

1. Introducción

Cuando la complejidad de los sistemas eléctricos aumenta, las redes adoptan configuraciones calladas que cambian según las circunstancias, con varios centros de generación; además el parque de generación es variable y se presentan distintas potencias de cortocircuito según los despachos y la red adoptada.

En estos casos, la selectividad del sistema de protecciones de la red resulta imposible de lograr mediante los parámetros ajustables de "corriente y tiempo de operación" de los relés de sobrecorriente. Además de la factibilidad de accionamientos inadmisibles, los altos tiempos de operación ocasionan graves daños en los lugares de falla y también la posibilidad de pérdida de estabilidad.

Se recurre entonces a sistemas de protección de zona tales como relés diferenciales de cables y líneas o a relés de distancia.

Los relés de distancia tienen en la mayoría de los casos grandes ventajas como ser la flexibilidad de su ajuste, diversidad de curvas de operación, posibilidad de realizar un eficaz sistema de protección de respaldo y también un sistema de protección de barras.

1.1 Principio de funcionamiento

El principio básico consiste en que una falla sólida en una línea presenta una determinada impedancia que es función de la distancia a la que se ha producido, por lo que su medición de la distancia a la que se ha producido, por lo que su medición resulta un medio eficaz para saber si dicha falla tuvo lugar más cerca o más lejos de una distancia (impedancia) prefijada. Veamos un caso simple:

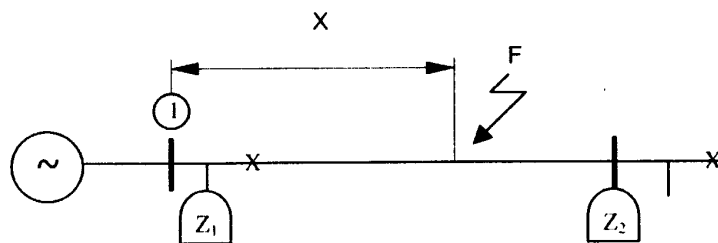


Fig. 1

Supongamos que Z1 funciona sí:

$$|V_1| \leq |I_1| * Z_r$$

con $Z_r = \text{cte. del relé}$

$\frac{V_1}{I_1}$ es igual a la impedancia desde la barra 1 al lugar de la falla, es decir que es igual a $x * Z_1$.

Donde Z_1 es la impedancia por la unidad de longitud. Por lo tanto en el relé estamos haciendo la siguiente comparación:

$$\frac{|V_1|}{|I_1|} \leq Z_r$$

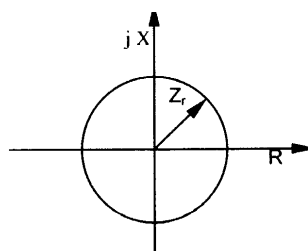


Fig. 2

Definiendo la característica del relé de distancia como el conjunto de puntos que determinan el límite de operación, se tiene para este ejemplo la representación de la característica en el plano X,R es una circunferencia con centro en el origen y radio Z_r .

1.2 Consideraciones básicas

El problema de los relés de distancia es más complejo que el presentado en el ejemplo anterior, por lo que pronto ante una falla además de la impedancia del tramo fallado hay que considerar la impedancia propia de la falla que incluye la resistencia del arco y la impedancia del contacto a tierra, además si hay generación en ambos extremos, necesitamos un sistema de medición que sea direccional a fin de no ver fallas hacia atrás.

Sea el siguiente sistema de potencia (fig. 3):

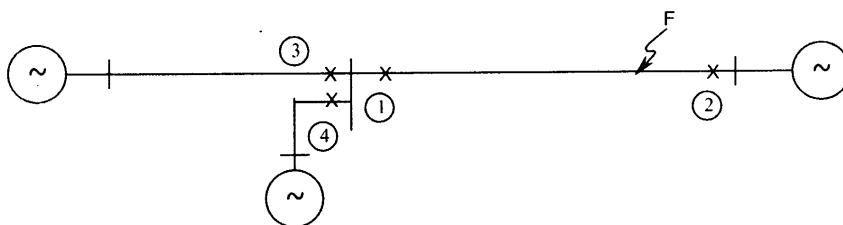


Fig. 3

Para una falla F los únicos relés que deben operar son en 1 y el 2; con relés de características del tipo de la fig. 2, actuarán también en forma incorrecta los relés 3 y 4. El problema puede ser solucionado con relés de distancia cuyas curvas características sean direccionales, por ejemplo del tipo mho (fig. 4).

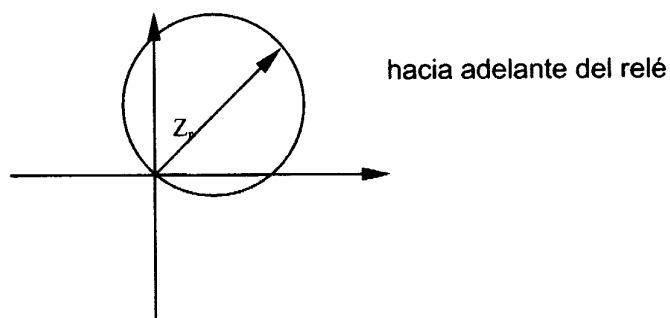


Fig. 4

En el siguiente ejemplo supongamos que pretendemos que Z_a sea respaldo de Z_b (fig. 5) para una falla en F . Esto es, ante la falla F , Z_b operará en un tiempo de actuación mínimo asociado a su

curva característica. Si por algún motivo el interruptor involucrado no abre, entonces opera el relé Z_a en un tiempo t_2 . Ha quedado planteada de esta forma la relación de una protección de respaldo con relés de distancia.

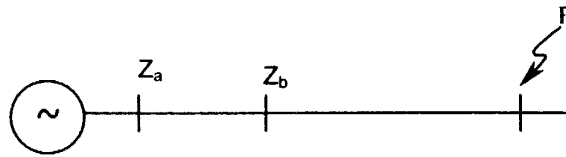


Fig. 5

En general los relés de distancia tienen tres etapas de operación, en cada una de ellas se ajusta la curva y el tiempo de operación.

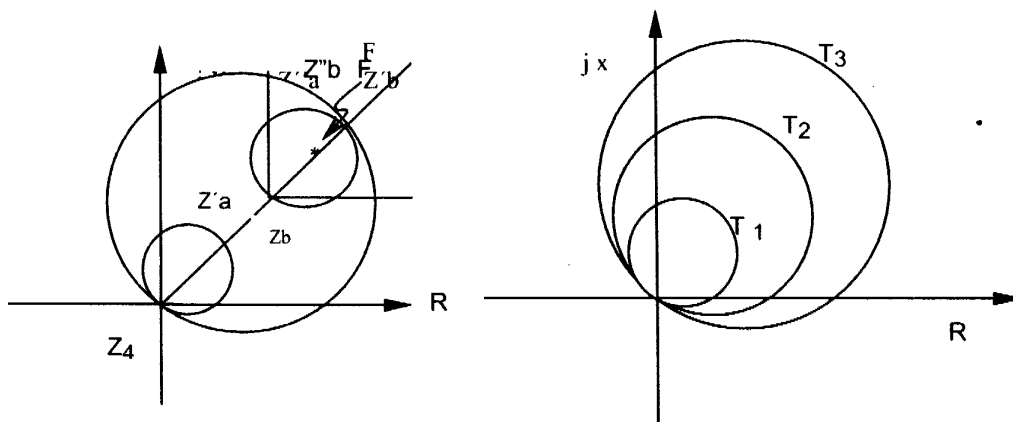


Fig. 6

2. Características de operación de los relés de distancia. Campo de utilización.

Se define como característica de los relés distanciométricos al conjunto de puntos en el plano de impedancia que terminan su límite de accionamiento. Existen distintos tipos de características que pueden ser simples o compuestas, dentro de las más usuales destacamos:

2.1 Impedancia

Se trata de un círculo con centro en el Origen de coordenadas del plano de Impedancia y radio ajustable Z_r . La Operación es adireccional.

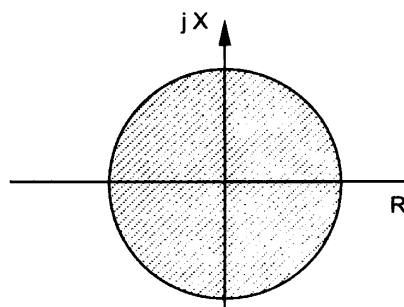


Fig. 7

2.2 Direccional

Es una recta que pasa por el origen y que forma con el eje de resistencias un determinado ángulo.

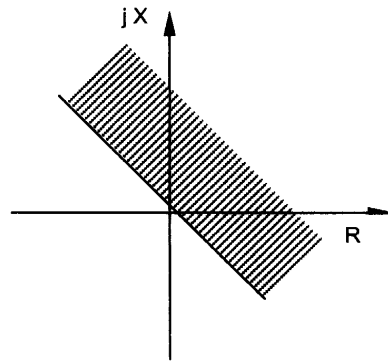


Fig. 8

En combinación con otras, completa curvas de utilización práctica; p.e. con características de impedancia.

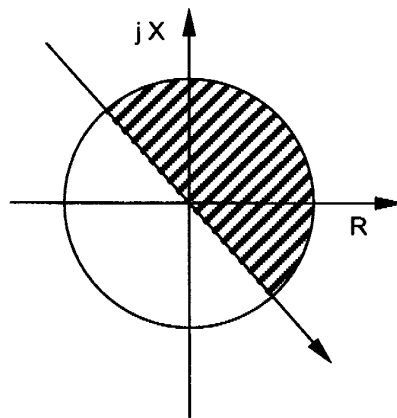


Fig.9

2.3 Reactancia

Es una recta paralela al eje de resistencia y a una determinada distancia X_L del mismo.

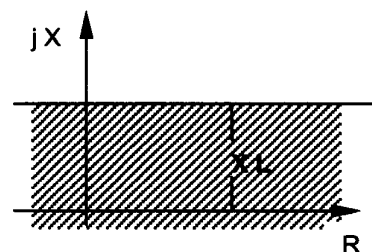


Fig. 10

2.4 Admitancia (mho)

Es un círculo pasante por el origen. Es direccional ya que no involucra al tercer cuadrante:

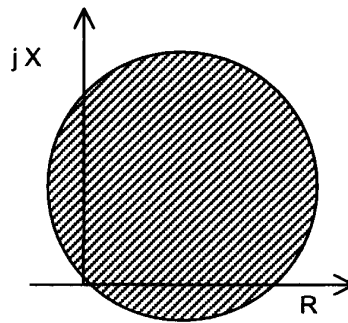


Fig. 11

2.5 Admitancia desplazada

Es similar a la característica de admitancia con la diferencia que el centro presenta un corrimiento hacia el tercer cuadrante.

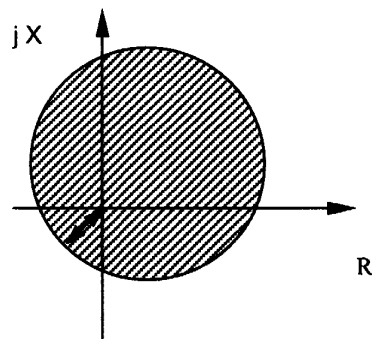


Fig. 12

2.6 Cuadrilateral

Como su nombre lo indica es una característica formada por líneas rectas.

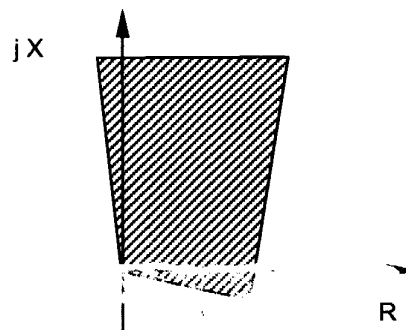


Fig. 13

2.7 Lenticular

Resulta de la composición de dos círculos desplazados.

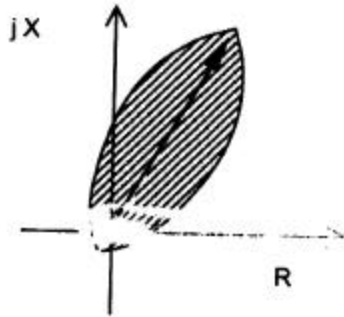


Fig. 14

2.8 Campo de utilización de las distintas características

La característica ideal de un relé de distancia será aquella que rodea exactamente el lugar de falla en el plano de impedancia. Es importante evaluar adecuadamente la resistencia de falla ya que la misma puede hacer caer la impedancia vista por el relé fuera de la zona de operación.

En líneas largas la R_f frente a la impedancia de línea queda minimizada (se estudia su influencia en límite de zona). En cambio en líneas cortas puede resultar importante. Resulta evidente que para estos casos las características cuadrilaterales presentan ventajas frente a las de tipo mho.

3. Comparadores de amplitud y de fase

Las distintas características de operación de los relés de distancia se logran mediante comparadores de amplitud y de fase.

3.1 Comparadores de amplitud

Pueden ser electromagnéticos (atracción de armadura), puentes rectificadores o electrónicos. En ellos se compara la amplitud de dos señales implicándose del resultado de la misma la operación o bloqueo. Veamos los siguientes ejemplos:

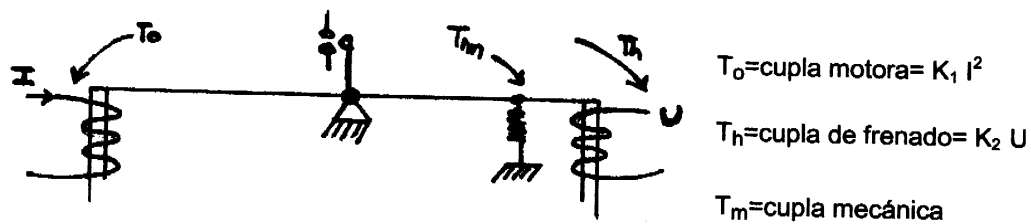


Fig. 15

Atracción de armadura

La condición de operación es:

$$T_o \geq T_h + T_m$$

$$K_1 I^2 \geq K_2 U^2 + T_m$$

Despreciando la cupla mecánica

$$\Rightarrow U/I = Z_{op} \leq \sqrt{K_1 / K_2}$$

3.2 Comparadores de fase

Permiten establecer si el ángulo de fase entre dos magnitudes eléctricas variables, obtenidas a partir del circuito eléctrico protegido, es igual, mayor o menor que cierto ángulo de comparación. Al igual que los de amplitud pueden ser electromagnéticos, o electrónicos. A continuación se dan algunos ejemplos.

De inducción. La cupla de accionamiento responde a:

$$T = K \cdot \phi_1 \cdot \phi_2 \cdot \sin \alpha$$

Es un comparador de $0 + 180^\circ$.

4. Principio de medición

La obtención de las distintas características se logra mediante el uso de comparadores de fase o de amplitud, por lo que estos comparadores son las unidades de medida de los relés de distancia.

En lo que sigue se desarrollarán los principios de medición para obtener las características más usuales.

4.1 Relé direccional

No es un relé que mide distancia pero lo consideramos para completar el modelo matemático (ya que es similar al de un relé de distancia) y porque se lo usa conjuntamente con relés de distancia no direccionales.

Su característica es una recta que pasa por el origen en el plano de impedancia. En un comparador de fase se compara el ángulo entre V y $I \cdot Z_r$ de tal forma que:

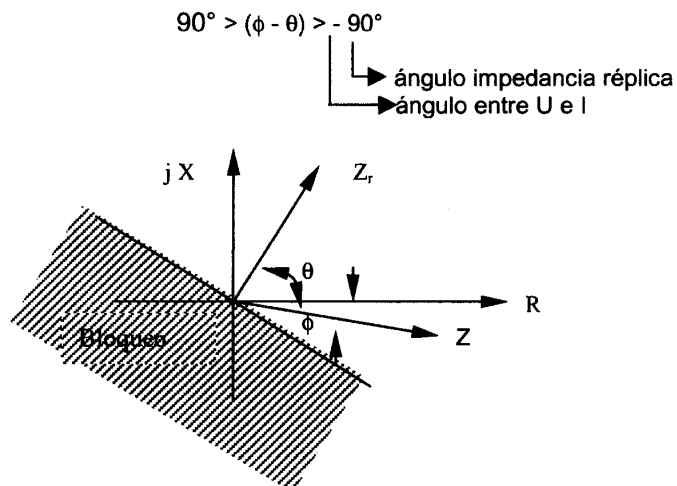


Fig. 16

Con un comparador de amplitudes la característica se obtiene si:

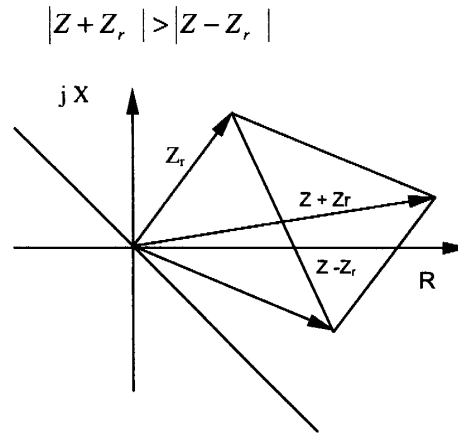


Fig. 17

4.2 Relé de impedancia

Su característica es circular con centro en el origen, es inherentemente una comparación de amplitud:

$$|Z| < |Z_r|$$

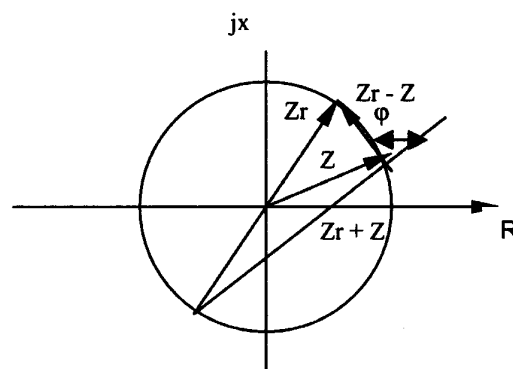


Fig.18

Con un comparador de fase es más complicado ya que se requiere hacer:

$$(I^*Z_r + V) \text{ y } (I^*Z_r - V)$$

Si ψ es el ángulo entre ambas señales, la característica de impedancia se obtiene si:

$$\pi/2 > \Psi > -\pi/2$$

4.3 Relé de admitancia (mho)

En un diagrama de impedancia la característica de operación es un círculo pasante por el origen. Con un comparador de fase de las señales de entrada son:

$$V - I^*Z_r \text{ y } V$$

Siendo la condición de operación

$$90 > \Psi > -90$$

con un comparador se tiene a $|I \cdot Z_r|$ como entrada de operación y $|2V - I \cdot Z_r|$ como señal de restricción, el relé opera cuando: $|2Z - Z_r| < |Z_r|$

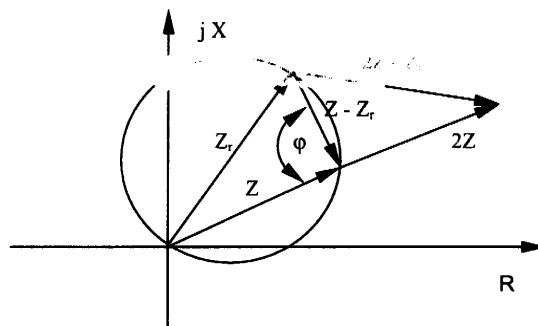


Fig. 19

4.4 Relé de reactancia

Su curva característica es una recta paralela al eje de las resistencias. En un comparador de fase $I \cdot Z_r$ se compara con $I \cdot Z_r - V$. La curva de operación está dada cuando:

$$\Psi + \theta < 180^\circ$$

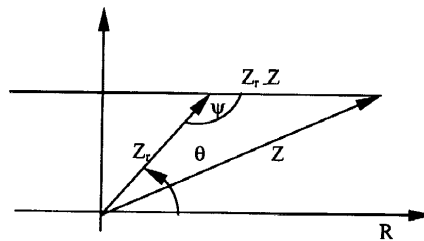


Fig. 20

La característica en el plano de impedancia son dos rectas que se cortan en un determinado punto. En un comparador de fase $I \cdot Z_r$ es comparado con $I \cdot Z_r - Z_r$ y opera cuando Ψ el ángulo entre ambas señales está comprendido entre $\pm \lambda$

4.5 Relé de reactancia restrictiva

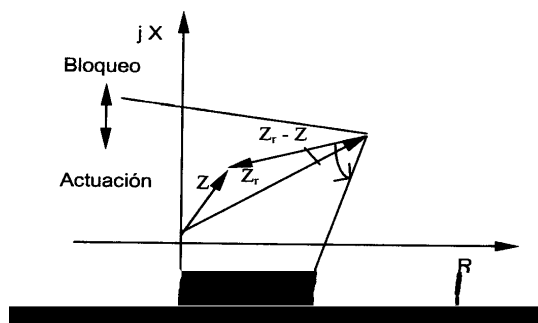


Fig. 22

4.6 Relé de dirección restrictiva

En el diagrama de impedancia la característica está constituida por un par de rectas que se cortan en el origen. En un comparador de fase las entradas son V y $I \cdot Z_r$ y la operación se produce cuando: $\lambda > \Psi > -\lambda$

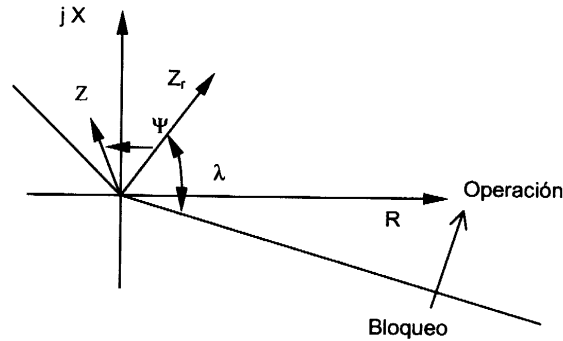


Fig. 23

5. Alimentación de las unidades de medida.

En este punto se analizara que tensiones y corrientes se deben aplicar para medir correctamente los distintos tipos de fallas.

5.2 Medición de fallas entre fases

1) Falla bifásica

$$V_{bc} = I_b \cdot Z_1 - I_c \cdot Z_1 = 2 \cdot I_b \cdot Z_1$$

donde Z_1 es la impedancia de secuencia directa de línea por fase desde el relé hasta la falla.
 $V_{bc}/I_b = 2Z_1$

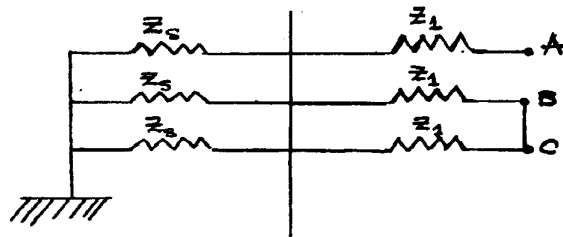


Fig. 24

2) Falla trifásica

Si ahora consideramos una falla trifásica para el mismo circuito tendremos:

$$V_{bc} = I_b \cdot Z_1 - I_c \cdot Z_1 = \sqrt{3} \cdot I_b \cdot Z_1$$

$$\frac{V_{bc}}{I_b} = \sqrt{3} \cdot Z_1$$

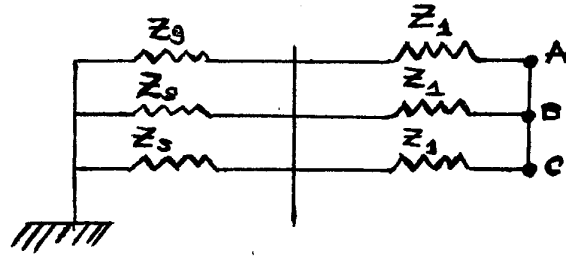


Fig. 25

Esto nos muestra que la impedancia medida si tomamos tensiones compuestas y corriente de fase, para fallas trifásicas es 15% menor que para fallas bifásicas. Si en cambio se toman la tensión compuesta y la diferencia entre las correspondientes corrientes de fase se tiene que:

Para fallas bifásicas

$$\frac{V_{bc}}{I_b - I_c} = \frac{I_b * Z_1 - I_c * Z_1}{I_b - I_c}$$

Para Fallas trifásicas

$$\frac{V_{bc}}{I_b - I_c} = Z_1$$

Es decir que de esta manera para tipos de fallas la "impedancia medida" es igual a \$Z_1\$.

5.2 Medición de fallas fase tierra

Veamos ahora la alimentación de las unidades de medida para fallas a tierra. de tensión y corriente para que la impedancia aparente que se le presenta al relé durante una falla monofásica sea igual a la impedancia directa del tramo fallado de la línea. Se analizará la forma de tomar las entradas. Para el circuito de la fig. 26 se tiene:

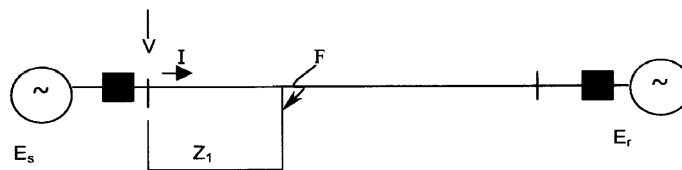


Fig. 26

$$U_R = I_{R1} \cdot Z_1 + I_{R2} Z_2 + I_{R0} Z_0 + I_f R_f;$$

luego si \$Z_1 = Z_2\$

$$U_R = (I_{R1} + I_{R2} + I_{R0}) Z_1 + I_{R0} (Z_0 - Z_1) + I_f R_f$$

$$U_R = Z_1 [I_R + I_{R0} \frac{(Z_0 - Z_1)}{Z_1}] + I_f R_f \Rightarrow U_R = Z_1 [I_R + R_0 I_{R0}] + I_f R_f$$

Si alimentamos la unidad de medida con la tensión de la fase fallada y con una corriente

“compensada” (compensación por corriente de secuencia cero) igual a $I_R + I_0 K_0$ se tiene que la impedancia aparente es:

$$\frac{U_r}{I_r + K_0 I_0} = Z_1 + \frac{I_f}{I_r + K_0 I_0} R_f$$

6. Escalonamiento de tiempo en los relés de distancia

Como ya fue expresado los relés de distancia tienen más de una etapa de actuación, habitualmente los relés comerciales tienen tres etapas, en ellas hay que ajustar la característica de operación y el tiempo de disparo asociado.

Mediante la primera etapa o zona se protege entre el 80% y el 90% de la longitud de la línea según los errores previstos, para cubrir el 100% de la línea se utiliza la segunda zona, con la que también se protegen las líneas o equipos inmediatos siguientes, constituyéndose de esta forma un sistema de protección de respaldo. Para evitarse a selectividades con las protecciones propias de las mismas hay que temporizar la segunda zona un tiempo T_2 . Las etapas siguientes de los relés se ajustan de tal manera de configurar un sistema de respaldo lo más amplio posible, utilizándose el ajuste del tiempo para garantizar la selectividad del sistema.

El intervalo de selectividad puede ser del orden de los 300 a 400 ms. teniéndose por lo tanto p.e.: $T_2=400\text{ms.}$ y $T_3=800\text{ms.}$

En la fig. 27 que sigue se presenta el escalonamiento de los relés de distancia A y B, es un caso muy simple que se da para ilustrar el tema, en la práctica hay que estudiar cuidadosamente en sistema de potencia, observando todos los posibles despachos operativos y las impedancias aparentes que se les presentarán a los relés en cada uno de dichos casos y para los distintos tipos de fallas.

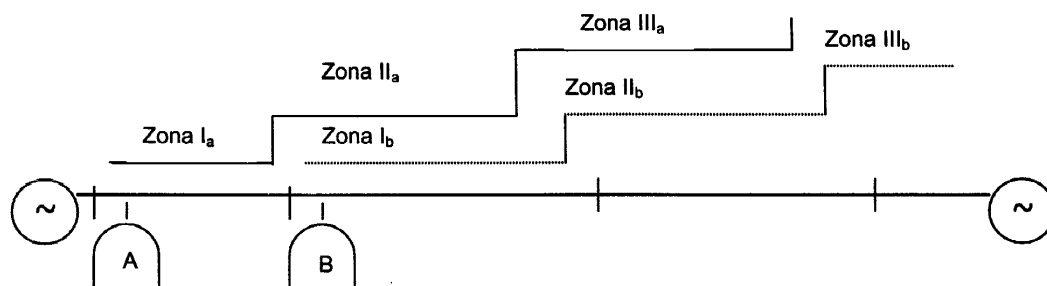


Fig. 27

Top. (Tiempo operación) Zona I_A = instantáneo (por ej.:50ms.) =Top. Zona I_B

Top. Zona II_A = 400ms. = Top. Zona II_B

Tops Zona III_B = 800ms. = Top. Zona III_B

7. Estructura de un relé de distancia

En forma genérica podemos decir que existen dos tipos de configuraciones: con una única unidad de medición para todo tipo de falla o con varias unidades de medida.

En los relés con una única etapa de medición se tiene un sistema de arranque (que puede estar constituido por relés de sobrecorriente, de subtensión o de subimpedancia) encargado de realizar la alimentación a la unidad de medida con las adecuadas señales de tensión y corriente, de tal forma que como se vio en el punto 5 el ajuste de la impedancia réplica sea válido para todo tipo de falla.

Se dice que este esquema es conmutado, ya que según que fases de arranque actúan se conmutan los circuitos de tensión y corriente internamente en el relé. Por otra parte las unidades de arranque al actuar ponen en funcionamiento un relé temporizador de varios niveles de tiempo ajustables (según cantidad de etapas tenga el relé de distancia) que cambian el valor de la impedancia réplica de acuerdo con los ajustes de las otras etapas.

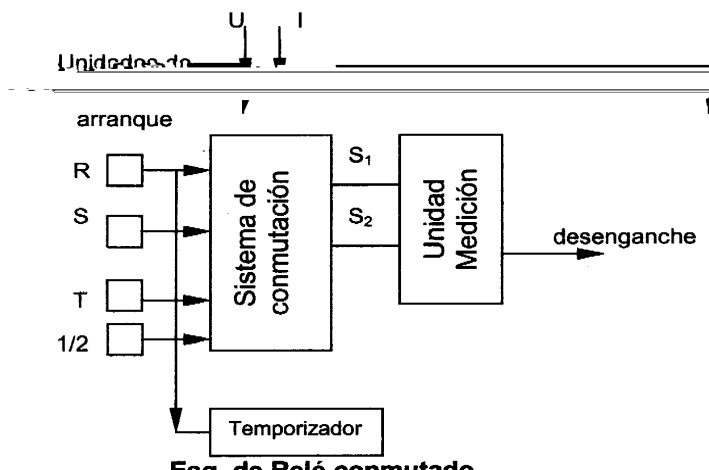
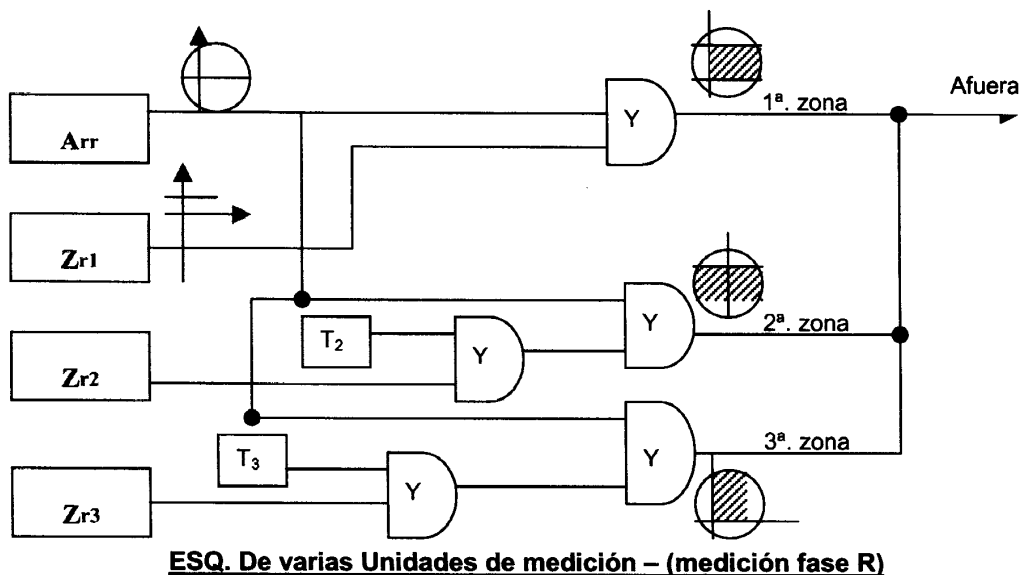


Fig. 28

El otro esquema, de varias unidades de medición, tiene el conexionado de corriente y tensiones, a cada una de ellas, ya fijo y de acuerdo con el tipo de falla destinado a proteger. Son desde ya configuraciones más rápidas y son las que tienen los relés que se utilizan en los sistemas de muy alta tensión. En estos también los relés de arranque ponen en funcionamiento los temporizadores encargados de modificar los alcances.



ESQ. De varias Unidades de medición – (medición fase R)

Fig. 29

8. Bloqueo antipenduleo

Si es necesario impedir la operación de los relés de distancia cuando es dable esperar oscilaciones de potencia muy severas e incluso pérdidas de estabilidad del sistema, ninguna de las características aquí descritas puede aportar solución al problema. La oscilación de potencia puede presentar al relé impedancias aparentes similares a la de fallas trifásicas.

Se recurre entonces a una doble característica como la mostrada en la fig. 30 para un caso cuadrilateral (aunque se puede aplicar a cualquier característica). su acción se basa en el hecho que la velocidad de cambio de la impedancia aparente desde un punto carga normal hasta un punto de falla es mucho mayor que el cambio de la misma en caso de oscilación de potencia (power swing).

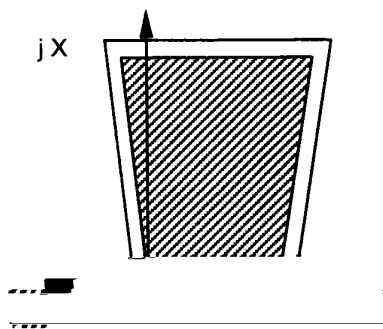


Fig. 30

Si la impedancia aparente cae dentro de ambas características en forma prácticamente simultánea, el relé opera. Si transcurre un cierto tiempo desde que cae dentro de la característica exterior hasta que llega dentro de la interior se trata de una oscilación de potencia y el relé se bloquea.

9. Esquemas de enlace entre protecciones de distancia

Hasta aquí se analizaron los relés de distancia, actuando independientemente uno de otro, en forma coordinada en su escalonamiento, pero con actuación por orden propia. Existen sin embargo sistemas de protección interdependientes, que son aquellos cuyas decisiones de desenganche dependen de informaciones recibidas desde otros puntos de la red. En estos casos se deben disponer los elementos de enlace necesarios para la transmisión de la información.

La interconexión de las protecciones instaladas en ambos extremos de una línea, trae las siguientes ventajas:

- Menores tiempos de eliminación de fallas.
- Mayor confiabilidad en la orden de desenganche.
- Permite los recierres automáticos a lo largo de toda extensión de la línea.
- Resuelve problemas de estabilidad del sistema.

El enlace se puede llevar a cabo de diversas maneras. Las más usadas son: onda portadora, pares telefónicos, microondas, hilo piloto y últimamente fibra óptica. Estos enlaces tienen un número variable de canales de comunicación, para transportar la información de un extremo a otro de la línea. A continuación se efectuará un breve análisis de los distintos métodos de interconexión entre protecciones de distancia.

9.1 Transferencia de desenganche por subalcance autorizado

En este esquema de protecciones los relés de distancia son ajustados de manera de cubrir en su menor tiempo de operación el 85% del tramo de la línea protegida.

En la fig. 31 se representa el esquema utilizado. La compuerta "Y" indicada en dicha posee también dos terminales de entrada y uno de salida. Se obtendrá señales en el terminal de salida si y solo si aparece señales en ambos terminales de entrada.

En ambos extremos de línea se instalan relés de arranque por sobrecorriente y/o subimpedancia que detectan todo tipo de anomalías a lo largo del 100% de la línea. Estos elementos de arranque en muchos casos forman parte de los relés de distancia.

En caso de actuación del relé de distancia, este último enviará una señal al extremo opuesto de la línea que abrirá el interruptor remoto siempre que allí el relé de arranque haya sido previamente excitado.

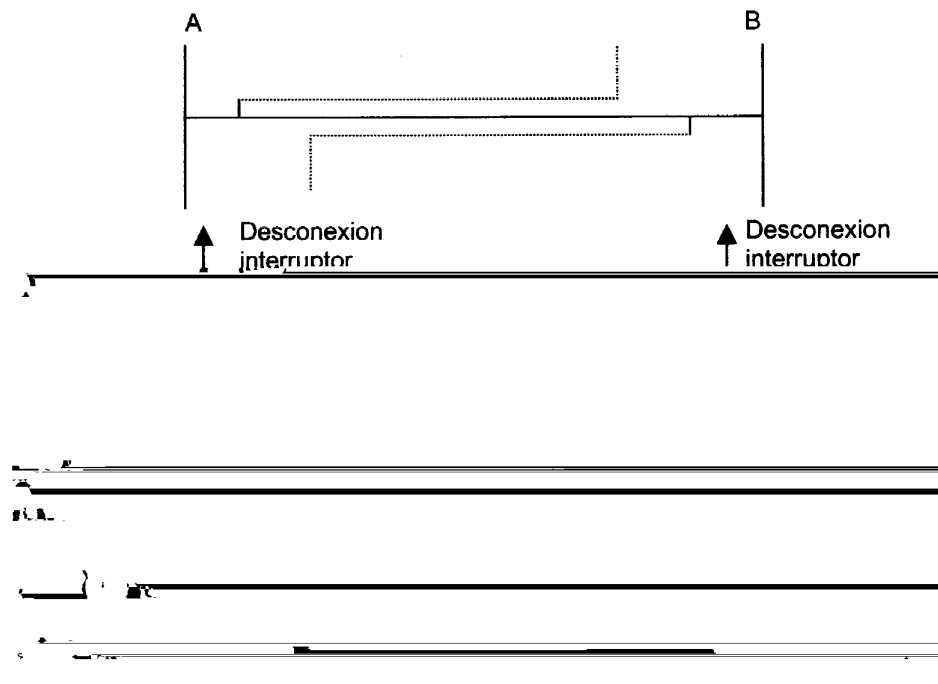


Fig. 31

9.2 Interdesenganche o interdisparo

El interdesengache o interdisparo directo consiste en la desconexión de un interruptor local por orden de la protección remota. El principal inconveniente es el elevado grado de seguridad que se requiere del sistema de enlace.

En la fig. 32 se observa un tramo de línea con dos relés de distancia, y el símbolo de la compuerta "O", que actúa con 2 señales de entrada y una de salida, las dos entradas son las señales de desenganche remota local, la compuerta actúa cuando aparece una o las dos señales.

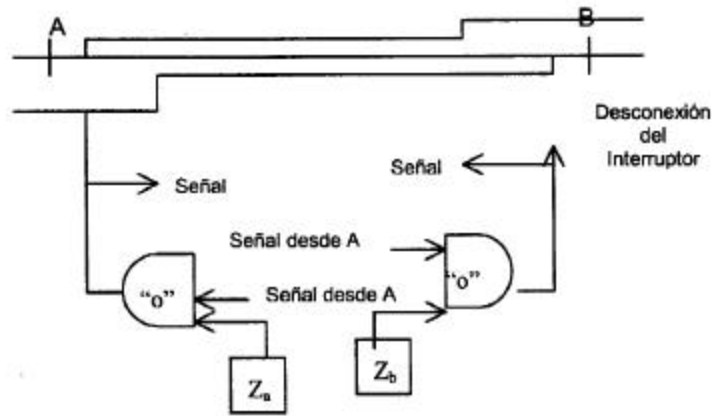


Fig. 32

9.3 Aceleración de Etapa

El esquema de protección en este caso implica que la primera Zona está ajustada hasta del 85% del tramo de línea desde ambos extremos, y la protección de segunda Zona sobrepasando el extremo opuesto de la línea (fig. 33):

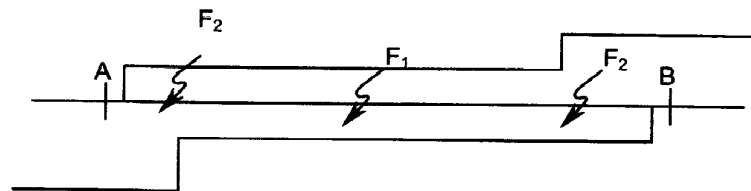


Fig. 33

Entonces si se produce una falla en la 20na común (F, en el siguiente esquema), las dos protecciones actúan produciendo el desenganche en el primer escalón, instantáneo. Si la falla ocurre en F2 una protección actúa en primera zona, y la otra recién en el tiempo correspondiente a la segunda zona de medición (0,4 seg). Después).

En el esquema de aceleración, la interconexión se efectúa de tal manera que cualquiera de los dos extremos que mida una falla en la 1era. Zona envía una señal al otro extremo, a los efectos de disminuir el tiempo de actuación de la protección al mínimo. Mediante este esquema de protección una vez que actuó la protección frente a una falla en F, la otra operará a los 15-20ms. después.

La señal enviada por el relé que actuó hará un puente en la temporización de 2da. Etapa, como se esquematiza en la fig. 34:

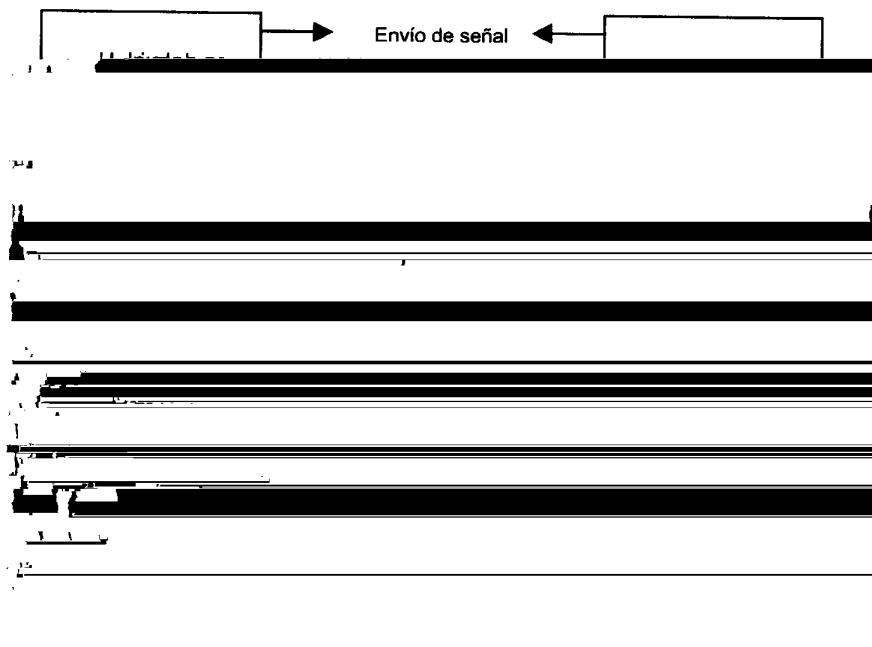


Fig. 34

10. Recierre automático en líneas de transmisión de energía eléctrica

El recierre automático es la operación de cierre de un interruptor, luego de un retardo preestablecido, que se realiza en forma automática después de la apertura del mismo, ordenada por el sistema de protecciones asociado. Esta operación se realiza en líneas aéreas de transmisión y distribución.

10.1 Recierres en las líneas de Transmisión. Características de las Fallas

Este tipo de recierre no se aplica en sistemas muy mallados o con varias líneas en paralelo, ya que pueden presentarse problemas de estabilidad. Esto dependerá de los parámetros del sistema y hay que analizar qué ocurre si la falla es permanente.

El recierre automático en las líneas de transmisión es una práctica muy utilizada en todo el mundo, dado que mejora la confiabilidad del sistema eléctrico. Esto es así ya que como lo ha demostrado la experiencia, la mayor parte de las fallas en una línea aérea son transitorias y desaparecen luego de un pequeño tiempo. Por lo tanto, si se ajusta adecuadamente el tiempo entre la apertura ordenada por las protecciones y el recierre automático del interruptor, la falla habrá desaparecido y el servicio se mantendrá.

Las descargas de origen atmosférico son las fallas más comunes de este tipo. Las sobretensiones que se inducen en las líneas producen descargas en los aisladores que pueden autoextinguirse.

Otro tipo de fallas transitorias se debe a fallas por oscilación de conductores por acción del viento. También existen fallas temporarias producidas por contacto de pájaros, ramas de árboles, etc.

Dado que las fallas de origen atmosférico son fallas que varían según cada región climática, existen algunas diferencias dependiendo de la zona, pero en general se puede esperar que en líneas de alta y muy alta tensión el 80 ú 85 % de las fallas sean transitorias.

10.2 Recierre Trifásico

En el cierre trifásico, ante una falla de cualquier tipo, el sistema de protecciones abre el interruptor en forma trifásica, y luego del periodo muerto o también llamado tiempo muerto, el mismo se recierra. Durante el tiempo que la línea queda desconectada, en el lugar de descarga existe una zona de gas altamente ionizado que va disminuyendo hasta desaparecer. Si se aplica tensión antes que desaparezca dicha nube gaseosa, la misma servirá como canal de descarga y el recierre resultará no exitoso. Por lo tanto, el tiempo muerto de recierre tendrá que tener en cuenta la característica del tiempo de extinción del arco. Este tiempo para las aperturas trifásicas depende de:

1. Condiciones climáticas (viento y temperatura) .
2. Tensión de restablecimiento (módulo y velocidad de crecimiento).
3. Configuración del lugar de descarga.

En las líneas de muy alta tensión de los Estados Unidos, donde se utiliza en su mayoría recierre trifásico, el tiempo muerto empleado es del orden de 400 ms. En particular, según el nivel de tensión podremos tener:

345 kV	350-430 ms
500 kV	370-500 ms
765 kV	470 ms

La práctica de este tipo de recierre era realizada sin restricciones, salvo aquellas inherentes a problemas de estabilidad; en la actualidad estudios realizados recientemente han demostrado que los recierres ultrarrápidos producen solicitaciones en los ejes de grandes generadores de turbinas de vapor. Las solicitaciones producidas son vibraciones torsionales que fatigan los ejes del conjunto generador- turbina; el deterioro que se produce es de tipo acumulativo, por lo que, superado el límite admisible para la vida útil de la máquina, pueden por este fenómeno ocasionarse daños de gravedad. Se recomienda, por lo dicho, no emplear recierres ultrarrápidos en las cercanías de centrales con grandes generadores de turbinas a vapor; o, de hacerlo, prever un tiempo muerto retardado (aproximadamente 10 segundos) para que las oscilaciones producidas se amortigüen.

En líneas de distribución que emplean recierres trifásicos, se suelen emplear tiempos muertos retardados del orden de 2 segundos a 3 minutos, en aquellas líneas en las que hay alimentación desde ambos extremos, se necesita chequear el sincronismo antes de ordenar el cierre.

10.3 Recierre monofásico

En general el esquema de apertura y recierre monofásico es el siguiente:

- Cuando ocurre una falla monofásica en una línea de transmisión, los sistemas de protecciones en cada uno de los extremos, mandan la apertura de los polos de los interruptores correspondientes a la fase fallada y, luego de un tiempo muerto preestablecido, el equipo de recierre ordena el cierre de los mismos. Si la falla persiste, las protecciones producen la apertura trifásica y definitiva.
- Si se hubiese tratado de una falla polifásica, las protecciones ordenan apertura trifásica sin habilitación de recierre alguno.

A pesar que sólo se recierre para fallas monofásicas, la confiabilidad que se logra sigue siendo muy buena, ya que, estadísticamente, en las líneas de alta y muy alta tensión la mayoría de las fallas son monofásicas. Un ejemplo de esto es el siguiente cuadro de resultados de un estudio realizado en la red eléctrica sueca y norteamericana entre 1967 y 1973:

Tipo de falla	Nivel de Tensión		
	500kV	400kV	200kV
Monofásica	93%	70%	56%
Bifásica	6%	23%	27%
Trifásica	1%	7%	17%

Por otro lado con recierre monofásico se logra un mejoramiento de la estabilidad del sistema. En nuestro país se ha adoptado este sistema en las líneas de alta tensión, también en Europa es el sistema de recierre más frecuentemente usado. Como en los casos de las aperturas y recierres trifásicos, el tiempo de recierre es función del tiempo de desionización del arco de falla. Sin embargo en este caso, donde sólo se abre la fase fallada, la misma queda acoplada capacitiva e inductivamente a las fases sanas que permanecen bajo tensión. Debido a este acoplamiento se producen los siguientes efectos:

- No se produce la extinción del arco dado que la corriente de acoplamiento, llamada corriente de arco secundaria, alimenta la falla.
- Cuando la corriente de arco pasa por cero por acoplamiento, se produce una tensión de restablecimiento a través de los puntos de descarga.

La componente capacitiva de la corriente de arco secundaria se debe a la capacidad de acoplamiento entre fases; su valor depende de la estructura de la línea y de la tensión del sistema. La componente inductiva se debe al flujo de corriente por las fases sanas. Para líneas de menos de 300 kM la componente principal es la capacitiva. La capacidad de acoplamiento aumenta proporcionalmente con la longitud de la línea, de ahí que la corriente secundaria de arco dependa de la misma. El proceso de autoextinción de la corriente de arco secundario, se debe a que la densidad iónica dentro del gas no es uniforme, lo que provoca un camino de arco curvado; una vez que comienza a curvarse se alarga debido a la fuerza electromagnética producida.

Al aumentar la longitud del arco crece la tensión y la potencia, si la energía no es suficiente, el arco secundario se extingue. Puede resultar que el tiempo de extinción (y por ende el tiempo muerto de recierre) sea demasiado grande y comprometa la estabilidad del sistema, por lo que se necesita su reducción. El método más usual para ello es el empleo de un reactor de neutro. El reactor de neutro compensa la corriente capacitiva acoplada entre las fases sanas y la fase abierta. En la siguiente fig. se muestra la forma de conexión del reactor de neutro, utilizada en nuestro país en la red de 500 kV y líneas de 220kV:

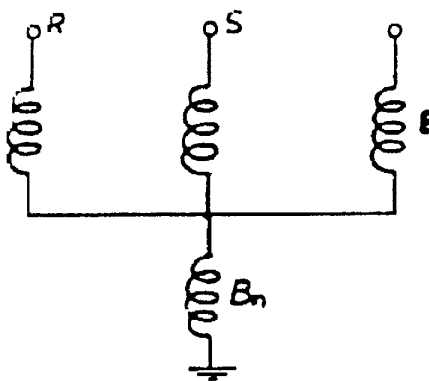


Fig. 35

Dado que el tiempo de extinción del arco secundario depende de la corriente de arco secundario y de la tensión de restablecimiento, se tiene por experiencias y fórmulas empíricas, para distintos valores de los mismos, tiempos de extinción característicos.

10.4 Sistema de protecciones asociado a los esquemas de recierre

El éxito del recierre tanto trifásico como monofásico, depende en gran parte de la velocidad de operación de las protecciones y los interruptores, ya que la ionización en el camino de falla es menor.

Con recierres de tipo ultrarrápido (tiempos muertos menores de 800 ms) es necesario que las protecciones posean un esquema de enlace para poder abrir en forma simultánea ambos extremos de la línea. En los esquemas monofásicos y, a diferencia de los trifásicos, las protecciones de línea deben ser capaces de individualizar adecuadamente la fase fallada para poder ordenar su apertura.

Cuando se energiza una línea en presencia de una falla, el recierre debe estar bloqueado. Esto se realiza teniendo en cuenta que si el interruptor es cerrado en forma manual el sistema de recierre es bloqueado durante un tiempo preestablecido.

10.5 Recierres múltiples

Con esquemas de recierres trifásicos, se efectúa en algunos casos recierres múltiples. Esto es si luego del primer recierre la falla persiste. se recierra una segunda vez, de esta forma hay sistemas que prevén hasta cuatro recierres. Los recierres posteriores al primero son por lo general retardados (2 seg - 3 min.) .

Este tipo de operación sólo se aplica en sistemas donde no hay compromisos de estabilidad; además se debe tener en cuenta que en las líneas de alta tensión sólo el 10 % de los segundos recierres pueden resultar exitosos. Aplicar más de dos recierres es sumamente raro (salvo en distribución) ya que se compromete mucho las instalaciones, en particular los interruptores.

10.6 Circuito del interruptor

El interruptor debe tener el sistema de mecanismo de apertura y la capacidad de apertura adecuadas para permitir las secuencias de recierre previstas. En el caso monofásico el interruptor debe poder ser abierto por fase en forma independiente.

En el caso de recierres múltiples, la capacidad del interruptor debe ser apta para permitirlo. En la elección de un ciclo de recierre entra también en juego el mantenimiento del interruptor, ya que el mismo dependerá de la cantidad de interrupciones efectuadas.

ANEXO PROTECCIONES DISTANCIOMÉTRICAS

FORMACIÓN DE LAS CARACTERÍSTICAS DE LOS RELÉS DE DISTANCIA

Tomando como ej. la protección de impedancia, si Z_R es la impedancia de ajuste, el relé debería operar si $Z_R \geq V/I$ o es lo mismo $I \cdot Z_R \geq V$. Esta comparación se podría obtener de un comparador de amplitud el cual opera, en la versión electromagnética como se indica en la fig. a1:

Fig. a1 Relé basado en un comparador de amplitud

Sin embargo, es dificultoso realizar una correcta comparación de amplitud bajo condiciones de falla cuando el desfase entre V e I tiende a 90° y hay presente transitorios que tienden a distorsionar los valores eficaces de V e I . Por ello el uso de comparadores de amplitud es limitado y es más conveniente comparar dos señales por su diferencia de fase. El siguiente análisis muestra que para dos señales S_o y S_r que pueden ser comparadas en magnitud existe otras dos señales S_1 y S_2 que pueden ser comparadas por fase. La relación entre tales señales es las siguientes:

$$\begin{aligned} S_o &= S_1 + S_2 \\ S_r &= S_1 - S_2 \end{aligned} \quad (1)$$

De la ec. 1:

$$\begin{aligned} S_1 &= \frac{(S_o + S_r)}{2} \\ S_2 &= \frac{(S_o - S_r)}{2} \end{aligned} \quad (2)$$

La comparación de amplitudes está dada por:

$$\begin{aligned} |S_o| &\geq |S_r| \\ |S_1 + S_2| &\geq |S_1 - S_2| \end{aligned} \quad (3)$$

Definiendo S_1 / S_2 como C , la relación 3 se puede expresar como:

$$|C + 1| \geq |C - 1| \quad (4)$$

Graficando C en el plano complejo (fig. a2) se puede observar que (4) se satisface en el semiplano de la derecha el cual está definido por todos los puntos $C \in q$ que cumplan la condición $-90^\circ \leq q \leq +90^\circ$. Dado que $C \in q = (S1 \in a) / (S2 \in b)$, la relación 4 se satisface cuando:

$$-90^\circ \leq \alpha - \beta \leq +90^\circ \quad (5)$$

Fig. a2 Comparación de fases en el plano complejo; $C = S1/S2$

Esta última relación demuestra que dos señales obtenidas para su comparación de amplitud se pueden convertir para ser utilizadas en un comparador de fase; en lo que sigue se obtendrán las características de operación de los distintos tipos de relés.

A1) Relé de impedancia

Como se vio, este relé opera para todos los valores de impedancia medida menor que la impedancia de ajuste, es decir para todos los puntos dentro del círculo con centro en el origen. Para que trabaje como un comparador de fase, se deben asignar a S_o y S_r las siguientes señales:

$$\begin{aligned} S_o &= I * Z_R \\ S_r &= K * V \end{aligned} \quad (6)$$

La constante K tiene en cuenta los T_I y T_V . Las señales para la comparación de fase son:

$$\begin{aligned} S1 &= K * V + I * Z_R \\ S2 &= -K * V + I * Z_R \end{aligned} \quad (7)$$

Luego dividiendo por KI :

$$\begin{aligned} S1 &= Z + Z_R / K \\ S2 &= -Z + Z_R / K \end{aligned} \quad (8)$$

Donde $Z = V/I$; la división por KI no afecta la relación o diferencia de fase entre ambas señales. Luego trazando Z_R / K y con las ec. 8 se obtiene el lugar de los puntos Z tales que θ , diferencia de ángulo entre $S1$ y $S2$, cumpla que la condición $-90^\circ \leq \theta \leq +90^\circ$.

En las figs. a3, a4 y a5 se muestra las situaciones para $q = 90^\circ$, $q < 90^\circ$ y $q > 90^\circ$ respectivamente.

Fig. a3 Formación de la característica de operación usando comparador de fase

Fig. a4 Punto Z dentro de la características de operación

Fig. a5 Punto Z fuera de la características de operación

A2) Relé direccional

Detectan si la impedancia medida está en un semiplano y son utilizados conjuntamente con otros tipos, por ej. con el de impedancia para obtener un semicírculo como característica de operación. Las señales formadas para la comparación de fase son:

$$\begin{aligned} S1 &= K \cdot V \\ S2 &= Z_R \cdot I \end{aligned} \quad (9)$$

Dividiendo por KI:

$$\begin{aligned} S1 &= Z \\ S2 &= Z_R / K \end{aligned} \quad (10)$$

La zona de operación está definida luego por los valores de Z que den lugar a $\varphi < 90^\circ$ (fig. a6)

Fig. a6 Zona de operación del relé direccional

A3) Relé de reactancia

Mide solo la componente reactiva de Z y su ajuste sería por lo tanto X_R ; luego el par de señales al comparador de fase sería:

$$\begin{aligned} S1 &= -K*V + X_R * I \\ S2 &= X_R * I \end{aligned} \quad (11)$$

Y dividiendo por KI:

$$\begin{aligned} S1 &= -Z + X_R / K \\ S2 &= X_R / K \end{aligned} \quad (12)$$

La característica de operación sería todos los Z tal que $q < 90^\circ$. Así resulta como límite de la zona de operación una línea recta paralela al eje R con valor X_R/K . (fig. a7)

Fig. a7 Zona de operación del relé de reactancia

Este relé anda bien con alimentación a la falla desde un extremo. Cuando se produce una falla con resistencia de falla óhmica pura R_f alimentada por ambos extremos, se produce un falseamiento de la medición de X debida a la caída de tensión en R_f producida por la suma de las corrientes de falla desde ambos extremos, como se muestra en la fig. a8.

Fig. a8 Tensión medida por un relé de reactancia en la presencia de falla con resistencia de arco R_f

Esta reactancia aparente puede ser negativa o positiva sumándose o restándose a la medida. Si la R_f es grande en comparación con la reactancia de la línea el efecto podría ser muy serio.

A4) Relé Mho

Combina las propiedades de impedancia y direccional. Su característica es inherentemente direccional y el relé opera solo para fallas por delante de su ubicación y tiene la ventaja que el alcance varía con el ángulo de falla. Para obtener la característica se compara las fases de las siguientes señales (fig. a9 y a10):

$$\begin{aligned} S1 &= -K \cdot V + Z_R \cdot I \\ S2 &= K \cdot V \end{aligned} \quad (13)$$

Div. por $K \cdot I$:

$$S1 = -Z + Z_R / K$$

$$S_2 = Z \quad (14)$$

Fig. a9 Característica de operación de un relé Mho ($\phi = 90^\circ$)

Fig. a10 Impedancia Z dentro de la zona de operación ($\phi < 90^\circ$)

A5) Relés con característica poligonal

Proveen un alcance extendido para cubrir la resistencia de fallas en particular para líneas cortas donde la posición de la resistencia de la línea puede ser ajustada dentro de la característica (fig. a11).

Esta característica se obtiene con tres elementos de medición independientes: reactancia, resistencia y direccional, combinándose adecuadamente. El relé opera cuando los tres elementos hayan operado.

Fig. a11 Característica de operación

FALSEAMIENTO DE LA MEDICIÓN DE IMPEDANCIA

B1) Efecto de fuente intermedia (infeed) en relés de distancia

Analizando el caso ilustrado en la fig. b1 se puede apreciar que la impedancia vista por el relé A para una falla más allá de la barra B es mayor de la que realmente existe. En efecto, si ocurre una falla franca a tierra en F, la tensión en A sería:

$$V_A = I_A * Z_A + (I_A + I_B) * Z_B \quad (15)$$

luego:

$$\frac{V_A}{I_A} = Z_A + \left[1 + \frac{I_B}{I_A} \right] * Z_B \quad (16)$$

Fig. b1 Efecto de infeed

B2) Efecto de la resistencia de arco

Para una falla sólida o franca, la impedancia medida por el relé es igual a la impedancia hasta el punto de falla. Sin embargo, la mayoría de las fallas involucran un arco eléctrico o una impedancia. Se ha comprobado que para estos tipos de falla la corriente de falla está en fase con la caída de tensión en el arco lo cual indica que la impedancia de falla es resistiva pura. Además la resistencia total de falla está compuesta por la resistencia total de arco más la resistencia del terreno. Las fallas con arco de falla son críticas cuando se producen cerca de los límites de la zona de protección del relé; no obstante la impedancia de la línea cae dentro de la característica de operación, la presencia de la resistencia del arco puede hacer caer la Z medida fuera de la característica (fig. b2).

Fig. b2 Subalcance de un relé de impedancia debido a la resistencia de falla

Para solucionar parcialmente este efecto se desarrollaron los relés con característica poligonal ya vistos.

B3) Compensación residual

Las unidades de tierra son alimentadas con tensiones de fase y una combinación de corrientes de fase y corrientes residuales las cuales dependen de la relación entre las impedancias de secuencia positiva y secuencia cero de la línea. Si ocurre un falla monofásica, por ejemplo la fase R, las redes de secuencia se conectan en serie y por lo tanto la tensión aplicada al relé es:

$$V_R = V_{R1} + V_{R2} + V_{R0} = I_{R1}(Z_{L1} + Z_{L2} + Z_{L0}) \quad (17)$$

y suponiendo $Z_{L1} = Z_{L2}$ se puede escribir:

$$V_R = V_{R1} + V_{R2} + V_{R0} = I_{R1} (2Z_{L1} + Z_{L0}) \quad (18)$$

Luego, dado que se trata de una falla monofásica es $I_R = 3 * I_{R1}$. La relación V_R/I_R es por lo tanto $(2Z_{L1} + Z_{L0})/3$, lo cual es diferente a la impedancia de sec. positiva Z_{L1} .

El valor de corriente residual a ser inyectada es calculada de tal forma que un relé que este ajustado para medir impedancia de sec. positiva de la línea opere correctamente. Por lo tanto aplicando las corrientes de línea y residuales al relé se tendría:

$$I_R + 3 * K * I_{R0} = I_R (1 + K) \quad (19)$$

y

$$\frac{V_R}{I_R (1 + K)} = Z_{L1} \quad (20)$$

Reemplazando V_R/I_R da:

$$\frac{2Z_{L1} + Z_{L0}}{3} = Z_{L1} (1 + K) \quad (21)$$

De lo cual resulta K:

$$K = \frac{Z_{L0} - Z_{L1}}{3Z_{L1}} \quad (22)$$