

## PROTECCION DE DISTANCIA

### 1. Introducción

La protección de distancia funciona cuando la impedancia del circuito, o una componente de ella, varía dentro de límites predeterminados. El relé responde a la razón entre la tensión y corriente, la cual tiene la dimensión de impedancia.

A este tipo de protección se le denomina protección de distancia, dada la estrecha relación proporcional que existe entre la impedancia y la distancia en una línea de transmisión, es decir, el relé no mide distancia directamente, pero sí, la impedancia entre el relé y el punto de falla, de manera que si la impedancia por unidad de longitud de una línea es conocida, este tipo de protección puede en efecto medir la distancia a la falla siempre que esta última sea trifásica.

Los límites de operación de este tipo de relé, son expresados como impedancia o componentes de ésta (ejemplo reactancia, resistencia, admitancia y conductancia). En la mayoría de los casos, estas expresiones son ecuaciones de figuras geométricas simples, como se puede apreciar en un diagrama en el plano de impedancia (ver Fig N° 1).

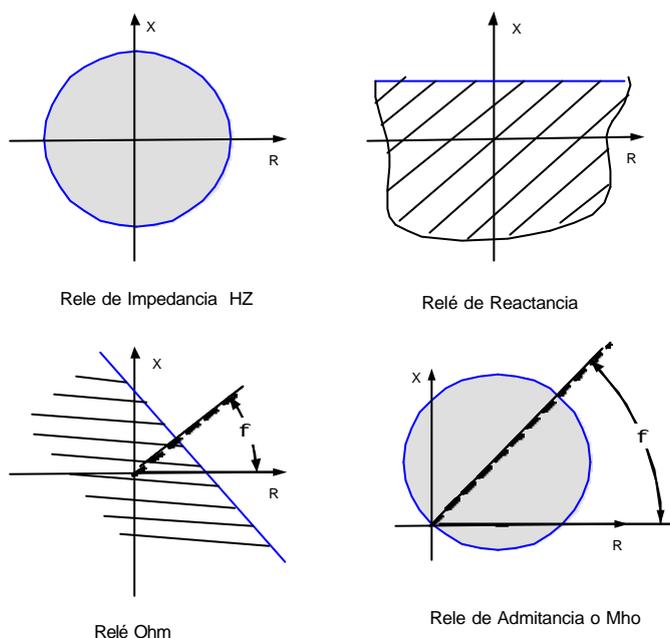


Figura N° 1 Zonas características de operación de los relés de distancia en el plano X/R

El empleo de este tipo de protección, de alta velocidad, se ha hecho cada vez más indispensable en los sistemas modernos debido a la complejidad de estos sistemas que tienen alimentación procedentes de distintas estaciones generadoras, la necesidad de lograr tiempos más breves en el aclaramiento de la falla conforme aumenta el nivel de esta, y también, por la dificultad que se presenta al graduar los relés de sobrecorriente con un número creciente de estaciones de interrupción.

Los esquemas de protección de distancia brindan, automáticamente, protección de respaldo a las secciones de líneas adyacentes. Con frecuencia, la selectividad se logra mediante una característica direccional que en algunos casos es inherente al relé de distancia mismo, o bien, la proveen relés complementarios. La discriminación o coordinación entre relé de distancia que tienen la misma respuesta direccional en líneas adyacentes, se logra mediante una graduación de los tiempos de operación, que a diferencia de la protección con relés de sobre corriente no son acumulativas conforme se avanza hacia la fuente.

Este tipo de protección es muy selectivo, discrimina entre condiciones de operación normal o falla de un sistema o parte de él, y entre fallas dentro o externas a la zona de protección. Su aplicación es simple y permanente. Estos atributos hacen del relé de distancia el medio de protección más común de detección de fallas en líneas de transmisión y subtransmisión.

Las líneas de transmisión protegidas con relés de sobrecorrientes de tiempo inverso o instantáneo, tanto como para el esquema de protección residual, presentan algunos problemas, ejemplo:

- i) Para sistemas interconectados resultan cálculos laboriosos y difíciles, ya que el punto de balance resulta variable, dado que depende de la generación conectada, líneas o bancos de transformadores en servicio, ubicación y tipo de falla.
- ii) Si se logra un ajuste, éste puede resultar con tiempo de operación muy grande e inaceptable.
- iii) El líneas donde se requiere que exista una zona de aclaramiento simultáneo de la falla, mediante la apertura de los interruptores de los extremos de la línea, lo más probable es que resulten despejes secuenciales.

En líneas de transmisión de sistema interconectados, se requiere que la zona de despeje simultáneo sea lo más grande posible. La solución a este problema es usar relés de distancia ya que su punto de balance o alcance es independiente de la generación conectada.

## 2. Principio de Funcionamiento de Relé de Distancia

En la figura 2 se muestra un esquema simple de la medición de la impedancia de la línea hasta el punto de falla. La cantidad de operación será la corriente  $I_r$  y la cantidad de retención sería la tensión  $V_r$  es decir:

$$V_r (\text{volts primarios}) = Z_F (\Omega \text{ primarios}) \times I_r (\text{Amp. primarios})$$

$$V_r (\text{volts secundarios}) = (C_V / C_I) Z_F (\mathbf{W} \text{ primarios}) \times I_r (\text{Amp. secundario})$$

$$V_r (\text{volts secundarios}) = Z_r (\mathbf{W} \text{ secundarios}) \times I_r (\text{Amp. secundarios})$$

Donde:

$Z_F$  : es la impedancia de la línea medida por el relé desde su ubicación hasta el punto de falla  
 $C_V$  y  $C_I$  : constantes de transformación de los transformadores de potencial y corriente, respectivamente.

$V_r, I_r$  : tensión de corriente secundaria medidas por el relé.

$Z_r = V_r / I_r$  : impedancia (en ohms secundarios) medida por el relé.

$Z_F$  : impedancia de falla, en ohms primarios.

Por lo tanto:

$$Z_r (\text{ohms secundarios}) = (C_V / C_I) Z_F (\text{ohms primarios})$$



Las unidades de medida de impedancia no pueden ser calibradas para brindar protección al 100% de la línea, esto no es posible en la práctica por las siguientes razones:

- i) Errores de Medida:
  - Debido a la transposición insuficiente de los conductores de la línea.
  - Errores introducidos por los transformadores de medición en condiciones de trabajo transitorio.
  - Influencia de la temperatura; una variación de 10°C produce aproximadamente, una variación de un 4% en la resistencia del conductor y un 5% en el alcance de un relé.
- ii) Influencia de la resistencia de falla.
- iii) Variación del tipo de cortocircuito durante la falla.
- iv) Cortocircuito entre fases de líneas de doble circuito (ejemplo, cortocircuito entre la fase "a" del circuito 1, con la fase "b" del circuito 2).
- v) Variación de la configuración del sistema.
- vi) Por transitorios y errores de calibración del relé.

Todas estas razones obligan a ajustar los elementos de medida de cada relé de distancia, con los siguientes alcances:

#### Primera Zona de Protección.

$$Z_{r1} = \text{de un 80\% a un 90\% de } Z_{L1} \text{ en ohms secundarios.}$$

Si la impedancia de la línea ha sido determinada mediante medición se puede usar 90% de  $Z_{L1}$ , o en caso contrario, si ha sido calculada, es recomendable usar sólo un 80%.

#### Segunda Zona de Protección

$$Z_{r2} = Z_{L1} + 0.5 Z_{L2} \text{ en ohms secundarios}$$

#### Tercera Zona de Protección

$$Z_{r3} = Z_{L1} + Z_{L2} + 0.25 Z_{L3} \text{ en ohms secundarios}$$

A estos valores límites de impedancia, o distancia correspondientes por zona, se les denominan "*alcances o impedancia límites del relé*" o "*puntos de equilibrio*".

En resumen, el término "*alcance*" se refiere a qué tan lejos, con respecto al extremo de ubicación del relé en la línea de transmisión protegida, puede responder el relé a las fallas.

#### - Sobrealcance y Subalcance de un Relé de Distancia

Estos relés tienen la tendencia a operar con impedancias mayores que la de su valor de calibración o límite, es lo que se denomina sobrealcance, del mismo modo, la tendencia a no operar con valores de impedancia menores que el valor de calibración, se conoce como subalcance.

El desplazamiento de la señal de corriente de falla debido a su componente unidireccional (d.c.) es una de las causas importantes de sobrealcances, ya que la corriente asimétrica de falla tiene un máximo mayor que el de la corriente de falla simétrica, que es con la que se ajusta el relé.

El sobrealcance transitorio se define como:

$$S.A.T (\%) = \frac{Z_{os} - Z_{sy}}{Z_{sy}}$$

Donde:

$Z_{os}$  : es la impedancia máxima para la cual opera el relé con una corriente desfasado y un ajuste dado.

$Z_{sy}$  : es la impedancia máxima para la cual opera el relé con corriente simétrica y el mismo ajuste que para  $Z_{os}$

El subalcance es provocado principalmente por la influencia de la resistencia de falla; de la resistencia de arco principalmente.

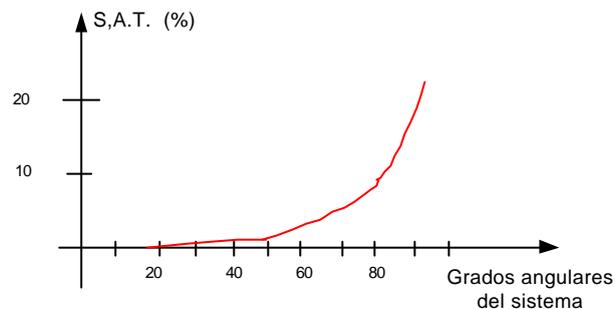


Figura N° 4 Característica de sobrealcance

En la figura 5 se muestra un relé ubicado en el origen (“0”) de una línea cuya impedancia total es  $Z_L$ , y está ajustado para proteger la línea hasta “0C”. Suponiendo que ocurre una falla en P (a una distancia OP), y que la resistencia de falla (“PP’”), sea de un valor significativo, de manera que, sumada a OP resulte que la impedancia neta vista ( $Z_r = OP'$ ) por el relé sea mayor que su impedancia de ajuste, resultará entonces de una falla ocurrida en primera zona se aislará como si estuviese localizada en segunda o tercera zona. (subalcance).

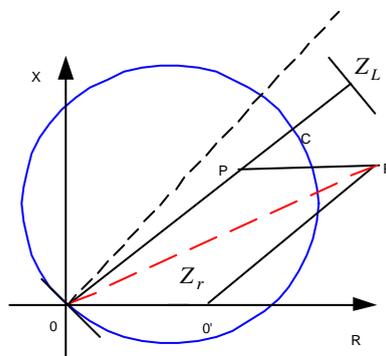


Figura N°5.- Subalcance debido a la resistencia de falla

- Resistencia de la Falla.

La resistencia de falla está formada por la resistencia del arco y la resistencia de la tierra.

Se puede tener un valor aproximado de la resistencia de arco, mediante las siguientes expresiones:

Según Warrington  $R_{arco} = \frac{2.9 \cdot 10^4 \cdot L}{I^{1.4}}$  (ohms)

según URSS :  $R_{arco} = 1050 \frac{L}{I}$  (ohms)

para unidades instantáneos  $R_{arco} = 50 \frac{KV}{I}$  (ohms) (1ª zona)

para unidades con retardo  $R_{arco} = \frac{50 (KV + 47 \cdot vt)}{I}$  (2ª y 3ª zona)

Donde:

- $L$  = longitud del arco en (mt)
- $I$  = corriente de falla en (A)
- KV = Tensión nominal del sistema (KV) (línea a línea)
- $v$  = velocidad del viento (Km/horas)
- $t$  = tiempo de calibración de la protección (seg)

Para la zona en la que es instantáneo el disparo, el efecto de la resistencia de arco es pequeña y es posible despreciarlo; excepto en líneas muy cortas. En líneas de altas tensiones el efecto de esta resistencia se puede despreciar.

### 3. Efecto de la Relación entre la Impedancia de Fuente y la Impedancia de la Línea.

La figura 6 es un diagrama unilineal de una línea y su circuito equivalente, donde  $Z_S$  es la impedancia existente desde la fuente al punto de ubicación del relé, y  $Z_L$  es la impedancia de la línea.

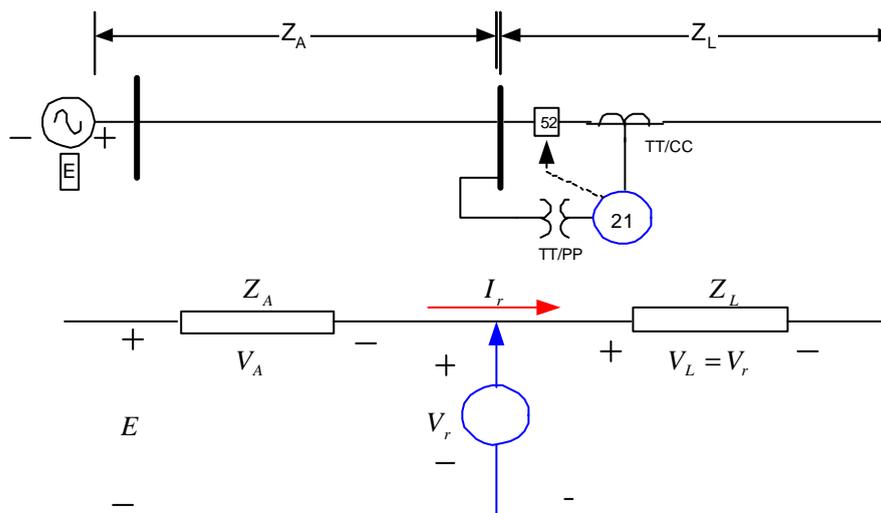


Figura N°6. Diagrama unilineal de un sistema y sus circuito equivalente

$$V_r = V_L = I_r Z_L$$

pero 
$$I_r = \frac{E}{Z_A + Z_L}$$

por lo tanto: 
$$V_r = \frac{E Z_L}{Z_A + Z_L} \Rightarrow \frac{V_r}{E} = \frac{I}{I + \frac{Z_A}{Z_L}}$$

Normalmente  $V_r$  debe tener un valor mayor que el prefijado de  $V_r = I_r Z_L$  para que retenga y el relé no opere, para que opere debe tener un valor inferior a éste.

Esta última ecuación es válida para todo tipo de falla, siempre cuando se consideran las siguientes reglas: (ver fig. 7)

- i) Para fallas de fase,  $E_D$  es la tensión entre fases y  $Z_A / Z_L$  es la relación entre las impedancias de secuencias positivas:

$$\frac{V_r}{E_D} = \frac{I}{I + \frac{Z_{A1}}{Z_{L1}}}$$

- ii) Para fallas a tierra,  $E_I$  es la tensión de fase a neutro y  $Z_A / Z_L$  es una razón compuesta de impedancias de secuencias positivas y secuencia cero:

$$\frac{V_r}{E_I} = \frac{I}{I + \frac{2Z_{A1} + Z_{A0}}{2Z_{L1} + Z_{L0}}}$$

donde: 
$$E_I = \frac{E_D}{\sqrt{3}}$$

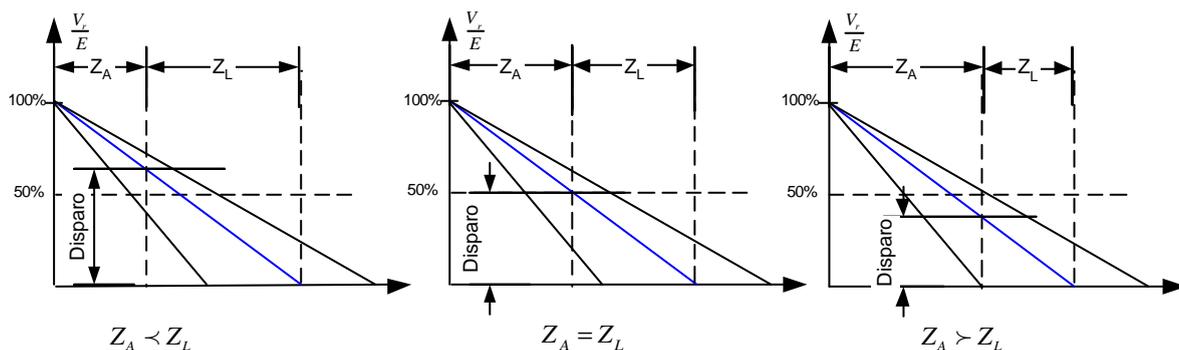


Figura N° 7 Efecto de la relación  $Z_A / Z_L$

#### 4. Relé de Impedancia

Este tipo de relés funciona con comparadores de magnitud y no tiene características direccionales inherentes, por lo que es necesario que se incluya una unidad direccional (D) (Figura.Nº.8.)

Por otra parte el ángulo de diseño  $f$  del relé, con el cual se logra torque máximo, es común hacerlo más pequeño que el ángulo  $\tilde{E}$  de la línea protegida; también en el caso de relés estáticos, el ángulo máximo de la sensibilidad de éste se hace menor que  $\tilde{E}$  para reducir el efecto de la resistencia del arco sobre el alcance del relé.

El elemento de la tercera zona  $Z_3$  controla la operación del relé de tiempo (T) y, en consecuencia, funciona como la unidad de partida. Según el circuito de control, las unidades de zonas actúan en forma instantáneas, pero, las señales de la zonas 2 y 3, actúan después de un retardo  $T_2$  y  $T_3$ , respectivamente.

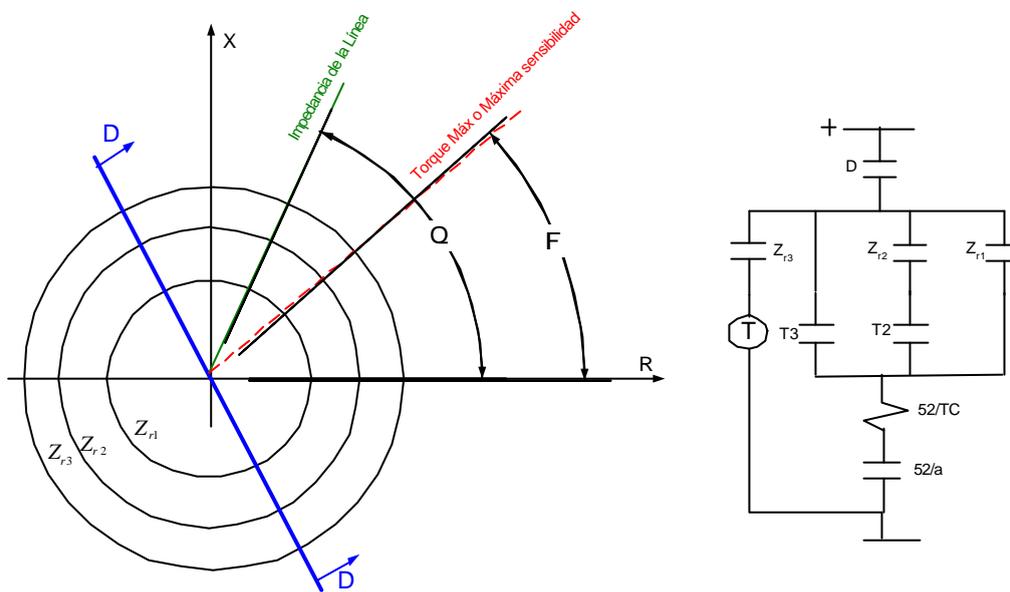


Figura Nº8.- Diagrama X/R de zonas de operación y circuito de control de un relé de Impedancia

#### - Relé de Impedancia Modificada

Este tipo de relé es como el recientemente analizado, excepto que las características de operación de las unidades de impedancias están desplazadas. Este desplazamiento se logra inyectado una tensión adicional en el circuito de retención por tensión, proporcional a la corriente (figura Nº9)

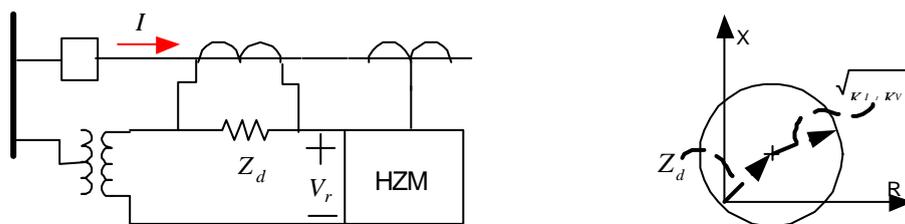


Figura Nº9 Rele de distancia HZ modificado

- **Efecto de Corrientes Intermedias en la Operación de los Relés de Impedancia.**  
Suponiendo que los relés se han ajustado para un alcance dado por:

$$Z_{relé 2} = |Z_A + 0.5 Z_B| \quad (\text{valor de calibración para la 2a zona})$$

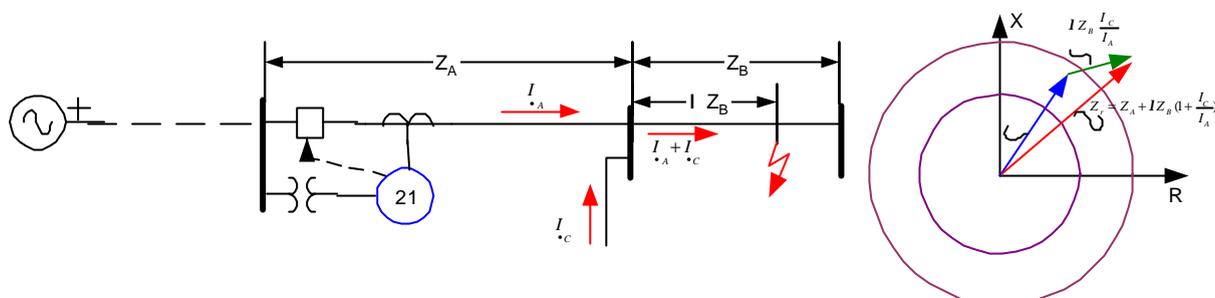


Figura N°9 Efecto de las corrientes intermedias en los relés de distancia

Pero, calcula una corriente intermedia ( $I_C$ ) de impedancia vista por el relé será:

$$Z_r = \left| Z_A + \mathbf{I} Z_B + \mathbf{I} Z_B \left( \frac{I_C}{I_A} \right) \right|$$

Luego,  $Z_R > Z_{relé 2}$ , este efecto se le denomina “impedancia mutua”. Puede que  $Z_R \gg Z_{relé 2} < Z_{relé 3}$  y no opere.

### 5. Relé de Admitancia

Este tipo de relé cuenta con tres elementos de mho, o elementos de admitancia y un contador de tiempo (timer) para proteger tres zonas en forma similar a los relés de impedancia.

En muchos países se prefiere usar relés de admitancia en esquemas de protección de distancia debido principalmente a que estos aparatos son inherentemente direccionales y no se necesitan de elementos de este tipo como lo requieren los relés de impedancia; otra característica que los hacen preferidos, es que tienen menos área de operación en el plano de impedancia que cualquier otro relé de distancia, luego tienen un mejor comportamiento que ningún otro relé durante las oscilaciones de potencia de falla.

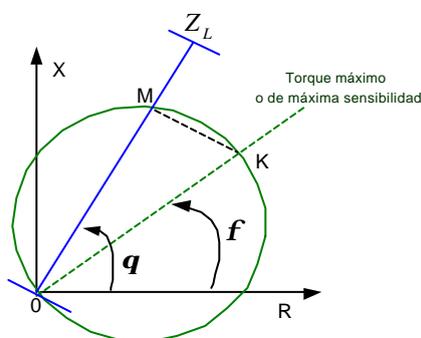


Figura N°10 Característica de unidad de Admitancia

En la figura N°10 se muestra la característica de operación, se ha supuesto que  $f < q$ , con el fin de obtener un buen comportamiento ante la presencia de impedancia de falla ( : ángulo de fase del relé,  $\delta$  : ángulo característico de la impedancia característica de la línea)

$$\text{Donde: } OK = \frac{OM}{\cos(q-f)} = \frac{0.85 Z_L}{\cos(q-f)}$$

La unidad mho de la tercera zona, que actúa como relé de partida o para controlar el contador de tiempo, también se puede reemplazar por una unidad Mho desplazada. Tiene la ventaja que puede respaldar la línea correspondiente, y además, proteger una pequeña porción de la línea y barra en dirección inversa (figura .N°11)

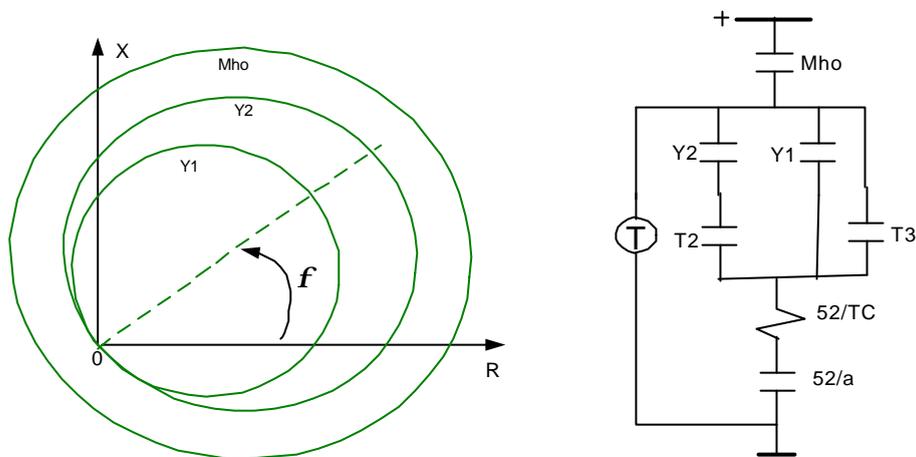
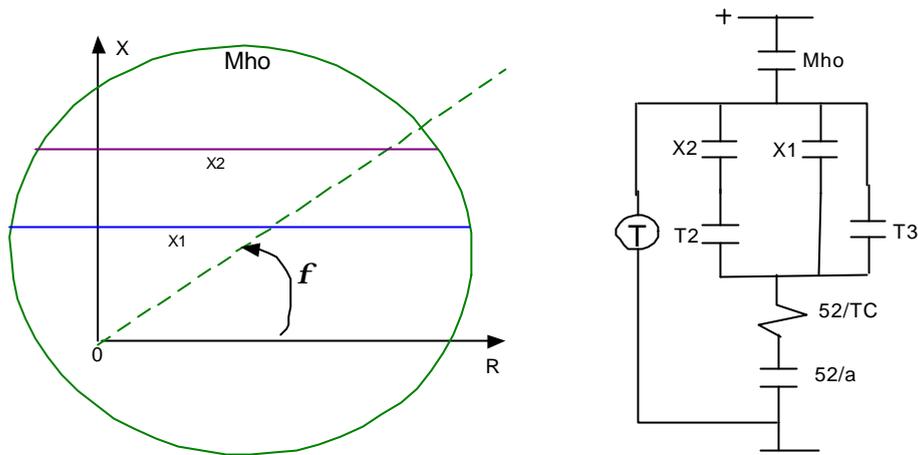


Figura N°11 Relé de Admitancia y su diagrama de control

## 6. Relé de Reactancia

Del mismo modo que los relés de impedancia, éstos son también comparadores de magnitud y necesitan por lo tanto, de una unidad direccional adicional. La figura N°12 muestra la característica para las tres zonas de protección; ésta se logra con dos unidades de reactancia y una unidad mho o de partida. Esta última actúa como unidad direccional, como unidad de partida, como unidad de protección de la tercera zona, y por último, también tiene la misión de impedir que las unidades de reactancia operen para corrientes normales de carga.



Figur N°12 Relé de reactancia con unidad de partida Mho y su circuito de control

### 7. Corriente y Tensiones de Alimentación a los Relés de Distancia

Es de gran importancia que los esquemas de protección de distancia midan, siempre que sea la condición de falla, la misma distancia entre el punto de falla y la ubicación del relé. Es posible que mediante una adecuada elección de las conexiones de las tensiones y corrientes de alimentación a los relés, éstos siempre midan  $Z_1$ , es decir, la impedancia de secuencia positiva de la línea protegida.

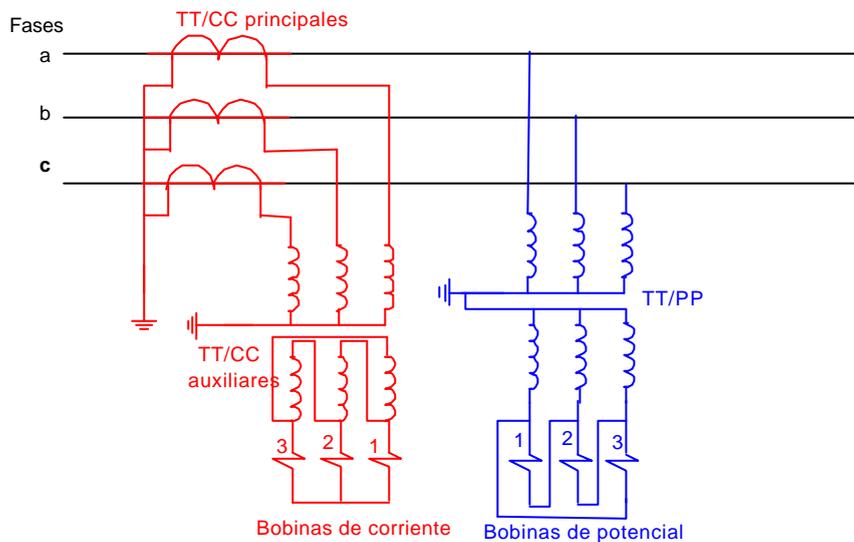


Figura N° 13.- Alimentación estándar de relés de distancia

i) alimentación de tensiones y corrientes para la protección de fallas de fases.

De manera de obtener una operación correcta para fallas trifásicas, bifásicas y bifásicas a tierra, en cuanto a la impedancia vista, los relés de distancia se alimentan con tensiones y corrientes en conexión delta (figura N° 13)

Relé 1.  $V_b - V_c$  y  $I_b - I_c$

Relé 2.  $V_b - V_a$  y  $I_C - I_a$

Relé 3.  $V_a - V_b$  y  $I_a - I_b$

En cada extremo de la línea se ubican tres relés de distancia, luego, nueve elementos comparadores ya que hay tres de estos elementos por cada relé.

La impedancia vista por cada relé será:

$$Relé 1 Z_{relé1} = K \frac{V_b - V_c}{I_b - I_c} = K \frac{V_{a1} - V_{a2}}{I_{a1} - I_{a2}}$$

$$Relé 2 Z_{relé2} = K \frac{V_c - V_a}{I_c - I_a} = K \frac{aV_{a1} - V_{a2}}{aI_{r1} - I_{a2}}$$

$$Relé 3 Z_{relé3} = K \frac{V_a - V_b}{I_a - I_b} = K \frac{V_{a1} - aV_{a2}}{I_{a1} - aI_{a2}}$$

Donde:  $K = \frac{C_I}{C_V} = \frac{I}{5} \times \frac{110}{V}$

ii) Alimentación de tensiones y corrientes para la protección de fallas monofásicas a tierra.

Para que el relé mida de nuevo la misma impedancia  $Z_1$ , bajo las condiciones de falla monofásicas a tierra en un sistema general, es necesario agregar a la corriente de fase a neutro una proporción de la corriente residual que pasa por el punto de ubicación del relé. A esta conexión, mostrada en la figura ..... se le conoce como "compensación residual" y en la práctica se logra por medio de un autotransformador de varios terminales, instalado en el circuito residual de los transformadores de corrientes principales.

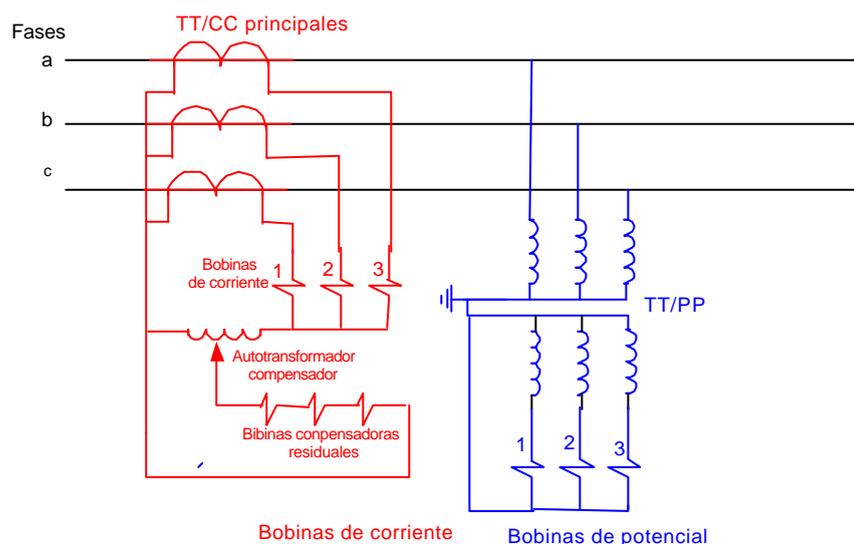
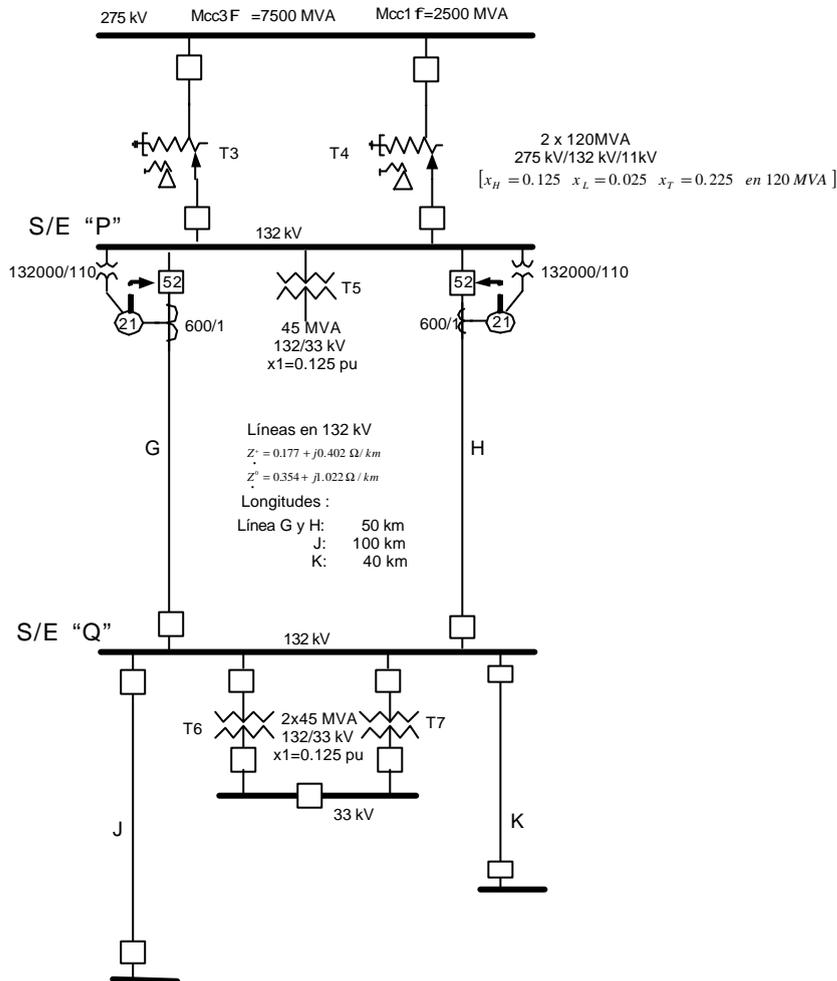


Figura Nº 14.- Alimentación con Compensador Residual

**Problema Ejemplo:**



**SOLUCIÓN:**

a.- Compensación Residual: 
$$K_N = \frac{1}{3} \left( \frac{Z_0}{Z_1} - 1 \right) = \frac{1}{3} \left( \frac{0.354 + j1.022}{0.177 + j0.402} - 1 \right) = 0.49 \angle 7.8^\circ$$

b.- Angulo característico del relé:

de la línea: 
$$\mathbf{j}_F + \mathbf{j}_N = 66.2^\circ + 7.8^\circ = 74^\circ$$

debe cumplirse que: 
$$\mathbf{j}_F + \mathbf{j}_N \approx \mathbf{j}_R$$

el relé tiene: 
$$45^\circ \leq \mathbf{j}_R \leq 80^\circ \text{ con } \mathbf{Dj}_R = 5^\circ$$

por lo tanto: 
$$70^\circ < \mathbf{j}_R < 75^\circ$$

c.- Alcance de la Zona I (80% de la primera  $Z_{LI}$ )

$$Z_{LIG} = (0.177 + j0.4029) 50 = 8.85 + j20.1 \mathbf{W}_{prim}$$

Impedancia de calibración para la primera zona:

$$Z_I = \frac{80}{100} (8.85 + j20.1) \frac{110}{132000} \frac{600}{1} = 3.54 + j8.04 = 8.78 \angle 66.24^\circ \mathbf{W}_{sec}$$

d.- Alcance de la Zona II (  $Z_{LI}$  mas 50% de la línea adyacente más corta )

La línea adyacente mas corta en este caso es la línea “K”, de solo 40 km.

$$Z_{LIG} + 0.5 Z_{LIK} = 8.85 + j20.1 + \frac{50}{100} 40 (0.177 + j0.402) = 12.39 + j28.14 \quad \mathbf{W}_{prim}$$

Impedancia de calibración para la segunda zona:

$$Z_{II} = (12.39 + j28.14) \frac{600 \cdot 110}{132000} = 6.20 + j14.07 = 15.37 \angle 66.2^\circ \quad \mathbf{W}_{sec}$$

e) Efecto de la línea paralela (Efecto de Corriente Intermedia)

Cuando ambas líneas (G y H) están en servicio, ocurre un subalcance para las fallas en las zonas II y III; que puede ser calculada como:

$$\text{Subalcance} = \left( \begin{array}{l} \text{Impedancia de la} \\ \text{línea adyacente incluida} \\ \text{en la Zona II} \end{array} \right) \times \frac{I_F \text{ vista por el relé}}{I_{Ftotal}}$$

$$\% \text{ de alcance} = \frac{\text{Subalcance}}{\text{alcance de la Zona protegida}} 100$$

Impedancia de la segunda línea:  $(0.177 + j0.402) 40 = 7.08 + j16.08 \quad \mathbf{W}_{prim}$

Sección de la segunda línea incluida en la protección de la segunda zona:

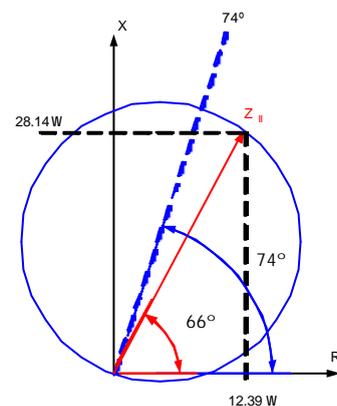
$$(7.08 + j16.08) \frac{50}{100} = 3.54 + j8.04 = 8.78 \angle 66.24^\circ \quad \mathbf{W}_{prim}$$

Cálculo del subalcance:  $\text{Subalc} = 8.78 \frac{1}{2} = 4.39 \quad \mathbf{W}_{prim}$  (como en este caso las líneas (G y H) están en paralelo y son iguales, el relé ve la mitad de la corriente de falla).

El alcance de la unidad Mho (o admitancia) en segunda zona es de:

$$12.39 + j28.14 = 30.74 \angle 66.2^\circ \quad \mathbf{W}_{prim}$$

Por consiguiente, el subalcance porcentual es de:  $\frac{4.39}{30.74} 100 = 14.28\%$



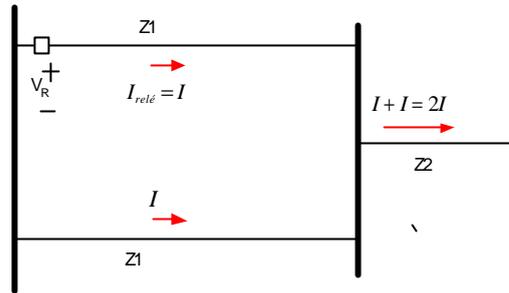
f) Calibración de los tiempos de operación.

Tiempo para la primera Zona → instantáneo

Tiempo para la segunda Zona →  $t_{52-Zonal} + \mathbf{D} \approx 0.2 \text{ a } 0.3 \text{ seg}$

g) Alcance de la Zona III ( en general es de 20 a 25% de la tercera zona)

Debido a la línea paralela, que altera la impedancia vista por el relé produciendo un subalcance, se determina el alcance de la tercera zona como: (donde ahora se considera el tramo más largo (línea J))



$$Z_{III} = 1.2 \left( Z_{LIG} + \frac{I_{Ftotal}}{I_{Frelé}} Z_{LJJ} \right) = 1.2 \left( 8.85 + j20.1 + \frac{2}{1} 100(0.177 + j0.402) \right)$$

$$= 1.2( 8.85 + j20.1 + 2( 17.7 + j40.2 )) = 53.1 + j120.6 \quad \mathbf{W}_{prim}$$

$$Z_{III} = ( 53.1 + j120.6 ) \frac{600}{132000} \frac{110}{110} = 26.55 + j60.3 = 65.89 \angle 66.2^\circ \quad \mathbf{W}_{sec}$$

h) Zona de Off-set (Zona III ) (25% de la Zona I) el propósito es de brindar protección de respaldo a la barra que está antes de la ubicación del relé (S/E - P)

La Impedancia de la primera zona en  $\Omega$  secundarios es:

$$Z_I = 3.54 + j8.04 \quad \mathbf{W}_{sec}$$

por lo tanto el Alcance Offset de la tercera Zona deberá ser :

$$Z_{oIII} = 0.25( 3.54 + j8.04 ) = 0.885 + j2.01 = 2.20 \angle 66.2^\circ \quad \mathbf{W}_{sec}$$

i) .-Calibración del tiempo de la tercera zona

Antes de calibrar el tiempo para la tercera zona, es necesario chequear el alcance de la tercera zona a través de los transformadores reductores de tensión de la S/E Q (132/33kV). Si es posible, se debe conseguir operaciones selectivas entre los esquemas de protección de ambos lados de los transformadores. La Zona III tendrá un sobrealcance en el lado de 33 kV cuando estén en servicio ambos transformadores y alimentados sólo por una de las líneas (G o J); puesto que si ambas líneas estuvieran en servicio, la protección de distancia tendría un subalcance.

La impedancia de uno de los transformadores de 45 kV, referida a los 132 kV es:

$$= j0.125 \frac{132^2}{45} = j48.4 \quad \mathbf{W}_{prim}$$

La impedancia vista por el relé hasta una falla en la barra de 33 kV vale:

$$= ( 8.85 + j20.1 ) + j \frac{48.4}{2} = 8.85 + j44.3 = 45.18 \angle 78.7^\circ \quad \mathbf{W}_{prim}$$

$$\text{o bien: } = 45.18 \frac{600}{132000} \frac{110}{110} \angle 78.7^\circ = 22.59 \angle 78.7^\circ \quad \mathbf{W}_{sec}$$

Como se calculó anteriormente en el punto g), el alcance de la tercera zona es de:  $65.89 \angle 66.2^\circ \quad \mathbf{W}_{sec}$

Para una falla trifásica. El alcance de la Zona III en el nivel de 33 kV es aproximadamente de  $(65.89-22.59) = 43.3 \Omega$ . Es importante destacar que esta impedancia está en ohms secundarios referidos a la base de 132 kV. La impedancia equivalente en ohms primarios en 33 kV es:  $43.3 \frac{132000}{600} \cdot \frac{33^2}{132^2} = 5.41 \mathbf{W}$

La calibración de la Zona III de relé de distancia, debe ser tal que exista selectividad con cualquier protección temporal que haya en 33 kV de esa subestación.

#### B. Chequeo de la tensión mínima en el relé para fallas en la Zona I

Generalmente los fabricantes de relés de distancia dan a conocer la tensión mínima para la cual el relé mantendrá sus características de exactitud en términos de la tensión secundaria para fallas en el punto de balance de la Zona I. Esto puede ser expresado alternativamente en términos de la razón  $Z_S / Z_L$ , conocida también como la razón S/R, hasta la cual el relé puede ser aplicado. Par fallas sin tierra, la tensión mínima está dada en volts de fase a fase; para falla a tierra, ésta está dada en volts de fase a neutro.

En el caso analizado, la tensión mínima en el relé acontecerá cuando ambas líneas (G y H) estén en servicio alimentadas solo por un transformador de la S/E -P y considerando el nivel mínimo de falla en la barra de 275 kV

##### b.1. - Falla trifásica

Impedancia del sistema equivalente visto desde la barra de 275 kV:

$$Z_{S1} = j \frac{275^2}{2500} = j30.25 \mathbf{W} \text{ en } 275 \text{ kV}$$

$$Z_{S1} = j30.25 \frac{132^2}{275^2} = j6.97 \mathbf{W} \text{ en } 132 \text{ kV}$$

Impedancia del transformador:

$$Z_{T1,3} = j0.15 \frac{132^2}{275^2} = j21.79 \mathbf{W}_{prim}$$

Impedancia para una falla trifásica en el punto de alcance de la Zona I:

$$\frac{0.8 Z_{LIG} (Z_{LIH} + 0.2 Z_{LIG})}{0.8 Z_{LIG} + Z_{LIH} + 0.2 Z_{LIG}} = \frac{j16.08 \ j24.12}{j16.08 + j24.12} = j9.65 \mathbf{W}_{prim}$$

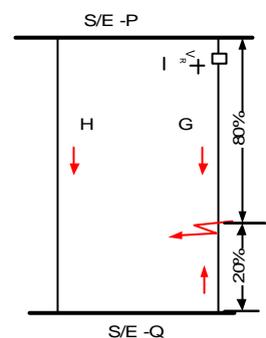
Impedancia total para una falla trifásica en el punto de alcance:

$$Z_{3j} = j6.97 + j21.79 + j9.65 = j38.4 \mathbf{W}_{prim} \text{ en } 138 \text{ kV}$$

La corriente la falla vale:  $I_{F3f} = \frac{132000}{\sqrt{3} \ 38.4} = 1985 \text{ ( A )}$

La tensión vista por el relé (en la barra de la S/E -P), vale:

$$V_{LL} = \sqrt{3} \ 9.65 \ 1985 = 33177 \text{ ( Volts primarios )}$$



$$V_{LL} = 33177 \frac{110}{132000} = 27.65 \text{ (Volts secundarios)}$$

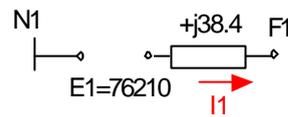
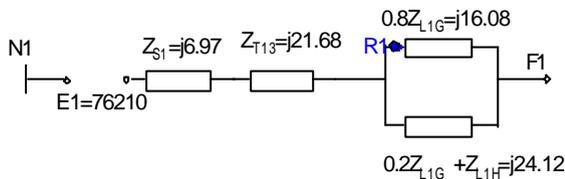
b.2. - Cálculo de falla a tierra

Cuando se calcula la tensión mínima vista por el relé durante una falla a tierra, se debe tener en consideración los elementos del sistema que tengan sus devanados con neutro a tierra. Esto afectará la distribución de la corriente de secuencia cero y dependiendo de la posición de la falla, puede incrementar o reducir la tensión medida o vista por el relé.

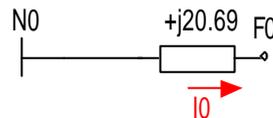
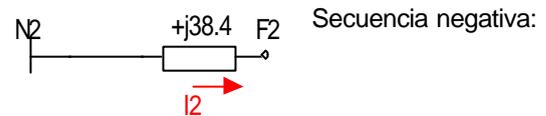
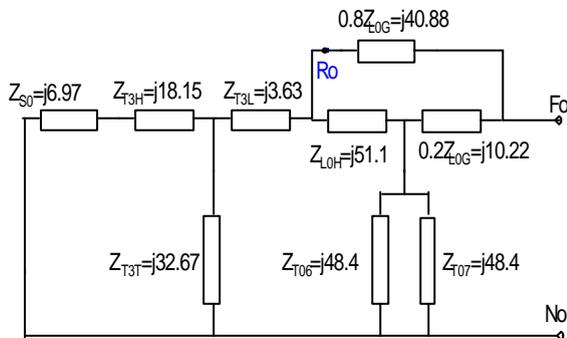
Como ejemplo se verá a continuación la mínima tensión vista por el relé cuando ambos transformadores T6 y T7 están en servicio y el T5 está desconectado. La falla supuesta es una F1Ø-T en el punto de balance de la Zona I del relé de la línea G.

b.2.1).- Mallas de secuencias.

Secuencia positiva:



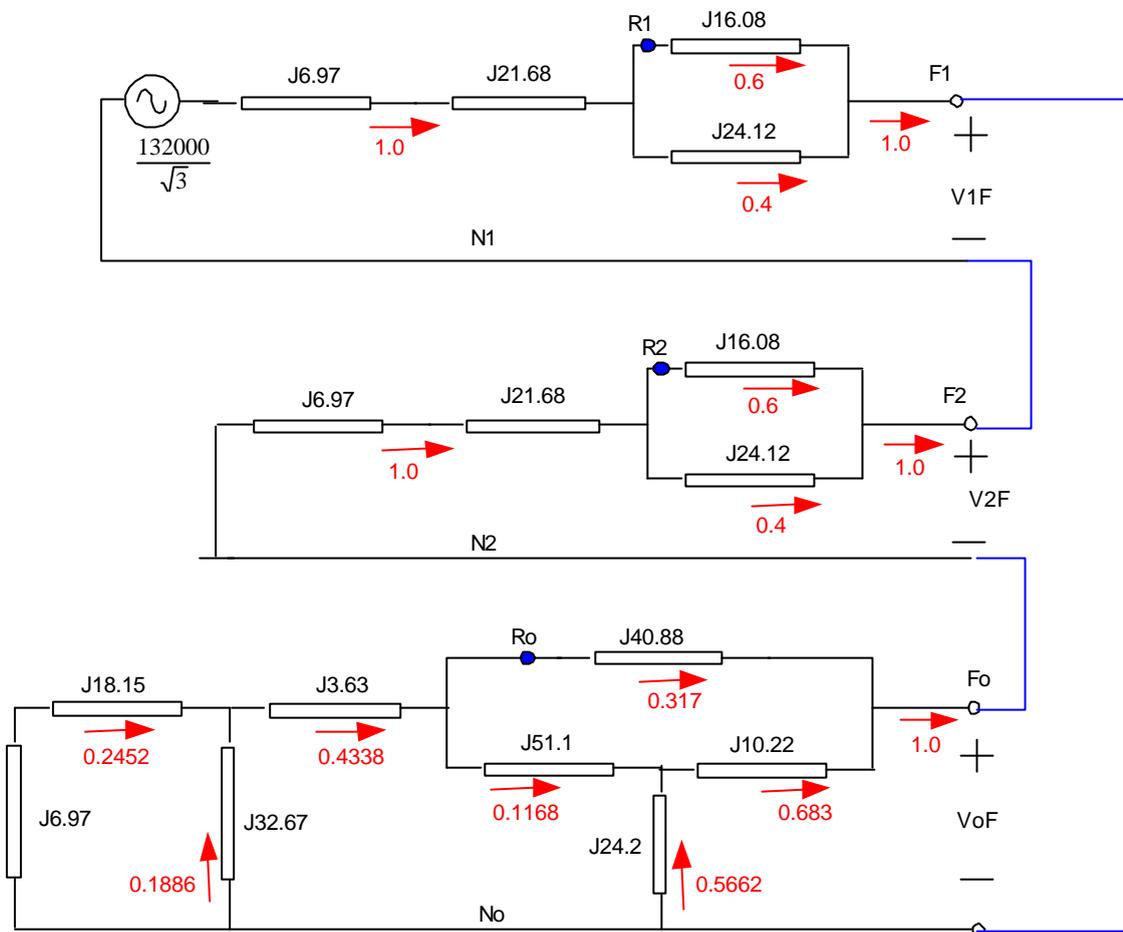
Secuencia cero:



Las corrientes en las mallas de secuencias para una falla monofásica a tierra,

son:  $I_1 = I_2 = I_0 = \frac{132000}{\sqrt{3}(Z_{F1} + Z_{F2} + Z_{F0})} = \frac{76210}{j97.49} = -j781.7 \text{ A}_{\text{primarios}}$

b.2.2.- Divisores de corriente de secuencias.



b.2.3.- Corrientes y tensiones a secuencia vistas por el relé.

Corriente de S0 circulante por el relé.:

$$I_{R0} = 0.317 I_0 = 0.317 (-j781.7) = -j247.8 \text{ A}_{\text{prim}}$$

Corriente de S0 circulante por la barra de la S/E-P:

$$I_{P0} = 0.433 I_0 = 0.433 (-j781.7) = -j338.5 \text{ A}_{\text{prim}}$$

Tensión a S0: 
$$V_{R0} = V_{P0} = -0.433 I_0 \left( j3.63 + \frac{j32.67(j6.97 + j18.15)}{j32.67 + j6.97 + j18.15} \right) = -j7.72 I_0$$

Tensión a SN: 
$$V_{R2} = V_{P2} = -I_2 (j6.97 + j21.68) = -j28.65 I_2 = -j28.65 I_0$$

Tensión a SP: 
$$V_{R1} = V_{P1} = V_{1F} + 0.6 j16.08 I_1 = -(V_{2F} + V_{0F}) + j9.648 I_1$$
  

$$V_{R1} = I_1 (j38.4 + j20.69 + j9.648) = j68.74 I_1$$

Por consiguiente, la tensión vista por el relé, vale:

$$V_R = V_{R0} + V_{R1} + V_{R2} = (-j7.72 + j68.74 - j28.65) I_1 = j32.37 I_1 = j32.37 I_0$$

$$V_R = j32.37 (-j781.7) = 25303.6 \text{ Volts}_{\text{primarios}}$$

$$V_R = 25303.6 \frac{110}{132000} = 21.08 \text{ Volts}_{\text{secundarios}}$$

## 10. Protección de Balance

### 10.1 Introducción

Este tipo de protección está basada en relés que comparan las magnitudes de dos o más corrientes. Se emplean en la protección de líneas paralelas y en la protección de equilibrio (o simetría) de corrientes de fases en máquinas.

En condiciones normales o de falla externa:

$$I_a = I_b \Rightarrow I_{\text{relé}} \propto |I_a - I_b| \rightarrow 0 \text{ el relé no opera}$$

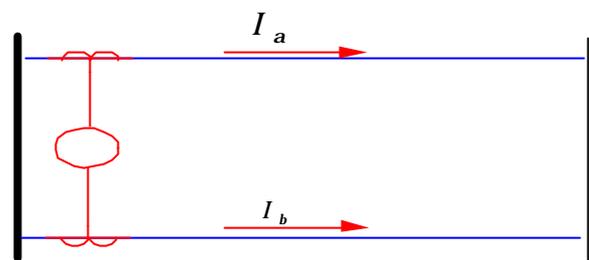


Figura Nº 15.- Protección Balance: Condición normal

Para fallas internas:

$$I_a \neq I_b \Rightarrow I_{\text{relé}} \neq 0 \rightarrow \text{el relé opera}$$

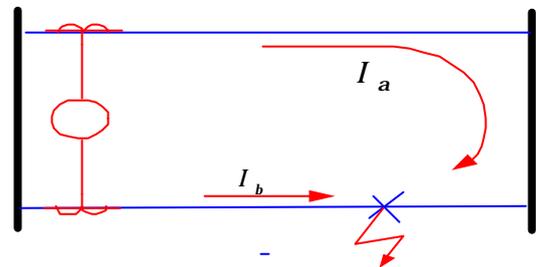


Figura Nº 16.- Protección de Balance para Falla Externa

## 10.2 Relé HD (W)

Es un relé balance de alta velocidad de operación. Las bobinas externas están provistas de Taps de manera de poder regular su sensibilidad.

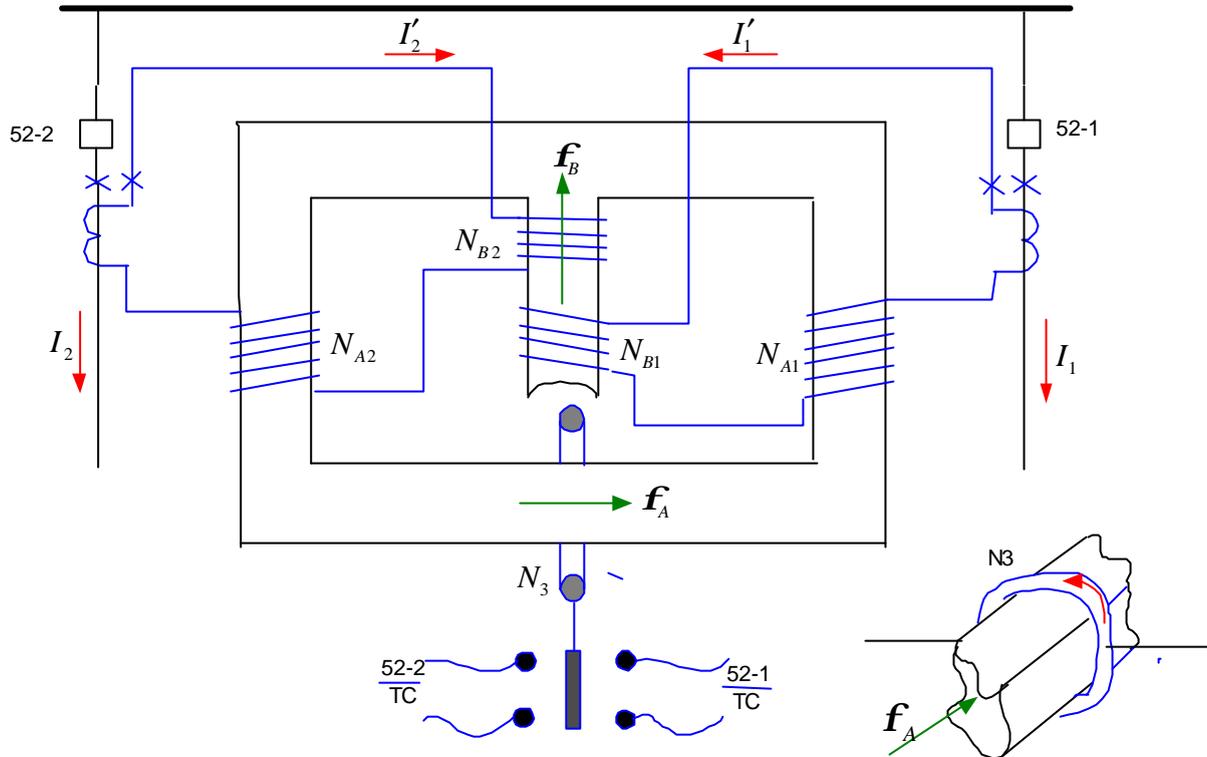


Figura N° 17 Relé de Balance

$N_{A1} = N_{A2}$  con taps para ajustes de sensibilidad.

$N_{B1} = N_{B2}$

a) En condiciones normales o de falla externa.

1.  $I_1 = I_2 \Rightarrow I'_1 = I'_2$

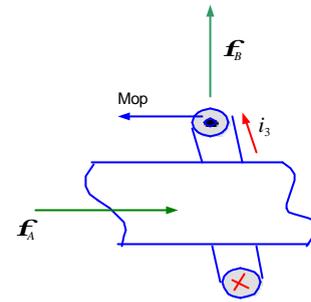
2.  $I'_1 N_{A1} + I'_2 N_{A2} = 0 \Rightarrow f_A = 0$

3. Si  $f_A = 0 \Rightarrow e_3 = 0 \Rightarrow i_3 = 0$

4.  $I'_1 N_{B1} + I'_2 N_{B2} \neq 0 \Rightarrow f_B \neq 0$  en ambos casos no hay operación.

b) Condiciones de falla interna

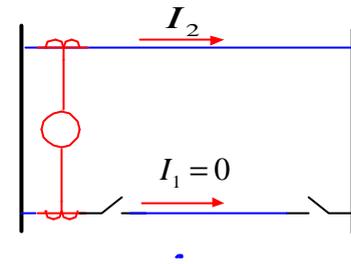
1. Falla en línea  $L_f \Rightarrow I_1 > I_2 \Rightarrow I'_1 > I'_2$
2.  $I'_1 N_{A1} + I'_2 N_{A2} \neq 0 \Rightarrow \mathbf{f}_A \neq 0$
3. Si  $\mathbf{f}_A \neq 0 \Rightarrow e_3 \neq 0 \Rightarrow i_3 \neq 0$



entonces:  $Mop \neq 0$  ;  $ioperd$

c) Al operar el 52-1 desconecta la línea  $L_f$  despejamos la falla, pero:

1.  $I_2 \neq 0 \Rightarrow I'_2 \neq 0$   
 $I_1 = 0 \Rightarrow I'_1 \neq 0$
2.  $I'_1 N_{A1} + I'_2 N_{A2} \neq 0 \Rightarrow \mathbf{f}_A \neq 0$
3. Si  $\mathbf{f}_A = 0 \Rightarrow e_3 \neq 0 \Rightarrow i_3 \neq 0$
4.  $I'_1 N_{B1} + I'_2 N_{B2} \neq 0 \Rightarrow \mathbf{f}_B \neq 0$
5.  $Mpa \neq 0 \Rightarrow 52-2$  también opera la línea sana  
Es necesario evitar la falsa operación del 52-2, que desenergiza la línea sana.



Solución:

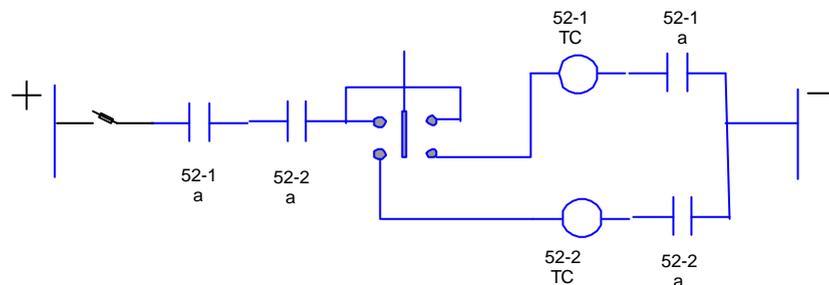
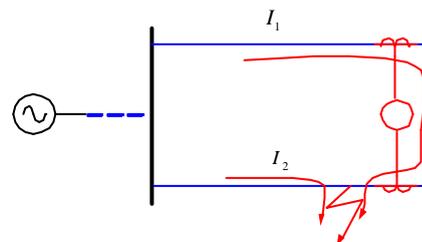


Figura Nº 18.- Solución para evitar disparo falso en esquema de protección de balance

d) No se debe emplear en extremos de líneas paralelas conectadas a barras pasivas.

1.  $I'_1 \neq I'_2 \Rightarrow I'_1 (\angle(I'_1, I'_2) \approx 180^\circ)$   
 $e I'_1 = I'_2$
2.  $|I'_1| N_{A1} + |I'_2| N_{A2} \neq 0 \Rightarrow \mathbf{f}_A \neq 0$
3. si  $\mathbf{f}_A \neq 0 \Rightarrow e_3 \neq 0 \Rightarrow i_3 \neq 0$
4.  $I'_1 N_{A1} + I'_2 N_{B2} = 0 \Rightarrow \mathbf{f}_B = 0$
5.  $Mop. = 0 \Rightarrow$  No opera



### 10.3 Ventajas y Desventajas de esta Protección

a) Ventajas

a.1 Tiene una gran velocidad de operación

*HD - 1 no vela falla*

*HD - 2  $\rightarrow t_{HD-2} + t_{52-4} = 2 + 8 = 10$  ciclos*

*$t_{aclartotal} = t_{HD-2} + t_{52-4} + t_{aclartotal\ de\ 52-2} = 2 + 8 + 10 = 20$  ciclos*

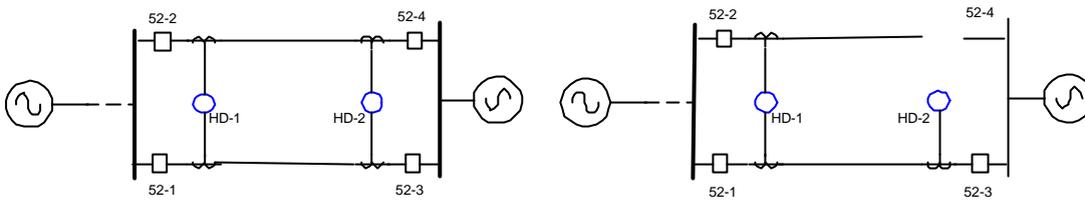


Figura Nº 19 .- Protección Balance

Supóngase que el sistemas tuviese relés de distancia ( Figura Nº 20).

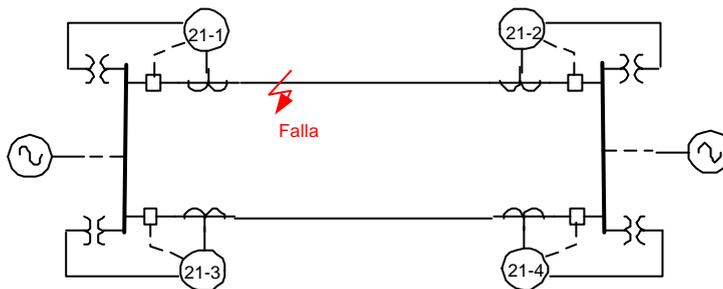


Figura Nº 20 Protección con relés de distancia HZ

Esquema de protección	Ve la falla en	Tiempo del rele HZ (ciclos)	Tiempo del Interruptor (ciclos)	Tiempo de despeje (ciclos)
HZ 21-1	Primera Zona	2	8	10
HZ 21-2	Segunda Zona	20	8	28
<b>TIEMPO DE ACLARAMIENTO TOTAL</b>				<b>28</b>

Luego demora 28 ciclos en aclarar la falla. Es decir, la protección balance es mucho más rápida que la protección de distancia.

a.2 Es selectivo

b) Desventajas

b.1 al ser desenergizada una línea, deja sin protección la otra; luego, se necesita una protección adicional.

b.2 Deja sin protección aproximadamente el 10% del extremo lejano de la línea.

## 11. Protección Piloto

### 11.1 Introducción

La protección de líneas de transmisión en un sistema enmallado en algunos casos requiere de protección instantánea aclaramientos simultáneos de los extremos. La Protección Piloto compara los valores eléctricos de los extremos de la línea: corrientes complejas, desfases, magnitudes y disparos transferidos.

#### a) Corrientes completas

En este esquema se compara vectorialmente las corrientes de entrada con la salida; si difiere vectorialmente más allá de cierta cantidad absoluta o porcentaje dado, significa que existe una falla interna de la sección de la línea protegida, y causa que cada relé en los extremos, den orden de operación de los interruptores instantáneamente.

#### b) Comparación de desfases

Es análogo al procedimiento anterior, pero compara el desfase entre corrientes de los extremos en una misma fase.

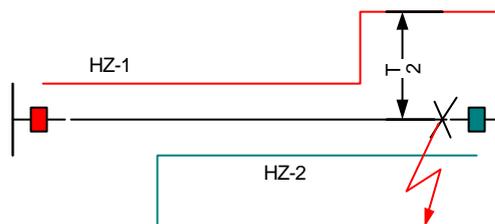
#### c) Comparación direccional

Si los elementos direccionales, en los extremos, indican una falla interna protegida, causa disparos instantáneos y simultáneos de los interruptores en los extremos.

#### d) Disparo transferido

$HZ-1 \rightarrow$  opera en 2ª zona  $\rightarrow$  retardo (T2)

$HZ-2 \rightarrow$  opera en 1ª zona  $\rightarrow$  52-2 (8 ciclos)



desde el esquema 52-2 se envía en una señal al 52-1 para que abra sin retardo y obtener despeje simultáneo y no secuencial como sucedería si no hubiese protección hilo piloto.

### 11.2 Protección Hilo Piloto

#### 11.2.1 Esquemas Básicos

##### a) Por corriente Circulante

Es la forma más simple de protección diferencial longitudinal y tiene gran aplicación en protección líneas, máquinas, barras o transformadores.

En protección de líneas se usan “hilos pilotos” para transmitir la información de un extremo a otro de la línea.

- Para falla externa o condiciones normales:

$$I_1 = I_2 = I \Rightarrow I_{01} = 0, I_{02} = 0$$

- para falla interna

$$I_1 = I_2 \Rightarrow I \neq 0 \Rightarrow I_{01} = 0, I_{02} = 0$$

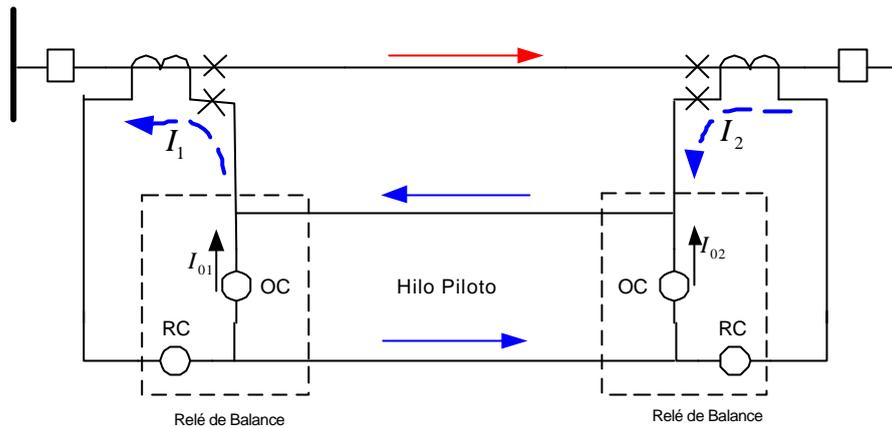


Figura N°21 Protección hilo piloto: Comparación por corriente

donde OC: bob. de operación  
RC: bob. de retención

La bobina RC se utiliza para prevenir operaciones con pequeñas corrientes en bobina OC.

b) Protección “hilo piloto” por Tensión Opuesta

En general corresponde al esquema que se presenta a continuación.

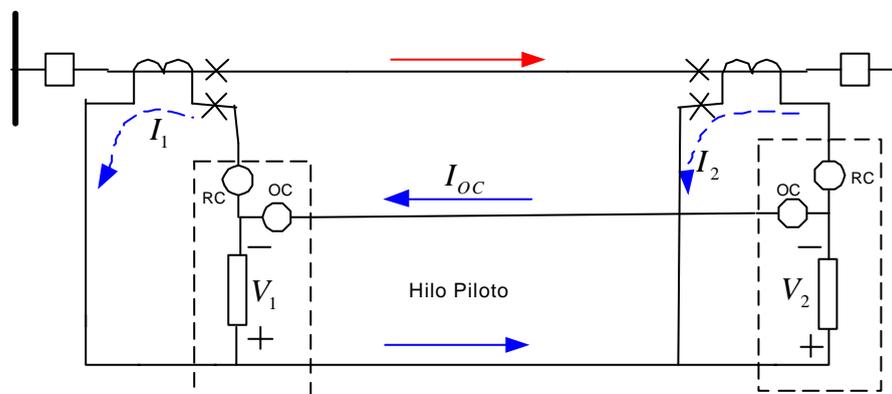


Figura N°22 Esquema de protección Hilo Piloto por Tensión Opuesta

En condiciones normales o falla  $V_1=V_2 \Rightarrow I_{oc}=0$ . Si hay falla interna:  $V_1+V_2 \neq 0 \Rightarrow I_{oc} \neq 0$  (opera)

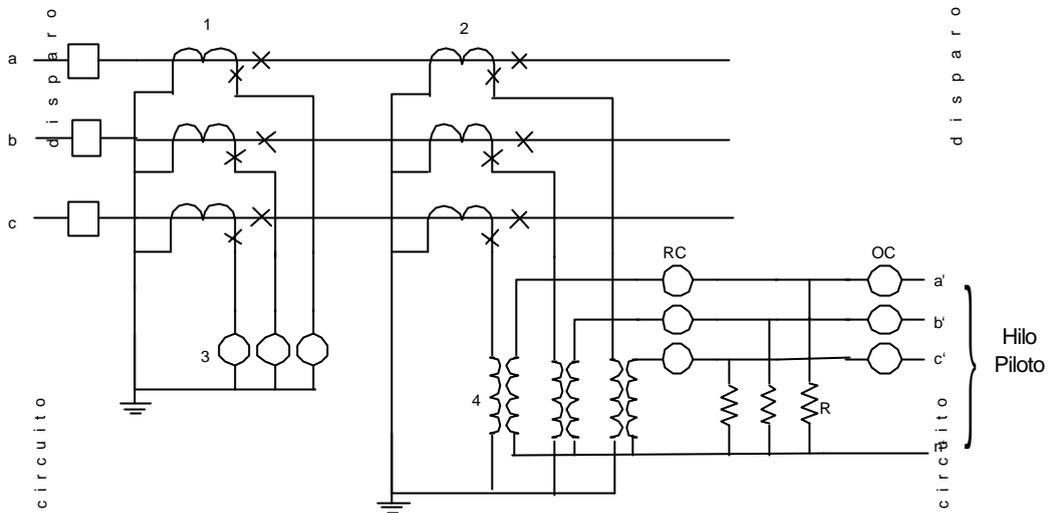
A continuación se presenta un esquema completo correspondiente a protección diferencial longitudinal por tensión opuesta.

1-2 : transformadores de corrientes montados en un mismo aparato con dos núcleos.

3 : Relés de sobrecorrientes con elementos instantáneos que respaldan y supervisan a la protección hilo piloto.

4 : Transformadores de aislamiento.

- Ventajas :
- permiten conectar a tierra el primario.
  - aumenta la tensión en los hilos y baja la corriente.
  - da protección al equipo terminal contra sobrecorrientes inducidas en los hilos



- RC : Bobina de retención del relé diferencial.  
 OC : Bobina de operación del relé diferencial.  
 R : resistencia entre cuyos bornes se tiene una tensión cuyo valor y sentido depende de la situación normal o de falla externa, o de -falla interna.

Figura N°22.- Protección diferencial longitudinal por comparación de tensión opuesta

Entre algunas desventajas se puede citar que se produce un falso disparo al ocurrir cortocircuito en los hilos pilotos. En caso de que se corte el hilo el sistema queda con protección.

c) Comparación Direccional.

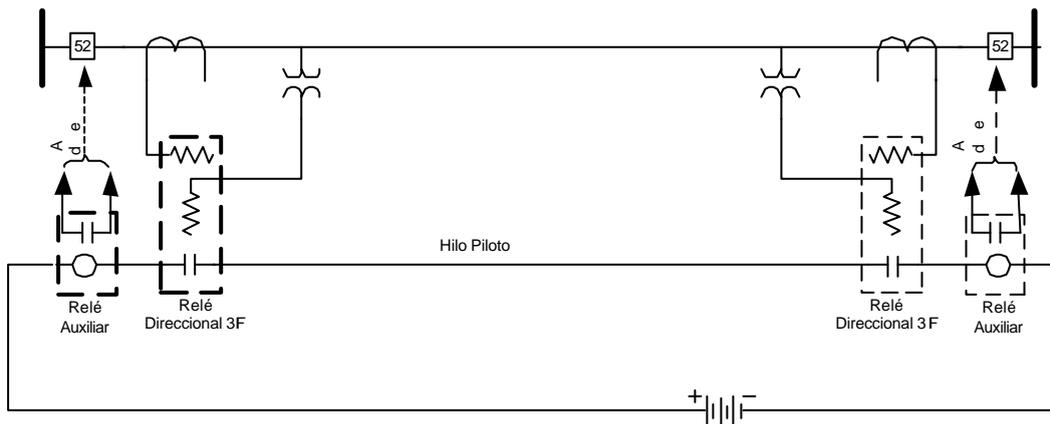


Figura N°23.- Esquema de protección hilo piloto: por comparación direccional

Corresponde al esquema simplificado que se presenta en la figura N°23

Análisis de funcionamiento

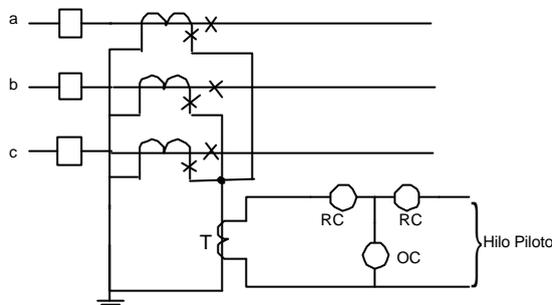
1. En caso de falla externa o condiciones normales: solamente uno de los relés direccionales puede estar cerrado, por lo tanto:  $I=0 \rightarrow$  no opera.
2. En caso de falla interna ambos relés direccionales cerrarán; entonces :  $I \neq 0$  hay disparos simultáneos de los interruptores de los extremos de la línea despejando la línea. La ventaja de usar relés direccionales trifásicos, consiste en que se usan solamente dos conductores hilos pilotos, en vez de cuatro como se usan en el esquema de “corrientes circulares” visto anteriormente.

11.2.2. Protecciones "hilo piloto" especiales.

Se han desarrollado algunos esquemas que emplean solo dos hilos por cada línea trifásica.

a) Protección hilo piloto residual

Se comparan las corrientes de secuencia cero de ambos extremos: donde T es un transformador de aislamiento



.Figura Nº 24 Esquema de protección hilo piloto residual

Este sistema aclara solamente fallas a tierra ( $F_{2f-T}$  y  $F_{1f-t}$ ), que son alrededor del 90% de las falla que ocurren en líneas de transmisión; las fallas sin tierra ( $F_{30f}$  y  $F_{2f}$ ) deben ser despejadas por respaldo.

b) Sistema Westinghouse HCB

Se emplean filtros de secuencia en abmos extremos de manera que

$$I_{filtro} = K_1 I_{a1} + K_0 I_{a0}$$

Con esto se permite detectar cualquier tipo de falla. El esquema completo se presenta a continuación, donde sólo se omite los respaldos.

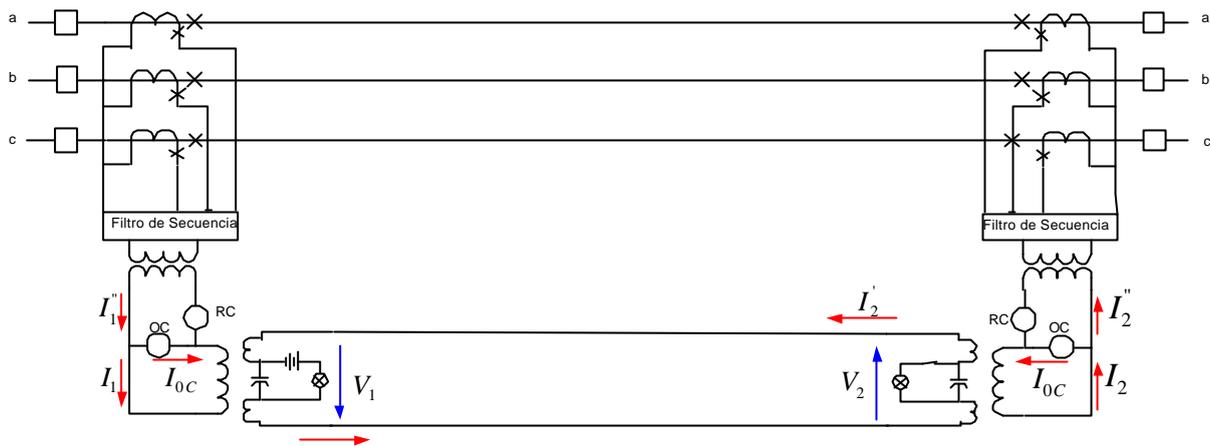


Figura N° 25.- Sistema hilo piloto Whestinghouse HCB

### Análisis de Funcionamiento

- En condiciones normales o de falla externa:

Las impedancias vistas desde los primarios de los transformadores de aislación (T) es muy pequeña, luego  $I_1'' = I_1, I_{0C} = 0$

$$V_1 + V_2 = 0 \quad I_1' = I_2'$$

- En condiciones de falla interna  $V_1$  conserva su signo, pero  $V_2$  lo invierte, luego:

El transformador  $T_1$  tiende a inducir la corriente  $I_1'$ .

En transformador  $T_2$  tiende a inducir la corriente  $I_2' = I_1'$

Con los cuales aumenta la impedancia vista desde los primarios de los transformadores de aislación, circulando gran parte de la corriente  $I_2''$  e  $I_1''$  a través de las bobinas de operación OC.

El filtro de secuencias empleados para este tipo de relé es el siguiente:

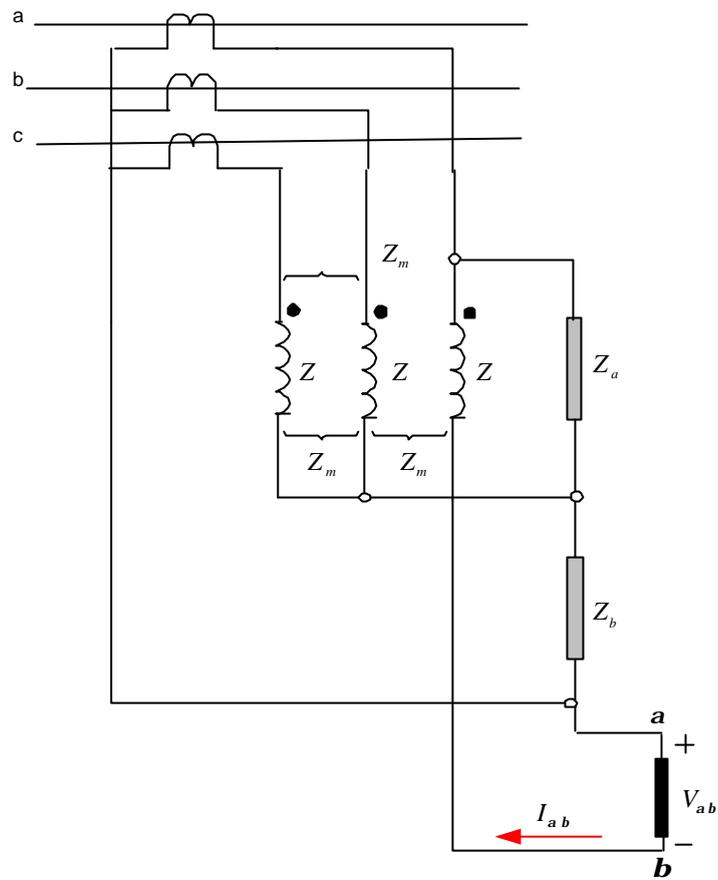


Figura N° 26.- Filtro de secuencia positiva y secuencia homopolar:  $I_{ab} = K_1 I_{\bullet}^{(+)} + K_0 I_{\bullet}^{(0)}$