₈”).

La inversión de la tercera zona por lo general cambia algo la concepción de la protección de respaldo. En este caso la protección de “A” tiene sus zonas primera y segunda orientadas hacia “B”, pero su tercera zona respalda a la línea “AC” en lugar de la “BD”. La protección de “B” cuyas zonas primera y segunda están orientadas hacia “A”, brindan por tercera zona el respaldo a la línea “BD”. En la figura 8.17 se muestran solamente las segundas y terceras zonas de esas protecciones y se utilizan también como detectores de falla.

En la figura 8.22 se muestra el diagrama esquemático de la protección piloto por comparación direccional de bloqueo para una terminal de la línea.

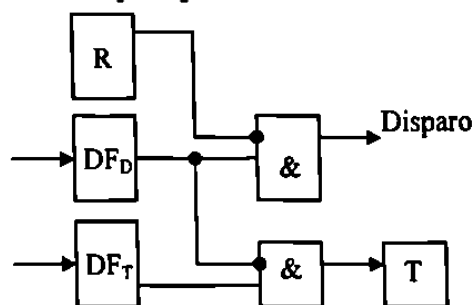


Figura 8.22 Protección piloto de bloqueo

Como se puede apreciar la condición para que se origine la señal de disparo es que opere el “DF_D” local, y que el receptor “R” no esté recibiendo señal de bloqueo, y tenga por tanto, una señal de “0” lógico a su salida. Por otra parte, el transmisor “T” local se pone en funcionamiento por la operación de “DF_T” y deja de transmitir si opera “DF_D”.

La operación para un cortocircuito externo (punto “F8” figura 8.21) es la siguiente:

- En la terminal “A” opera el “DF_D” y prepara las condiciones para el posible disparo local.
- En la terminal “B” opera el “DF_T” y se pone en funcionamiento el transmisor. La señal de bloqueo se recibe en la terminal “A” y se impide el disparo.

Para cortocircuitos internos, por el contrario, operan ambos “DF_D” y se bloquean ambos transmisores. Al no existir señal de bloqueo, se origina el disparo instantáneo de los interruptores de ambas terminales. Realmente, si el cortocircuito es en la zona central de la línea, queda dentro el alcance de las primeras zonas y el disparo instantáneo es por esa vía.

Cuando el cortocircuito está cerca de una de las terminales, el disparo de esa terminal es provocado por la primera zona de protección de distancia, mientras que el disparo instantáneo de la terminal remoto es por la acción de la protección piloto, que acelera el disparo que debía originarse en la segunda zona. Por lo general, se introduce un pequeño retardo en la señal de disparo (del orden de alrededor de 10 MS) para garantizar una buena coordinación en el esquema.

La pérdida del canal de comunicación durante un cortocircuito interno no constituye un problema, pues el canal no es necesario para el disparo; por el contrario, puede tener lugar una operación incorrecta si falla el anal para un cortocircuito externo que quede dentro del alcance de alguno de los “DF_D”. En condiciones normales, no existe la transmisión de señal, entonces una falla del canal no puede detectarse, a menos que ocurriera un cortocircuito externo. Por lo tanto, se recomienda que el personal realiza pruebas periódicas al canal en forma manual.

8.7.2 PROTECCIÓN PILOTO DE PÉRDIDA DE BLOQUEO.

El canal de onda portadora con el sistema de corrimiento de frecuencia, es la variante que más se utiliza de este tipo de protección, en la figura 6.23 se muestra el diagrama esquemático de esta protección.

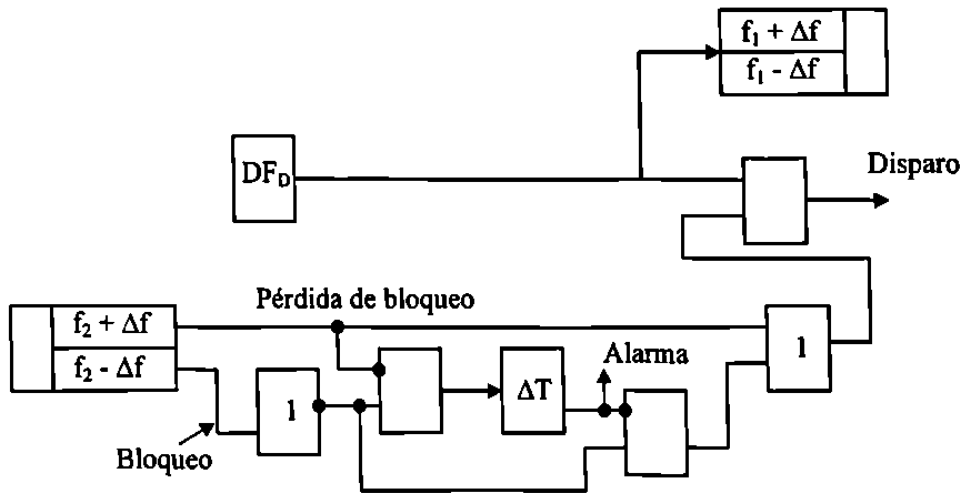


Figura 8.23 Protección piloto de pérdida de bloqueo

En este caso no se requieren detectores de falla de control de transmisión “DF_T”, debido a que constantemente se está transmitiendo señal, inclusive en un régimen normal de operación del sistema.

En condiciones normales de operación del sistema, los transmisores de todas las terminales de la línea se encuentran transmitiendo las señales de frecuencia de bloqueo. En los receptores, las salidas correspondientes al bloqueo están en “1” y las salidas correspondientes a la pérdida del bloqueo ($f_1 + \Delta f$ y $f_2 + \Delta f$) se encuentran en “0”. Adicionalmente, los “DF_D” no operan y por lo tanto, no existe la señal de disparo.

La operación para un cortocircuito externo (punto “F8” figura 8.21) es la siguiente:

- En el canal “B” no opera el “DF_D”, lo que evita el disparo del interruptor local y permite que el transmisor local continúe en el modo de bloqueo.
- En la terminal “A” opera el “DF_D”, pero como se sigue recibiendo señal de bloqueo de desde “B”, se mantiene en “1” en la salida

correspondiente al receptor y el "0" en la salida de la pérdida de bloqueo.

Esa combinación de señales origina un "0" a la entrada el circuito lógico "&" final, que bloquea el disparo aunque se encuentre en operación el "DF_D". Por otra parte, la operación del "DF_D" de la terminal "A" cambia su transmisor la frecuencia de pérdida de bloqueo " $f_1 + \Delta f$ ", en la terminal "B" esto hace que aparezca un "1" en la salida correspondiente a la pérdida de bloqueo del receptor, que habilita la compuerta "&" final para el disparo, pero el "DF_D" local no se encuentra operando por lo que no existe el disparo.

Para cortocircuitos internos operan los "DF_D" de ambas terminales, y los transmisores pasan a la frecuencia de pérdida de bloqueo ($f_1 + \Delta f$, $f_2 + \Delta f$). En las salidas de pérdida de bloqueo de ambos receptores aparecen señales de "1" y se generan señales de disparo en ambas terminales. Si el cortocircuito afecta el canal y no aparece la señal de la pérdida de bloqueo, en ambas salidas de cada receptor existen señales de "0" lógico.

Esta combinación de señales da lugar a la aparición de un "1" en la entrada correspondiente de la compuerta "&" final, a cuya otra entrada está aplicada la señal "1" de la salida del "DF_D", y ocurre el disparo. También se aplica un "1" a la entrada del circuito de tiempo " ΔT ", que 150 ms después emite un "1" a su salida, que bloquea el disparo si aún no ha ocurrido, y origina una señal adicional que se puede utilizar para dar aviso de problemas en el canal. Esta segunda función de aviso es importante sobre todo cuando la pérdida del canal tiene lugar durante el régimen normal de operación del sistema. En ese caso puede también sacarse de servicio automáticamente la protección.

Este esquema se comporta como de pérdida de loqueo durante 150 ms, y después se este tiempo pasa a ser un piloto de disparo. Su confiabilidad y seguridad lo hacen el sistema más adecuado para el canal de onda portadora.

8.7.3 PILOTO DE DISPARO DE SOBREALCANCE.

Este sistema no se debe de utilizar con canales de onda portadora, debido al peligro de interrupción del canal por efecto de algún cortocircuito interno que pueda

afectar la señal de disparo. Normalmente se utilizan canales de hilo piloto o microondas, generalmente con el sistema de corrimiento de frecuencia. En la figura 8.24 se muestra un diagrama esquemático de este tipo de protección, en el cual no se requieren detectores de falla de control de transmisión “DF_T”.

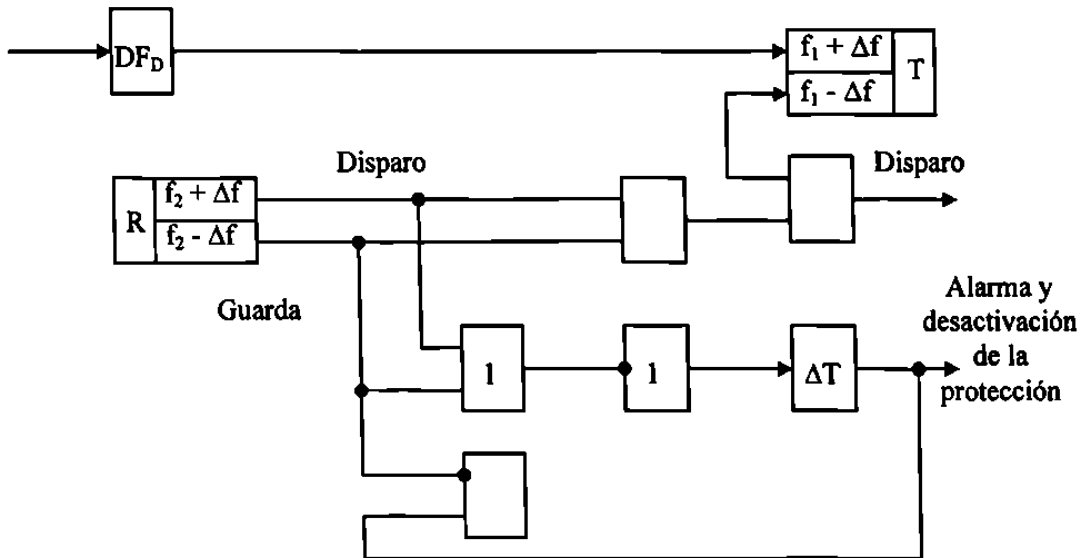


Figura 8.24 Protección piloto de disparo de sobrealcance

Los detectores de falla de disparo “DF_D” deben sobrealcanzar las terminales remotos de la línea.

En régimen normal de operación del sistema, los transmisores de todas las terminales de la línea están transmitiendo señales de frecuencia de guarda ($f_1 - \Delta f$, $f_2 - \Delta f$), y los “DF_D” no están operando, por lo que no existe el disparo. Si existen problemas con el canal y se pierde la señal de guarda, en ambas salidas de todos los receptores hay señales de “0”; el circuito de tiempo “ ΔT ” (en este caso tiene retardos de operación y de reposición) al cabo de 150 MS emite un “1” de salida, que se utiliza para dar un aviso de problemas en el canal y desactivar la protección. Si se restablece el canal y reaparece la señal de guarda, surge un “1” en la salida correspondiente del receptor ($f_2 - \Delta f$) y 150 MS después vuelve a su posición el circuito de tiempo “ ΔT ” (su salida vuelve a “0”) y se pone en servicio la protección.

Cuando ocurre un cortocircuito externo en la terminal “B” no opera el “DF_D”, por lo que el disparo no puede tener lugar y el transmisor local se mantiene en el modo

de guarda. En la terminal "A" opera el "DF_D", pero no puede haber disparo porque el receptor local tiene un "1" en su salida correspondiente a la frecuencia de guarda, que inhibe a la compuerta lógica "&" con entrada negada conectada a su salida. El transmisor de la terminal "A" pasa al modo de disparo del receptor, pero el "DF_D" local no está operando y por esto no ocurre el disparo.

Para cortocircuitos internos operan los "DF_D", ambos transmisores pasan al modo de disparo, en las salidas correspondientes a disparo de ambos receptores aparecen señales de "1" y de "0" en las salidas de guarda. Esa combinación de señales provoca el disparo en ambas terminales.

Este tipo de protección tiene una probabilidad de algún disparo incorrecto muy reducida, pues el disparo requiere de la operación del "DF_D" local y de la recepción de la señal de la terminal remoto. Sin embargo, la probabilidad de fallo de disparo para cortocircuitos internos es mayor que en los dos sistemas anteriores, ya que se requiere de la transmisión de una señal para el disparo.

8.7.4 PILOTO DE DISPARO DE SUBALCANCE.

Normalmente se utiliza con canales de hilo piloto y de microondas, y no con el de onda portadora, por su carácter de piloto de disparo. Si aplicáramos el sistema "ON-OFF", tendríamos que utilizar frecuencias diferentes en los transmisores de las distintas terminales. No se requieren detectores de falla de control de transmisión "DF_T", y los detectores de falla de disparo "DFD" deben de disponerse de modo que sus zonas de operación se traslapen sin alcanzar las terminales remotos de la línea (subalcance), en la figura 8.25 se puede apreciar este requerimiento.

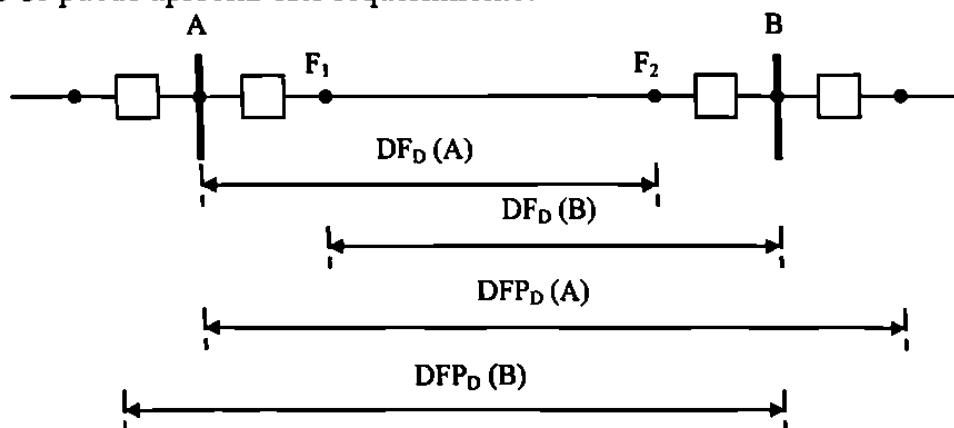


Figura 8.25 Zonas de operación de los detectores de falla.

Si la protección de tierra es direccional de sobrecorriente no se garantiza el traslape sin sobrealcance, debido a que la extensión de su zona de operación varia con el régimen del sistema; en este caso es recomendable utilizar protecciones de distancia contra cortocircuitos a tierra.

Existen dos variantes de este tipo de protección:

- Protección no permisiva (figura 8.26)

En cortocircuitos externos no opera ningún “DF_D” ni se pone en funcionamiento ningún transmisor, por lo que no existe el disparo. Para cortocircuitos internos en la zona central de la línea (punto “F₁” figura 8.21) operan los “DF_D” y se ponen en funcionamiento los transmisores, hay una señal de salida en los receptores, y por las dos razones se origina el disparo en ambas terminales. Para cortocircuitos internos cercanos a una terminal (punto “F₂” figura 8.21) el “DFD” de esa terminal opera, originando el disparo de su interruptor y pone en funcionamiento su transmisor, y mientras en la otra terminal se recibe esa señal y se origina el disparo. Esta variante tiene una gran probabilidad de operación incorrecta por cualquier ruido que se genere en el canal o problemas en el receptor, pues la sola recepción de la señal es una condición de disparo.

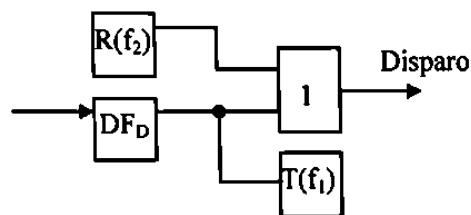


Figura 8.26 Diagrama esquemático protección piloto de subalcance no permisiva

- Protección permisiva (figura 8.27)

El problema que presenta la protección no permisible, se resuelve con este tipo de protección, en la cual se añaden detectores de falla permisivos “DF_P”, cuyas zonas de operación son de sobrealcance (ver figura 8.25) se emplean los relevadores de distancia de segunda zona para esta finalidad. En la protección permisiva el detector de falla de disparo “DF_D” puede originar el disparo directamente, pero no puede

hacerlo la señal de disparo recibida a través del canal; en este caso además de la recepción de la señal, debe de haber operación del “DF_P” local para que se origine el disparo.

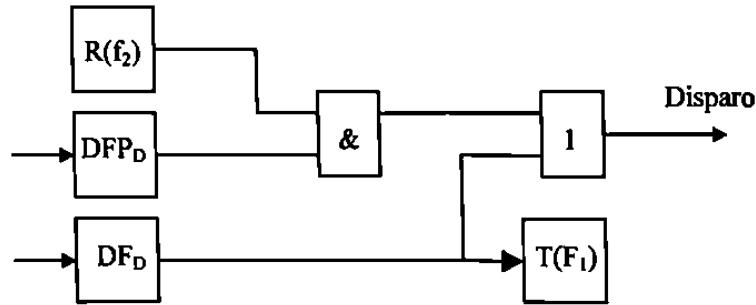


Figura 8.27 Diagrama esquemático protección piloto de subalcanse permisiva.

Como la protección piloto de disparo de subalcanse se basa en “DF_D” que no responden a cortocircuitos externos, no se requiere el pequeño retardo de alrededor de 10 MS en la señal de disparo. Esto hace que su esquema sea algo más simple y su operación algo más rápida, pero sigue confrontando el problema de tener cierta probabilidad de falla en el disparo para cortocircuitos internos por ser piloto de disparo.

8.7.5 VENTAJAS.

En comparación con la protección piloto por comparación de fase, la protección piloto por comparación direccional tiene las siguientes ventajas:

1. Tiene mayor velocidad de operación (tiempos inferiores a 20 MS)
2. Es más adecuada para la protección de líneas con derivaciones, y en general, de redes con cualquier configuración.
3. Tiene mayor flexibilidad para admitir cambios en el sistema, incluyendo la adición de cargas en derivación de las líneas.
4. Tiene mayor sensibilidad, ya que no confronta problemas de discriminación entre las corrientes de carga y de cortocircuito.
5. Impone menores requerimientos al canal de comunicación.

8.7.6 DESVENTAJAS.

1. La protección piloto por comparación direccional por utilizar detectores de falla de tipos direccional o de distancia requiere de transformadores de potencial.
2. Puede ser afectada por regímenes asimétricos de la línea protegida o por la inducción mutua entre líneas.
3. Tiene limitaciones para su aplicación a líneas largas con compensación serie capacitiva.
4. Puede operar incorrectamente por oscilaciones de potencia y pérdidas de sincronismo.

8.8 PILOTO POR COMPARACIÓN COMBINADA DE FASE Y DIRECCIONAL.

En este esquema se hace la combinación de los principios de la comparación de fase y la direccional, utilizando un solo canal de comunicación, con lo que se tratan de retener las ventajas de ambos principios. En la comparación de fase se utiliza secuencia negativa pura o secuencia cero pura, y en la comparación direccional se utilizan dos detectores de falla (relevadores tipo “Mho”); uno de ellos opera para fallas en la dirección de la línea protegida, y realiza la función de disparo, mientras el otro opera para falla en a dirección contraria, y realiza la función de boqueo. En la figura 8.28 se muestra un diagrama esquemático de esta protección, en la variante “ON-OFF” de bloqueo.

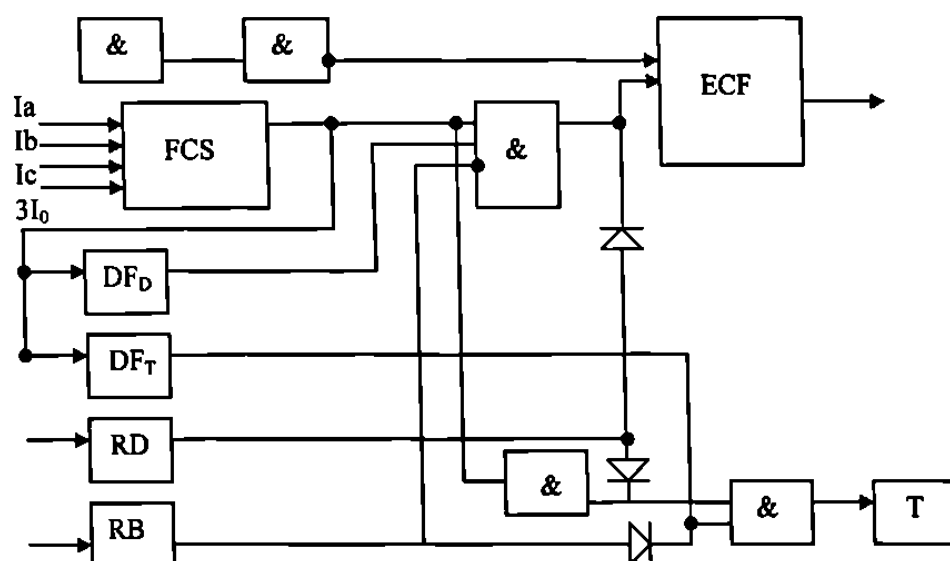


Figura 8.28 Protección piloto por comparación combinada de fase y direccional.

Al combinarse ambos principios, para la comparación de fase no se requiere la componente de corriente de secuencia positiva, pues la comparación direccional puede cubrir aquellos cortocircuitos que no se detectan por comparación de fase. Esto tiene la ventaja de que la corriente de carga no afecta la protección, y no existen problemas de sensibilidad. El esquema de la figura 8.28 tiene una modificación, ya que se añaden detectores de falla (relevadores de tipo “Mho”) de disparo “RD” y de bloqueo “RB”.

Si no existieran estos detectores, el esquema funcionaría como comparación de fase de media onda de bloqueo. Por otra parte, si se supone que en el esquema no existe salida en el filtro combinado de secuencia “FCS”, su operación se basa en el principio de la comparación direccional; para cortocircuitos internos el detector “RD” de cada terminal opera, hace que se detenga la transmisión de señal, y coloca un “1” a la entrada del “ECF”; como no existe una señal recibida, en la otra entrada del “ECF” también tiene un “1”. El “ECF” responde a esta condición como si en su entrada hubiera dos señales de corriente alterna en fase, y operara. El resultado de que ocurre el disparo instantáneo de ambas terminales.

Para cortocircuitos externos, en la terminal cercana al cortocircuito opera “RB” y no lo hace “RD” con lo que se bloquea el disparo local y se inicia la transmisión de una señal continua de bloqueo, que impide el disparo en la terminal remoto.

Para la operación conjunta del esquema está previsto que tenga preferencia la comparación direccional sobre la comparación de fase. Cuando opera el detector “RD” se detiene la transmisión y se prepara para operar el “ECF” independientemente de las señales de salida que haya en “FCS” y “DF_D”. Por otra parte, cuando opera “RB” (cortocircuitos externos) se pone al transmisor a genera una señal continua de bloqueo, y se impide que la señal de salida de “FCS” detenga esa transmisión cada medio ciclo; se evita también que las señales de salida del “FCS” y del “DF_D” influyan sobre la señal que llega al “ECF”.

Para un cortocircuito externo cercano a una de las terminales de la línea, opera “RB” e inicia la transmisión de una señal continua de bloqueo; en la terminal lejana opera “RD”, pero el disparo es bloqueado por la señal continua que se está recibiendo. Si se permite que el “FCS” de la terminal cercana al cortocircuito detenga la transmisión de la señal cada medio ciclo, ocurrirá el disparo incorrecto de la terminal lejana durante el

medio ciclo en que falta la señal de bloqueo, estando presente un "1" continuo e la otra entrada del "ECF".

9

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

9.1 CONCLUSIONES.

Este trabajo sobre la protección de sistemas eléctricos de potencia por relevadores representa los temas fundamentales y abarca los principios generales de las diferentes protecciones, sus conexiones y los principios de operación de los relevadores. Su principal objetivo es exponer en forma simplificada los conceptos fundamentales.

Los temas se presentan en una forma clara y comprensible, de tal manera que lo puede utilizar gente familiarizada con el área de protecciones, como gente que inicie su estudio en esta área así mismo, estudiantes de licenciatura, tanto gente de postergado.

Por su forma constructiva, los relevadores pueden subdividirse en electromecánicos y estáticos. Estos últimos se pueden definir como los que no tienen elementos móviles. A pesar de lo anterior, en los relevadores estáticos se utilizan los relevadores estáticos se utilizan los relevadores electromecánicos en forma auxiliar.

El desarrollo de los relevadores es un indicador de los avances tecnológicos en la electromecánica y electrónica. Los relevadores electromecánicos nacieron a principio del presente siglo, ante las necesidades de los sistemas electrónicos de potencia de aquella época. En 1901 aparecen los relevadores de sobrecorriente de inducción; en 1905-1908 inician su etapa los relevadores diferenciales de corriente; en 1910 principia la aplicación de los relevadores direccionales; de 1921 a 1937 se vuelve realidad el desarrollo de los relevadores de distancia.

Los relevadores electromagnéticos juegan un papel muy importante en los sistemas de protección para sistemas de potencia.

Estos relevadores son los más utilizados en los sistemas de protección; sus diferentes curvas características tiempo-corriente hacen posible una fácil coordinación con otros mecanismos de protección. Los relevadores electromagnéticos en la actualidad tienden a ser sustituidos por los relevadores de estado sólido, pero estos tienen ciertas desventajas ante los electromagnéticos, las condiciones ambientales tales como temperatura, húmeda, y polvo influyen en el óptimo funcionamiento de estos relevadores.

Después de analizar las diferentes formas de funcionamiento de los relevadores electromagnéticos se tiene una visión general en cuanto a la acertada aplicación de estos sistemas de protección de sistemas de potencia.

El desarrollo de los relevadores estáticos también ha pasado por tres fases en su forma constructiva, de los cuales podemos mencionar: que la técnica de la protección digital de los sistemas eléctricos de potencia surgió a finales de la década 1960-1970, esta técnica está hoy en día consolidada con la aplicación de los microprocesadores.

Por todo lo anterior expuesto podemos concluir que:

Los relevadores estáticos han experimentado un desarrollo acelerado en los últimos años y han venido desplazando a los analógicos en la mayoría de sus aplicaciones, pero para que esto suceda por completo, le tomará bastante tiempo reemplazar a todos los electromecánicos, de tal manera que las futuras generaciones tendrán que enfrentarse a los tipos de relevadores, por lo tanto la información que se presenta en este trabajo resulta ser básica en el estudio de la protección de sistemas eléctricos de potencia por medio de relevadores.

9.2 RECOMENDACIONES

Los Sistemas Eléctricos deberán ser protegidos contra cualquiera de las causas que originan funcionamientos anormales.

Asegurando un suministro de Potencia Eléctrica de calidad para sus usuarios, y de uso confiable. La Protección de los Sistemas Eléctricos se logra utilizando un conjunto

de elementos con características indispensables para lograr resultados eficientes, como lo son:

- La Capacidad Interruptiva de sus interruptores.
- Elementos de Desconexión rápida.
- Precisión en sus aparatos de medición.
- CD en Fuentes Auxiliares de Alimentación.

BIBLIOGRAFIA

1. Altuve Ferrer H. Protección de Sistemas Eléctricos de Potencia. CENACE C.F.E. 1ª Edición. 1994.
2. Altuve Ferrer H.. Memoria Curso Tutorial Introducción a los Relevadores y Sistemas Digitales de Protección. F.I.M.E.-U.A.N.L. 1ª Edición. 1995.
3. C.F.E. Auxiliar Técnico en Protecciones de Distribución. Centro de Capacitación Celaya. C.F.E. México. 1989*.
4. C.F.E. Esquemas de Protección Eléctrica. Centro Editorial de la C.F.E. México 1981*.
5. C.F.E. – U.A.N.L. Memoria Técnica – II Simposium Iberoamericano sobre Protección de Sistemas Eléctricos de Potencia. C.F.E. – U.A.N.L. 1ª Edición. 1994.
6. Enríquez Harper Gilberto. Fundamentos de Protección de Sistemas Eléctricos por Relevadores. LIMUSA. 1ª Edición. 1981*.
7. I.E.E.E. Recommended Practice for Protection and Coordination of Industrial And Commercial Power Systems. I.E.E.E. 1ª Edición. 1975*.
8. Ravindranath B., Chander M. Protección de Sistemas de Potencia e Interruptores. LIMUSA. 1ª Edición. 1980*.
9. Russell Mason C. El Arte y la Ciencia de la Protección por Relevadores. C.E.C.S.A. 7ª Edición. 1979*.

* Literatura clásica.

LISTADO DE TABLAS

| | |
|--|----|
| Tabla 1 Fallas en los diferentes elementos de un sistema de potencia | 17 |
| Tabla 2 Tipos de falla y el porcentaje en que se presentan | 18 |

LISTADO DE FIGURAS

| Figura | Página |
|--|---------------|
| 2.1 Elementos que integran un relevador | 16 |
| 2.2 Limites de sobrecarga | 19 |
| 2.3 Diagrama de flujo del sistema de protección | 21 |
| 2.4 Secuencia lógica de la señal del relevador | 22 |
| 2.5 Esquema de un transformador de corriente | 23 |
| 3.1 Zonas de protección en un sistema típico de potencia | 27 |
| 3.2 Principio de la protección doble de un interruptor | 28 |
| 3.3 Conexiones típicas de C.A. relevadores de protección | 30 |
| 3.4 Diagrama de control del circuito de disparo | 32 |
| 3.5 Relevadores de apertura de circuito | 32 |
| 3.6 Esquema circuito de control para un interruptor | 33 |
| 3.7 Diagrama unifilar de respaldo local | 49 |
| 3.8 Diagrama unifilar de respaldo remoto | 50 |
| 3.9 Diagrama unifilar zonas de detección | 51 |
| 3.10 Diagrama unifilar de punto de falla tipo R | 52 |
| 3.11 Falla de respaldo local | 53 |
| 3.12 Falla de respaldo remoto | 54 |
| 4.1 Estructuras de relevador de atracción electromagnética | 58 |
| 4.2 Una placa de material de aluminio con fuerzas de atracción | 59 |
| 4.3 Esquema de disco de inducción con bobina magnética | 61 |
| 4.4 Esquema de un relevador de sobrecorriente | 62 |
| 4.5 Esquema de un relevador con dos bobinas | 62 |
| 4.6 Relevador de copa | 63 |

| | |
|--|-----|
| 5.1 Diagrama vectorial para el par máximo | 79 |
| 5.2 Característica de funcionamiento de un relevador direccional | 80 |
| 5.3 Diagrama de flujos de corriente en relevador diferencial normal | 81 |
| 5.4 Diagrama de flujos de corrientes en relevador diferencial con falla | 81 |
| 5.5 Diagrama de flujos de corriente bobina restrictora | 82 |
| 6.1 Funcionamiento inadecuado de los relevadores monofásicos | 96 |
| 6.2 Aplicación de la derivación de la corriente de secuencia cero | 96 |
| 6.3 Tensión de polarización de baja tensión | 97 |
| 6.4 Polarización de corriente | 98 |
| 6.5 Polarización de corriente de la delta de un TP | 99 |
| 6.6 Polarización de corriente a partir del neutro del TC conectado en estrella | 99 |
| 6.7 Carencia de protección con dos relevadores de sobrecorriente | 101 |
| 6.8 Protección completa con dos relevadores de fase y uno de tierra | 102 |
| 6.9 Curvas de funcionamiento | 105 |
| 6.10 Características de sobrealcance | 106 |
| 6.11 Localización de la falla para el ajuste de la puesta en trabajo de la protección de respaldo | 110 |
| 6.12 Tiempos de funcionamiento características de tiempo inverso | 111 |
| 6.13 Orden para el ajuste de los relevadores en un sistema de anillo | 113 |
| 7.1 Diagrama R-X elemento impedancia | 118 |
| 7.2 Diagrama R-X elemento reactancia | 119 |
| 7.3 Diagrama R-X elemento admitancia | 120 |
| 7.4 Elemento direccional (unidad Mho) tipo reactancia | 125 |
| 7.5 Cilindro de inducción (unidad "ohm") tipo reactancia | 126 |
| 7.6 Sistema de equivalente con dos fuentes enlazadas por una L.T. | 127 |
| 7.7 Red de secuencia positiva para una falla 3ϕ | 128 |
| 7.8 Redes de secuencia fase "A" para falla entre fases "B" y "C" | 129 |
| 7.9 Redes de secuencia fase "A" para falla entre fase "A" y tierra | 130 |
| 7.10 Diagrama esquemático zonas de la protección de distancia | 133 |
| 7.11 Diagramas Z-t y R-X | 135 |
| 7.12 Diagrama líneas multi-terminales | 136 |

| | |
|---|-----|
| 7.13 Diagrama línea de transmisión tres terminales | 136 |
| 7.14 Diagramas equivalente y fasorial de un sistema de potencia | 139 |
| 7.15 Efecto de la pérdida de sincronismo la impedancia de la L.T. pequeña | 142 |
| 7.16 Método para determinar la tendencia de operación durante una oscilación | 143 |
| 7.17 Efecto de la oscilación impedancia de L.T. grande | 144 |
| 7.18 Bloqueo por oscilación con una unidad mho con “offset” | 145 |
| 7.19 Característica de disparo por oscilación | 146 |
| 8.1 Fundamentación necesidad de protección piloto para una L.T. | 155 |
| 8.2 Protección y supervisión del hilo piloto y de los equipos terminales | 159 |
| 8.3 Esquema general canal de onda portadora una fase de una L.T. | 161 |
| 8.4 Protección diferencial de una fase elemento de dos terminales | 166 |
| 8.5 Protección diferencial elemento de dos terminales | 168 |
| 8.6 Diagrama esquemático de un relevador de porcentaje diferencial | 171 |
| 8.7 Diagramas fasoriales de cortocircuitos externos (a) e internos (b) | 171 |
| 8.8 Característica de operación | 172 |
| 8.9a Protección piloto de corrientes circulantes | 174 |
| 8.9b Protección piloto voltajes en oposición | 174 |
| 8.10 Diagrama esquemático protección hilo piloto de corrientes circulantes | 176 |
| 8.11 Protección piloto por comparación de fase | 178 |
| 8.12 Principio de operación por comparación de fase | 181 |
| 8.13 Comparación de fase de señales de disparo (a) y de bloqueo (b) | 182 |
| 8.14 Esquema de media onda de bloqueo (“ON-OFF”) | 184 |
| 8.15 Esquema de media onda de disparo (“ON-OFF”) | 185 |
| 8.16 Esquema de media onda de bloqueo (corrimiento de frecuencia) | 186 |
| 8.17 Esquema de media onda de disparo (corrimiento de frecuencia) | 188 |
| 8.18 Esquema de media onda de pérdida de bloqueo (corrimiento de frecuencia) | 188 |
| 8.19 Protección piloto por comparación de bloqueo fase onda completa | 191 |
| 8.20 Protección piloto por comparación direccional | 195 |
| 8.21 Zonas de operación (a) y características de operación (b) | |

| | |
|--|-----|
| detectores de falla | 196 |
| 8.22 Protección piloto de bloqueo | 197 |
| 8.23 Protección piloto de pérdida de bloqueo | 199 |
| 8.24 Protección piloto de disparo de sobrealcance | 201 |
| 8.25 Zonas de operación de los detectores de falla | 203 |
| 8.26 Diagrama esquemático protección piloto de subalcance no permisiva | 203 |
| 8.27 Diagrama esquemático protección piloto de subalcance permisiva | 204 |
| 8.28 Protección piloto por comparación combinada de fase y direccional | 206 |

GLOSARIO

| | |
|-----------|---------------------------------------|
| TC | Transformador de Corriente. |
| TP | Transformador de Potencial. |
| C.D. | Corriente Directa. |
| C.A. | Corriente Alterna. |
| D.C. | Corriente Directa. |
| A.C. | Corriente Alterna. |
| SEP | Sistema Eléctrico de Potencia. |
| Ω | Ohms. |
| Amps | Amperes. |
| β | Densidad Magnética. |
| α | Proporcional a. |
| φ | Flujo Magnético (weber). |
| Φ | Flujo Máximo (weber). |
| Z | Impedancia (ohms). |
| V | Voltaje (ohms). |
| Y | Admitancia (mhos). |
| Φ | Angulo entre magnitudes de influencia |
| ϕ | Angulo de la componente inductiva |

| | |
|---------------|---|
| τ | Angulo de par máximo. |
| N | Número de vueltas en la bobina. |
| N_1 | En el primario. |
| N_2 | En el secundario. |
| I_{nom} | Corriente nominal. |
| Hz | Hertz ó ciclos/seg. |
| ASA | Asociación Americana de Estándares. |
| ICS | Unidad de Sello. |
| 52a | Contacto auxiliar del interruptor. |
| 52x | Bobina auxiliar del interruptor. |
| 52y | Bobina de anti-bombeo auxiliar del interruptor. |
| 52c.c. | Bobina de cierre del interruptor. |
| Bus | Barras Colectoras. |
| wt | Frecuencia. |
| F | Fuerza. |
| T | Par. |
| Kv. | Kilovoltios. |
| KVA | Kilo – Volts – Amper. |
| K_1 | Constante de conversión de la fuerza. |
| K_2 | Constante de retención (incluye la fricción). |
| I_{min} | Corriente mínima. |
| G | Generador eléctrico. |
| taps | Derivaciones de la bobina. |
| $I_{pick-up}$ | Corriente de puesta en trabajo. |
| Burden | Carga. |
| Relay | Relevador. |
| I.D.T.M. | Curva Inversa con Tiempo mínimo definido. |
| T.M.S. | Ajuste multiplicador de tiempo. |
| T.L.S. | Palanca de ajuste de tiempo. |
| M.T.A. | Angulo de par máximo. |

RESUMEN AUTOBIOGRAFICO

ING. FRANCISCO JOEL OLVERA BLANCO

Candidato al grado de Maestro en Ciencias de la Ingeniería Eléctrica con especialidad en
Potencia.

Tesis: Relevadores de Protección Aplicados a las Líneas de Transmisión.

Campo de Estudio: En estudios realizados por C.F.E y el C.E.N.A.C.E.

Biografía: Nacido en Monterrey, Nuevo León, en 13 de Julio de 1972, hijo de Francisco Olvera Medina y Magdalena Blanco Morales.

Educación: Egresado de la Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica de la Universidad Autónoma de Nuevo León, con el grado de Ingeniero Mecánico Eléctrico en el año de 1996.

Experiencia Profesional: En la Escuela Industrial y Preparatoria Técnica “Alvaro Obregón” desempeñando el puesto de Maestro.

