

CAPITULO 7

PROTECCION DE LÍNEAS DE TRANSMISIÓN

INTRODUCCION

El elemento más susceptible de fallas en una red eléctrica es la línea de transmisión, ya que está expuesta por su longitud a las condiciones climatológicas y ambientales.

El 95% de las fallas ocurren de una fase a tierra, bien por descargas atmosféricas o por problemas de aislamiento, contaminación, animales, hilos de guarda caídos y vandalismo.

Los requerimientos para una protección de líneas son básicos:

-Deberán ser selectivos, es decir, únicamente se librerá el tramo de línea afectado por la falla.

-Deberán ser de operación rápida, de tal forma que los daños al equipo se reduzcan al mínimo y se eviten problemas de estabilidad.

-Tendrán flexibilidad para que puedan seguir operando debidamente aún con cambios en la configuración del sistema de potencia.

-La impedancia de un línea de transmisión con determinadas características y configuración de los conductores, es proporcional a la longitud. Esta realidad ofrece la factibilidad del relevador de distancia.

Ya que la protección de líneas de transmisión puede efectuarse con relevadores de sobrecorriente, con relevadores de distancia y con relevadores tipo piloto. A continuación haremos una breve descripción de cada una de ellas.

PROTECCIÓN DE LÍNEAS DE TRANSMISIÓN CON RELEVADORES DE SOBRECORRIENTE.

OBJETIVO.

El objetivo del presente es dar los lineamientos generales y factores que deben considerarse en la aplicación de los relevadores de sobrecorriente no direccionales y direccionales en líneas de transmisión, alimentadores de distribución e industriales de los sistemas eléctricos; así como la coordinación de estas protecciones para lograr una buena selectividad.

APLICACIÓN DE LOS RELEVADORES DE SOBRECORRIENTE.

La protección de sobrecorriente es la más sencilla y la más económica, la más difícil de aplicar y la que más rápido necesita ajuste o reemplazo a medida que cambia el sistema.

Se le utiliza en general de la siguiente forma:

- a) Protección contra fallas de fase.
- b) Protección contra fallas de tierra.

Además de que estos relevadores son para protección de fase y de tierra, se utilizan de la siguiente forma:

I) Relevadores de sobrecorriente no direccionales.

. De sobrecorriente con unidad de tiempo (51)

51 - 52 - Característica de tiempo inverso.

53 - 54 - Característica de tiempo muy inverso.

77 - 78 - Característica de tiempo extremadamente inverso.

. De sobrecorriente direccional con unidad de tiempo (67)

- Característica de tiempo inverso.

- Característica de tiempo muy inverso.
- Característica de tiempo extremadamente inverso.

De sobrecorriente direccional instantáneo.

Cuando se trata de un relevador de sobrecorriente de tiempo, pero es de tierra, únicamente se le agrega la letra N. (51N).

Su aplicación es básicamente a circuitos de servicio propio de una subestación, en circuitos de distribución de servicio eléctrico, en sistemas industriales y en algunas líneas de transmisión donde no puede justificarse el costo de la protección de distancia, o como respaldo en las líneas donde tienen protección por hilo piloto como protección primaria.

SELECCIÓN DE LA CARACTERÍSTICA DE TIEMPO.

Cuando menor es el cambio en la magnitud de la corriente de corto circuito con cambios en la capacidad de generación conectada, para una falla en un punto dado, mayor será el beneficio que puede obtenerse de la mayor inversidad.

En la protección de circuitos de distribución de servicio eléctrico, puede aprovecharse la máxima ventaja de la característica de tiempo inverso debido a que la magnitud de la corriente de falla depende, la mayoría de las veces de la localización de ésta y se mantiene prácticamente inafectada por cambios en la generación o en el sistema de transmisión de alta tensión. No solo por esta razón pueden utilizarse los relevadores con curvas extremadamente inversas sino que también proporcionan la mejor selectividad con fusibles y restauradores. Resumiendo podemos decir lo siguiente respecto a la aplicación de la característica de tiempo:

- 1) Característica de tiempo inverso.- Se utilizan generalmente, con los mejores resultados, cuando la magnitud de la corriente de corto circuito, al ocurrir la falla, depende de gran parte de la capacidad de generación del sistema.
- 2) Característica de tiempo muy inverso.- Se utiliza más adecuadamente en sistemas donde la magnitud de la corriente de corto circuito depende principalmente de la posición relativa respecto al punto donde se ha producido la falla y muy poco o casi nada de las características de generación del sistema.
- 3) Característica de tiempo extremadamente inverso.- Son excelentes para aplicaciones en las que se necesite suficiente retardo para permitir a un circuito recerrar una suma de cargas que han estado desconectadas sin disparos innecesarios durante el período de cierre y al mismo tiempo coordinar adecuadamente con fusibles.

APLICACIÓN DE RELEVADORES DE SOBRECORRIENTE INSTANTÁNEA

Los relevadores de sobrecorriente instantáneos se pueden aplicar si la magnitud de la corriente de falla bajo condiciones de máxima generación alcanza un valor aproximadamente el triple a medida que la falla se mueve desde el extremo lejano de la línea hacia la posición del relevador.

Con la protección de sobrecorriente instantánea en ambos extremos de la línea, se obtiene el disparo simultáneo en estos bajo condiciones de máximo generación, en las fallas en la parte media de la misma.

RELEVADORES DIRECCIONALES

La protección de sobrecorriente se hace direccional para simplificar el problema de obtener la selectividad cuando puede fluir la misma magnitud de la corriente de falla en cualquier dirección en la localidad del relevador. Todos los relevadores de sobre corriente direccionales deberán tener la característica de control direccional, con lo cual la unidad de sobrecorriente no empieza a funcionar hasta que la unidad direccional lo hace para el flujo en la corriente en la dirección en la que deberá de funcionar la primera.

Por lo general se prefieren relevadores direccionales de sobrecorriente monofásicos para protección contra fallas entre fases la razón principal es que la muy adecuada característica de "control direccional" se obtiene más sencillamente y con mayor seguridad con los relevadores direccionales de sobrecorriente monofásicos que con un polifásico direccional en combinación con monofásicos de sobrecorriente de tierra. Una ventaja menor de los, relevadores monofásicos, es que estos proporcionan un poco más de flexibilidad en la instalación de los tableros.

La ventaja de un direccional polifásico es que está menos expuesto que los monofásicos al mal funcionamiento ocasional. Para ciertas condiciones de falla, uno de los tres relevadores monofásicos puede desarrollar par en la dirección de disparo cuando éste pueda ser indeseable si la corriente de este relevador fuera bastante elevada para hacer funcionar la unidad de sobrecorriente, resultaría un disparo inadecuado. Ya que un relevador polifásico direccional funciona sobre el par neto de sus 3 elementos, un par invertido en uno de ellos puede equilibrarse por los otros dos, y por lo general resulta el par neto correcto.

COMO EVITAR EL MAL FUNCIONAMIENTO DEL RELEVADOR MONOFASICO DIRECCIONAL DURANTE FALLAS A TIERRA.

Bajo ciertas circunstancias, los relevadores monofásicos direccionales de sobrecorriente para la protección de falla de fase pueden originar el disparo innecesario en fallas a tierra en la dirección de no disparo

Las componentes de secuencia cero de la corriente de falla a tierra producen una tendencia hacia el mal funcionamiento. Todas estas corrientes están en fase, y cuando se utilizan transformadores de corriente conectados en estrella, siempre producen par de cierre de contacto en una de las 3 unidades direccionales, independientemente de la dirección en que fluya la corriente. En general, las otras componentes de la corriente de falla son capaces de "ahogar" el efecto de las componentes de secuencia cero. Pero, cuando la corriente de falla se compone principalmente a base de la componente de secuencia cero, el mal funcionamiento es más probable.

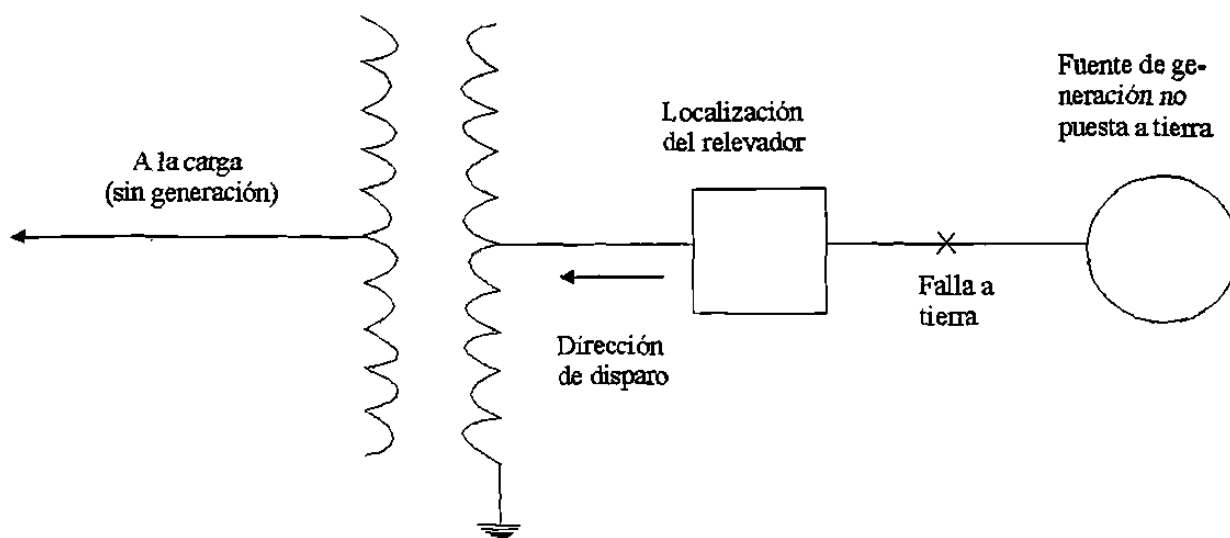


Figura 7.1

En la figura 7.1 se muestra el tipo básico de aplicación en la cual hay mayor propensión a que se produzca el disparo indeseado. Supongamos que se aplican las unidades direccionales de los relevadores para permitir el disparo solo en fallas a la izquierda de la localidad del relevador, como se indica por la flecha. Sin embargo una falla a tierra a la derecha, como la mostrada, originará que por lo menos una unidad direccional cierre su contacto y permita el disparo por su unidad de sobrecorriente. Depende de sus ajustes de puesta en marcha (pick up) y de tiempo el que dicha unidad dispare en realidad su interruptor, y de si toma suficiente

corriente para funcionar antes de que se retire la falla del sistema por algún otro relevador que se supone funcionará para esta falla.

Para evitar el mal funcionamiento en la situación mostrada en la figura 7.1, debe impedirse que los relevadores de fase respondan a la componente de secuencia cero, de la corriente. Esto se puede obtener mediante una derivación de la misma que utilice 3 transformadores de corriente auxiliares, como se muestra en la figura 7.2. Se hace hincapié en que el neutro de los relevadores de fase no deberá conectarse al neutro de los TC pues puede perderse parte de la efectividad de la derivación.

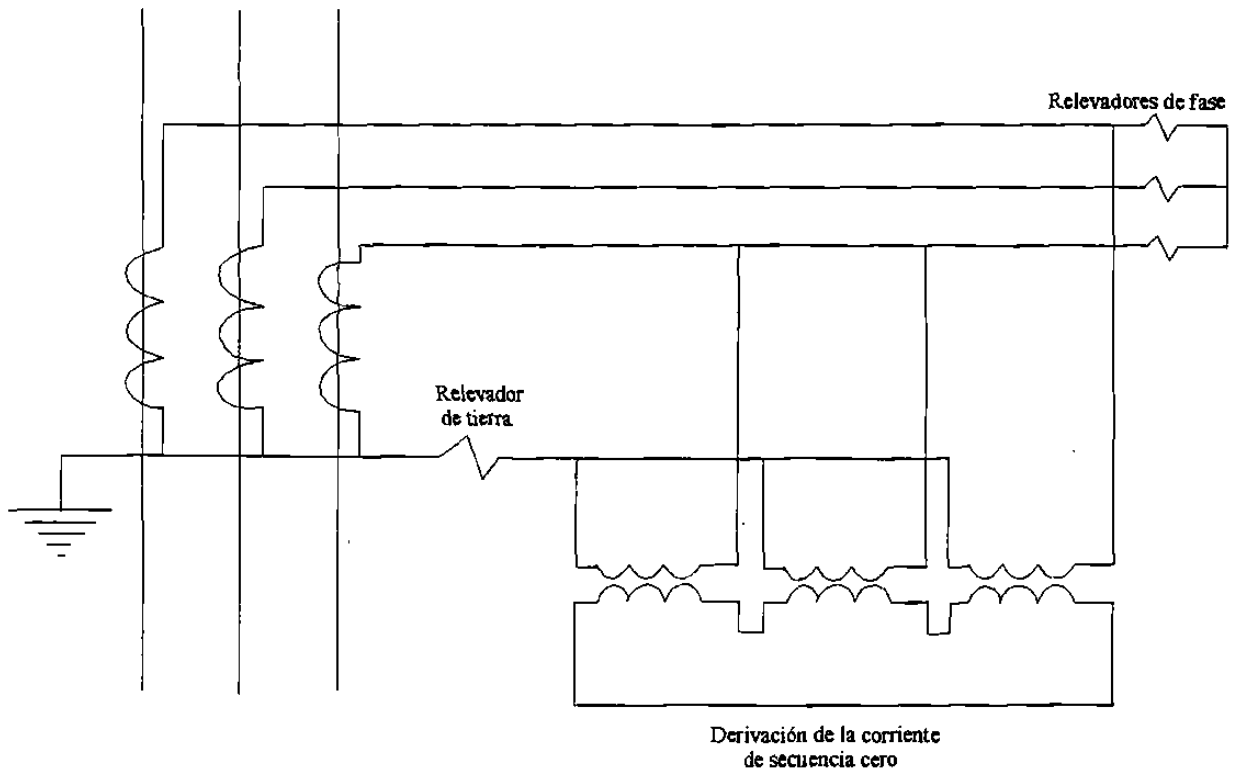


Figura 7.2

POLARIZACIÓN DE LOS RELEVADORES DIRECCIONALES DE TIERRA

Las unidades direccionales para relevadores de tierra pueden polarizarse de ciertas fuentes de corriente o tensión de secuencia cero, o de ambas en forma simultánea.

La figura 7.3 muestra un método para la obtención de la tensión de polarización del lado de baja tensión de un banco de transformadores de potencia con conexión Δ/Δ , que solo utiliza un transformador de potencial de alta tensión para establecer el neutro en el lado de baja.

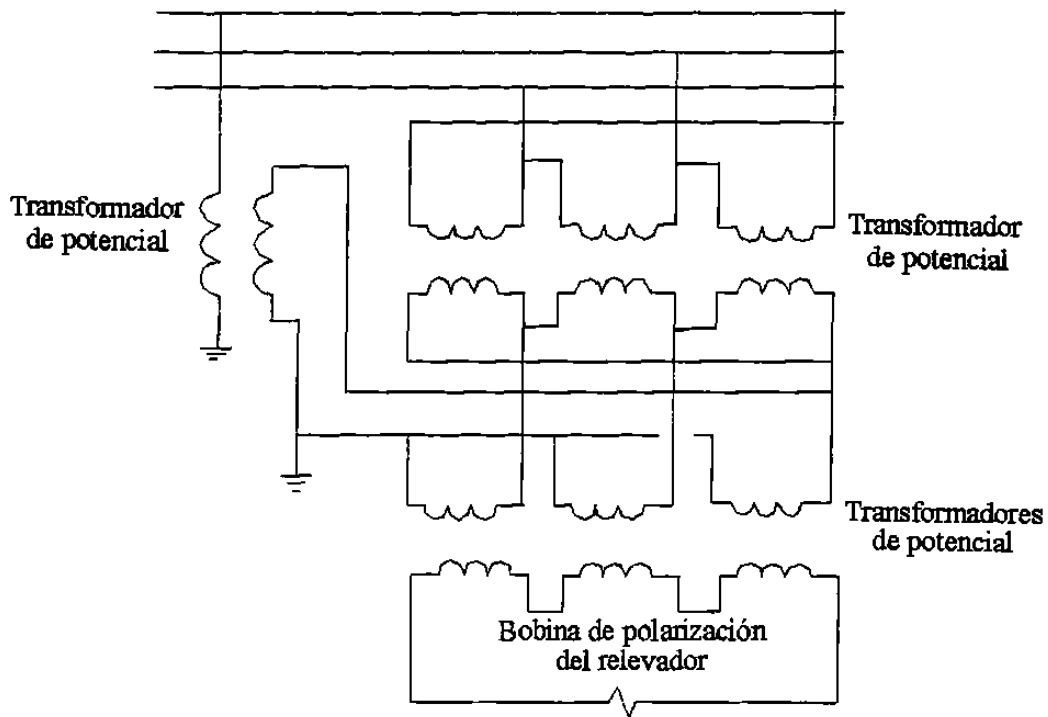


FIGURA. 3

Figura 7.3

La figura 7.4 muestra cómo puede obtenerse la corriente de polarización, a partir de la corriente del neutro puesto a tierra, de un banco trifásico de transformadores de potencia.

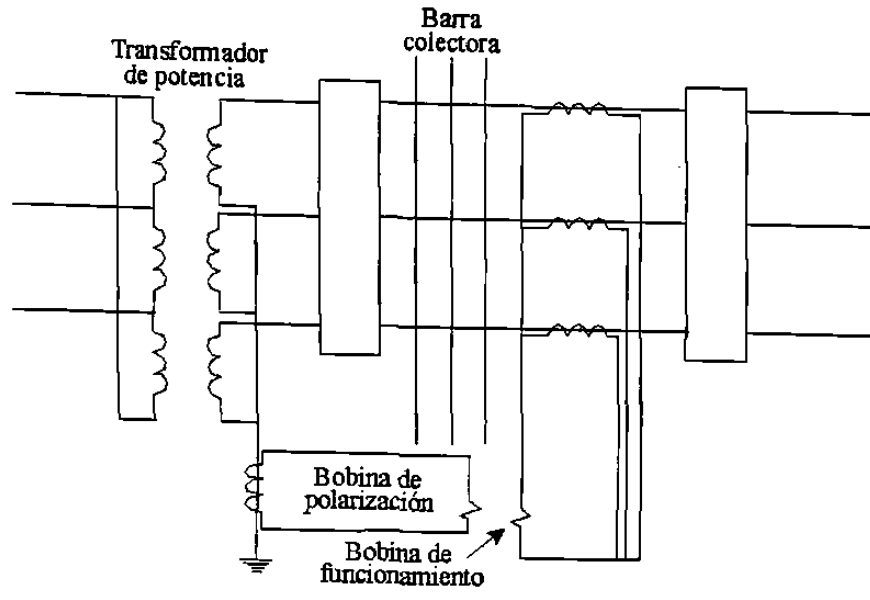


Figura 7.4

La corriente de polarización de los TC's en paralelo en los neutros puestos a tierras de dos o más bancos de transformadores se considera bastante segura si los bancos tienen interruptores separados de tal manera que siempre estará en servicio un banco.

Con un banco de transformadores de potencia de 3 arrollamientos λ / λ , los TC's de polarización deberán ponerse en los neutros puestos a tierra de ambos arrollamientos en estrella, y conectados en paralelo. Las relaciones de estos dos TC's deberán ser inversamente proporcionales a los valores nominales de la tensión en los arrollamientos en estrella.

Como una alternativa a los TC's del neutro con transformadores de dos o tres arrollamientos, puede utilizarse un solo TC,s en serie con uno de los arrollamientos en delta si estos no alimentan carga externa o no están conectados a una fuente de generación. Si hay conexiones externas a la delta, se requieren tres TC's, uno en cada uno de los arrollamientos. Estos TC's deberán ponerse en paralelo como se muestra en la figura 7.5

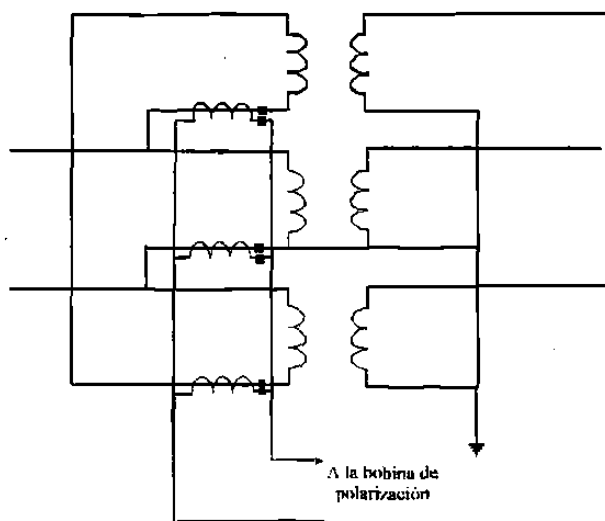


Figura 7.5

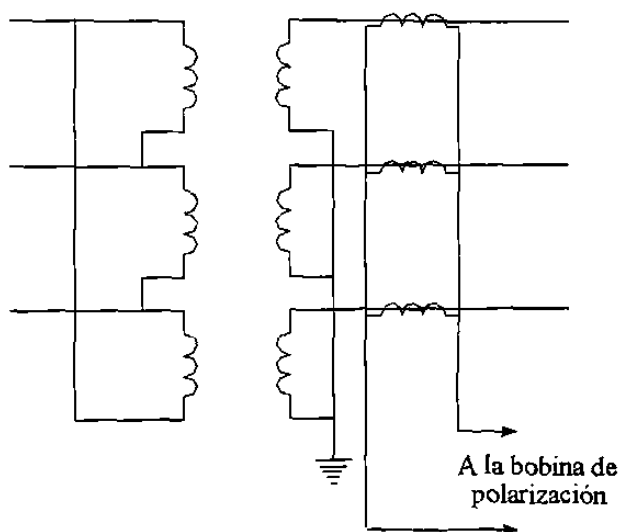


Figura 7.6

Como una segunda alternativa a los TC's del neutro, se puede utilizar la corriente del neutro de los TC's conectados en estrella, en serie con los arrollamientos en estrella, como se muestra en la figura 7.6.

En un banco de autotransformadores con un terciario en delta, puede emplearse cualquiera de las dos alternativas de los TC's en el neutro. Por lo general no se permite utilizar un TC en el neutro porque puede invertirse la corriente en éste en una falla de baja tensión en comparación con la que se obtiene en el mismo para una falla de alta tensión. Algunas veces la distribución de las corrientes de falla es tal que puede utilizarse un TC en el neutro; sin embargo, debe tomarse en cuenta que las condiciones pueden cambiar a medida que se hacen los cambios del sistema.

El valor nominal de la corriente primaria de un TC de neutro de arrollamiento delta utilizado para la polarización de las unidades direccionales de relevadores de tierra debe ser tal que las bobinas de polarización y funcionamiento de una unidad direccional tomen casi las mismas magnitudes de corriente para cualquier falla para las que deben operar.

Se dispone de relevadores direccionales que están diseñados para polarización simultánea por tensión y corriente. Aparte de simplificar el problema del ahorro de existencias almacenadas de relevadores, la polarización doble, como se le llama, tiene ciertas ventajas funcionales. Algunas veces, no son satisfactorias la corriente o la tensión solas, debido a que cualquier fuente puede desconectarse alguna vez del sistema, con lo cual se deja sin uso cuando aún se le necesita. Con la doble polarización, puede desconectarse cualquier fuente en tanto se deja en servicio la otra. De otro modo, sea la tensión o la corriente de polarización, proporcionan está en forma débil, pero las dos juntas aseguran una polarización fuerte.

UNIDADES DIRECCIONALES DE SECUENCIA NEGATIVA, PARA LA PROTECCIÓN A TIERRA,

Cuando no hay fuente de corriente o tensión de secuencia cero para la polarización de la unidad direccional de un relevador de tierra, es posible utilizar a menudo una unidad direccional de secuencia negativa, si se requiere protección de tierra separada. Sin embargo, se debe estar seguro de que se dispondrá de suficiente corriente y tensión de secuencia negativa, para garantizar la operación segura de dicha unidad para todas las condiciones en las que debe operar. En algunos sistemas que están puestos a tierra a través de impedancia, las cantidades de secuencia negativa pueden ser muy pequeñas.

Otra ventaja de las unidades direccionales de secuencia negativa es que no están afectadas por la inducción mútua entre circuitos paralelos cuando ocurren fallas a tierra.

A pesar de algunas ventajas que puede tener el relevador de secuencia negativa, solo se le utiliza como último recurso, debido a que el de secuencia cero es más fácil de probar, y porque produce un par más seguro en todas las condiciones en que es aplicable.

DOS CONTRA TRES RELEVADORES PARA PROTECCIÓN DE FASE.

En la práctica generalmente se utiliza un conjunto de dos o tres relevadores de sobrecorriente para la protección contra fallas entre fases y un relevador de sobrecorriente separado para las fallas a tierra.

El problema de considerar si se emplean dos o tres relevadores de sobrecorriente para la protección contra fallas entre fases y un relevador de sobrecorriente separado para las fallas a tierra.

El problema de considerar si se emplean dos o tres relevadores contra la protección de fallas de fase, surge por un deseo de evitar el gasto de un TC y un relevador, o al menos de el relevador, en ocasiones donde solo puede tolerarse un gasto mínimo para la protección de una línea.

La protección de sobrecorriente no direccional para fallas de fase puede proporcionarse por medio de dos relevadores alimentados por TC's de dos o tres fases. Sin embargo no será posible proporcionarla si los TC's en todas los circuitos no están localizados en las mismas fases como se muestra en la figura 7.7

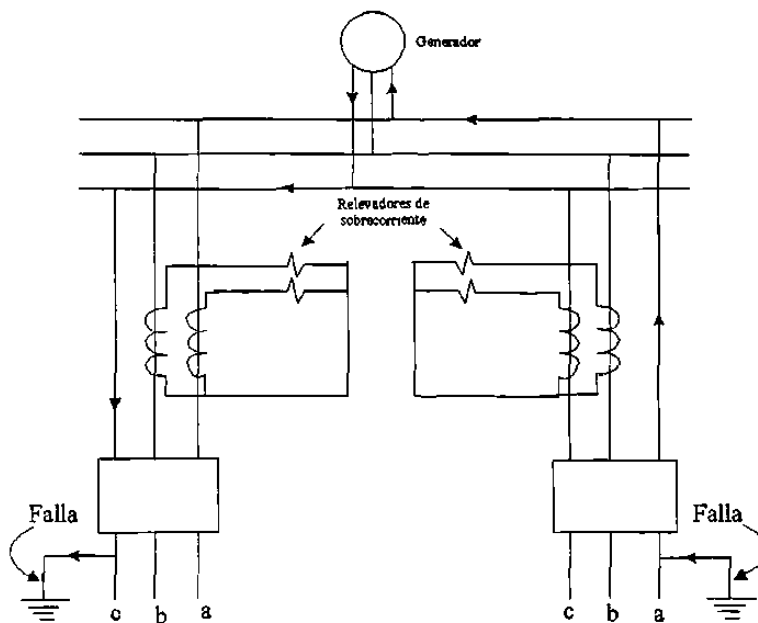


Figura 7.7

Se supone que el sistema mostrado en la figura 7.7 no está aterrizado. Las fallas a tierra simultáneas en fases diferentes de dos circuitos distintos constituirán una falla de fase a fase en el sistema y no operará ningún relevador de sobrecorriente.

Por otro lado si utilizamos únicamente dos transformadores de corriente, no podríamos lograr la protección completa contra fallas de fase y a tierra, ya que se logra si se utilizan tres transformadores de corriente con dos relevadores de fase y un relevador de tierra como se muestra en la figura 7.8

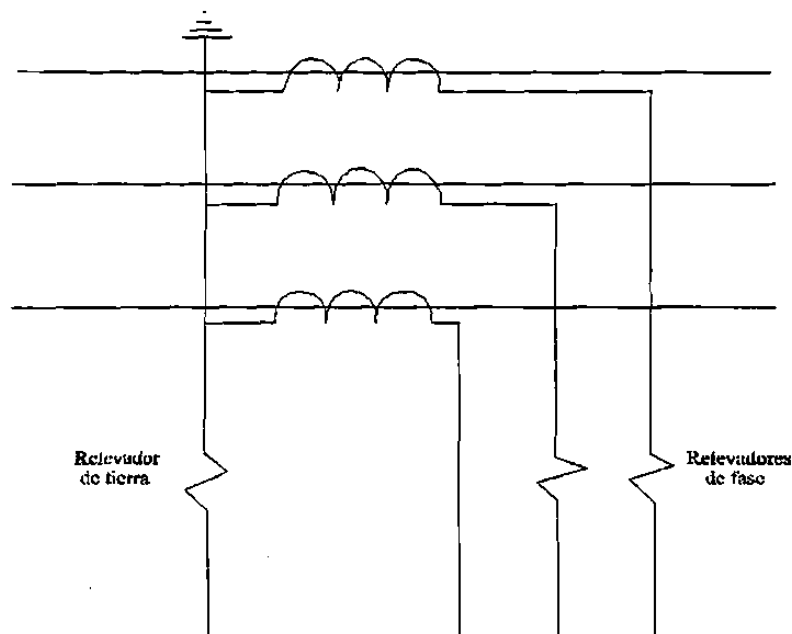


Figura 7.8

Si se utiliza la protección direccional de fase en dos fases únicamente en un sistema con neutro aterrizado, deben proporcionarse relevadores de tierra para la protección contra fallas a tierra.

Si la magnitud de la corriente de falla para fallas de fase no es varias veces la magnitud de la carga, deberán utilizarse tres relevadores direccionales de sobrecorriente monofásicos para asegurar el disparo cuando se desee.

Si se usan solo dos relevadores direccionales de sobrecorriente, deberán disponerse en conexión en la cuadratura. En esta asegura de uno de los dos relevadores que operará por debajo del límite de condiciones que existen cuando ocurren fallas cercanas a la localidad del relevador.

finalmente podemos decir que se utilizan 3 transformadores de corriente y 3 relevadores de fase siempre que sea justificable económicamente para evitar las dificultades anteriores debido que al menos siempre operará un relevador para todas las fallas entre fases.

FACTORES QUE AFECTAN EL AJUSTE DE LOS RELEVADORES DE SOBRE CORRIENTE

ERRORES TRANSITORIOS DE LOS TC's

El problema principal causado por los errores transitorios de los TC's es su efecto sobre los relevadores de sobrecorriente de tierra rápidos y sensibles. Este transformador efecto, llamado "corriente residual falsa" consiste en el flujo de grandes corrientes transitorias a través de la bobina del relevador de tierra en el neutro de los TC's, cuando no hay corriente de falla a tierra real en los primarios de los TC's. Esto sucede porque los TC's tienen errores diferentes debido a la componente de corriente directa en las corrientes primarias de falla, o debido a cantidades distintas de magnetismo remanente. Como consecuencia, si la corriente de falla a tierra está muy limitada por la impedancia del neutro y es necesario utilizar relevadores de tierra muy sensibles para detectar en forma segura las fallas a tierra, éstos deberán tener acción retardada o pueden funcionar en forma inadecuada en corrientes elevadas de fallas entre fases.

RESISTENCIA DE ARCO Y DE TIERRA

La resistencia de arco es la oposición al paso de la corriente en el momento de producirse el arco. La resistencia de arco puede o no existir. En ocasiones, puede presentarse una falla metálica sin arco.

Para corrientes abajo de los 1000 amp. la fórmula:

$$V = 8750 / I^{0.4}$$

da el valor máximo comunicado de volts eficaces (V) por pie para cualquier valor de la corriente eficaz de arco (I).

Para tomar en cuenta el alargamiento del arco por el viento, puede utilizarse la fórmula aproximada:

$$L = 3vt + L_0$$

donde:

L = longitud del arco, en pies.

v = velocidad del viento en millas por hora.

t = tiempo después de que se inició el arco en segundos.

L_0 = longitud inicial del arco, esto es, la distancia mínima entre conductores o a través de un aislador (pies).

La resistencia de tierra es la resistencia en la tierra. Esta resistencia se agrega a la de arco. Cuando no se utilizan hilos de guarda, o cuando éstos están aislados de las torres o polos, la resistencia de tierra es la resistencia de la torre en la localidad donde ha ocurrido la falla más la resistencia de la tierra de regreso a la fuente.

En ocasiones, un conductor se rompe y cae a tierra. La resistencia de contacto de tierra de una falla semejante puede ser mucho más elevada que la resistencia de tierra de las torres donde por lo general se obtiene resistencia relativamente baja con varillas de tierra o tomas de tierras equilibradas. La resistencia de contacto depende de la geología de una localidad dada, si la tierra es húmeda o seca, y si es seca, que tan elevada es la tensión; ésta toma una cierta cantidad de la tensión para perforar el aislamiento de la superficie.

SOBREALCANDE DE LOS RELEVADORES INSTANTÁNEOS

El "sobrealcance" es la tendencia de un relevador a ponerse en operación en las fallas a mayor distancia de la que se esperaría si se desprecia el efecto de la simetría de la corriente de falla.

Los relevadores de atracción magnética son los más afectados por la asimetría de las fallas que los relevadores de inducción, y algunos de estos los son más que otros.

El sobrealcance en porcentaje es un termino que describe el grado en el cual existe la tendencia, y se a definido como sigue.

$$\text{Sobrealcance en porcentaje} = 100 \frac{(A-B)}{A}$$

Donde:

A = la corriente de puesta en trabajo (pick-up) del relevador, en amperes eficaces de estado estable.

B = los amperes eficaces en estado estable que en cuanto se inicie la simetría total podrán en operación el relevador.

El sobrealcance en porcentaje aumenta a medida que se incrementa la relación de reactancia a resistencia de la impedancia que limita la corriente de falla, o bien, en otras palabras a medida que aumenta la constante de tiempo de la componente de C.D. de la corriente de falla. Cuanto más lento es el decaimiento de la componente de corriente directa más pronto originara la operación del relevador. Con lo anterior se hace evidente que, siendo iguales otras condiciones cuanto más rápido es un relevador, tanto mayor será su sobrealcance en porcentaje.

AJUSTE DE LOS RELEVADORES DE SOBRECORRIENTE RELEVADORES DE FASE

A continuación se da una serie de recomendaciones para lograr un buen ajuste en estos relevadores:

- a) Para ajustar un relevador de fase debe calcularse una falla trifásica para las condiciones de corriente máxima. El ajuste para selectividad se hace suponiendo condiciones de corriente máxima de falla porque, si se obtiene selectividad para tales condiciones, es seguro que se obtendrá para corrientes menores. Sin embargo, un relevador de fase no debe ser tan sensible como para ponerse en operación en condiciones de emergencia de máxima carga en la línea de la que recibe su corriente.
- b) Para relevadores cercanos a una gran central generadora que proporciona la mayor parte de la corriente de corto circuito la impedancia sincrónica, la mejor para la determinación de la puesta en marcha (pick-up) de un relevador cuyo objetivo es el respaldo especialmente si el tiempo de operación del relevador fuera tanto como uno o dos segundos. Por otra parte la puesta en marcha del relevador de alta velocidad cercano a dicha central generadora se determinaría por la utilización de la impedancia transitoria, y aún la subtransitoria. Sin embargo, por lo general, se encontrara más adecuada la impedancia transitoria para todo propósito. Por otro lado cuando interesa conocer el valor máximo posible de la corriente de falla no se debe tomar en cuenta la resistencia de arco.
- c) Para utilizar la parte más inversa de las curvas de tiempo del relevador, la puesta en trabajo (pick-up) en función de la corriente primaria deberá ser tan elevada como sea posible y también ser aún bastante baja como para que el relevador funcione en forma segura bajo la condición de corriente mínima de falla. En dichas condiciones, el relevador deberá funcionar a no menos de 1.5 veces la puesta en trabajo (pick-up). La razón para esta regla es que, cuanto más cercana es a la corriente (pick-up) el par es tan lento que un pequeño aumento de la fricción podría impedir el funcionamiento o podría aumentar demasiado el tiempo de operación.
- d) Cuando se está seleccionando la puesta en trabajo (pick-up) de relevadores de tiempo inverso, si deberá considerarse el efecto de la resistencia de arco.
- e) Deben evitarse los relevadores con características diferentes.

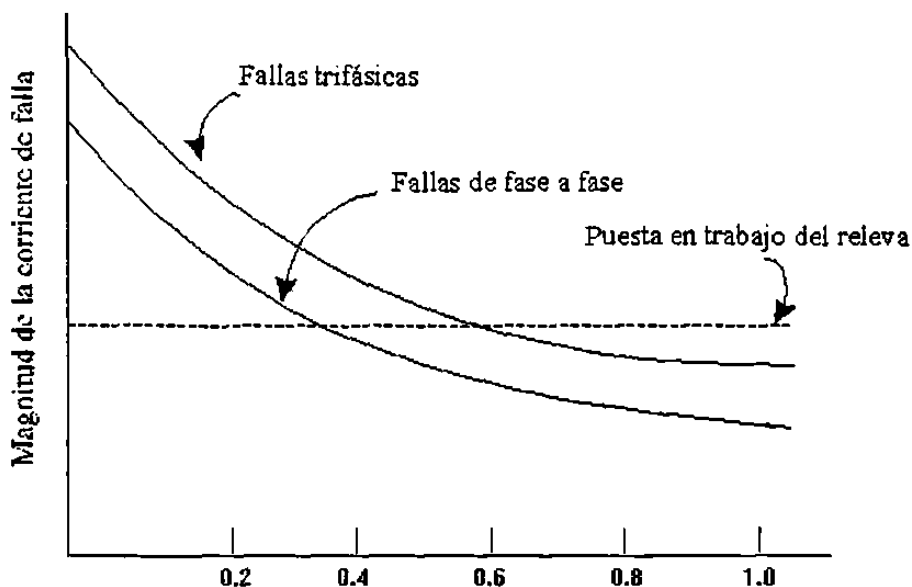


Figura 7.9

- f) La puesta en trabajo del relevador instantánea se muestra en la figura 7.9 que es 25% más elevada que la magnitud de la corriente para una falla trifásica en el extremo lejano de la línea: el relevador no deberá ponerse en marcha con una corriente mucho menor de otro modo éste podría sobrealcanzar el extremo de la línea cuando la onda de la corriente de falla está completamente asimétrica. en las condiciones de la figura 7.9 se notara que el relevador operara con fallas trifásicas exteriores hasta el 70% de longitud de la línea y para fallas de fase a fase exteriores hasta el 54%.
- g) El sobrealcance máximo de un relevador que fuera lo bastante rápido en porcentaje sería 50% y 42% para relevadores que no son muy rápidos. Cuando no se dispone de los datos del sobrealcance en porcentaje, será suficiente por lo general ajustar la puesta en trabajo 25% más elevada que el valor máximo de la corriente de falla simétrica en la cual el relevador no debe funcionar.

RELEVADORES DE TIERRA

A continuación se dan algunas recomendaciones:

- a) Para ajustar un relevador de tierra debe calcularse una falla de fase a tierra para las condiciones de máxima generación; la corriente de carga no es un factor en la selección de la corriente de pick-up de un relevador de tierra, excepto en un sistema de distribución donde por lo general hay corriente de tierra debido a la carga desequilibrada.
- b) Si hay dos o más secciones de líneas adyacentes, deberá suponerse la falla en el extremo de la sección que origina el flujo de la corriente mínima en la localidad del relevador que va ajustarse.
- c) La resistencia de tierra solo nos interesa en las fallas a tierra, esta se agrega a la resistencia de arco.
- d) Para relevadores de tierra en líneas entre las que hay inductancia mutua ésta deberá tomarse en cuenta en el calculo de la magnitud de corriente en las fallas monofásicas a tierra.

COORDINACIÓN DE LOS RELEVADORES DE SOBRECORRIENTE

CIRCUITOS RADIALES

El primer paso es seleccionar la puesta en trabajo del relevador de tal manera que éste (1) funcione con todos los cortocircuitos en su propia línea y (2) proporcione protección de respaldo para los cortocircuitos en los elementos del sistema inmediatamente adyacentes, bajo ciertas circunstancias, por ejemplo, si el elemento adyacente es una sección de línea, el relevador se ajusta para ponerse en trabajo con una corriente algo menor que la que recibe por un corto circuito en el extremo lejano de esta sección de línea en condiciones de máxima generación. esta se muestra en la figura 7.10.

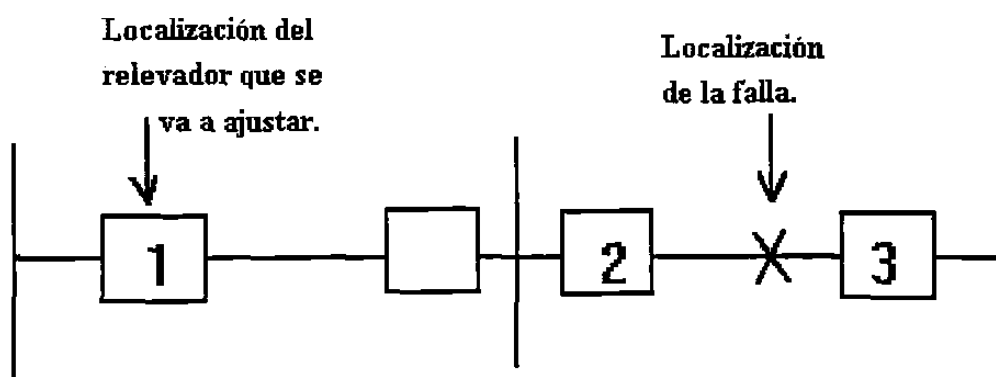


Figura 7.10

Para asegurar la selectividad bajo todas las circunstancias la puesta en trabajo (pick-up) de un relevador dado deberá ser algo más elevada que la de otros relevadores más cercanos a la falla y con los que debe ser selectivo el relevador dado.

El segundo paso en el ajuste de los relevadores de sobrecorriente de tiempo inverso es ajustar la acción retardada para obtener selectividad con los relevadores de los elementos inmediatamente adyacentes del sistema. Este ajuste deberá hacerse para las condiciones de flujo de máxima corriente en la localidad del relevador.

Para la falla tal como se muestra en la figura 7.10, el relevador localizado en el interruptor 2 debe cerrar sus contactos, y el interruptor dos debe disparar e interrumpir el flujo de la corriente de cortocircuito antes de que el relevador en el interruptor 1 pueda cerrar sus contactos. Además ya que el relevador en el interruptor 1 puede "sobrecorrer" un poco después de que cesa el flujo de la corriente de cortocircuito, deberá hacerse también una previsión para esta sobrecarrera. Podemos expresar el tiempo de funcionamiento del relevador requerido en 1 en función del tiempo de funcionamiento del relevador en 2 por la fórmula siguiente:

$$T_1 = T_2 + B_2 + O_1 + F$$

Donde:

T_1 = Tiempo de funcionamiento del relevador 1

T_2 = Tiempo de funcionamiento del relevador 2

B_2 = Tiempo de interrupción de la I de C.C. del int. 2

O_1 = Tiempo de sobrecarrera del relevador 1

F = Tiempo del factor de seguridad

El tiempo de sobrecarrera para los tipos de tiempo inverso utilizados generalmente puede suponerse un valor de 0.1 seg. En general será suficiente un valor de 0.2 a 0.3 seg. para la sobrecarrera más el factor de seguridad. "Intervalo de tiempo selectivo" es la suma de los tiempos del interruptor, sobrecarrera, y el factor de seguridad.

Para casos como el mostrado en la fig. 7.11, podemos generalizar y afirmar que el ajuste debe iniciarse en el relevador eléctricamente más distante de la fuente de generación y trabajar entonces de regreso hacia dicha fuente.

CIRCUITOS EN ANILLO

El procedimiento que se sigue para la coordinación de un sistema en anillo como el mostrado en la figura 7.12, es el mismo que el que se siguió para circuitos radiales. El orden en que se ajustarán los relevadores "que ven" una trayectoria alrededor del anillo es 1 - 2 - 3 - 4 - 5, y viendo la otra trayectoria, a - b - c - d - e. Por lo general, se emplearían relevadores direccionales de sobrecorriente como se indica por las flechas de una punta que señalan en la dirección del flujo de la corriente de falla para la que debería disparar el relevador. Solamente los relevadores en e y 5 pueden ser o no direccionales como se muestra por las flechas de dos puntas. El relevador 1, por ejemplo, debe recibir como mínimo 1.5 veces su corriente de puesta

en trabajo para una falla de fase a fase en el extremo lejano de su línea con el interruptor e abierto y con mínima generación.

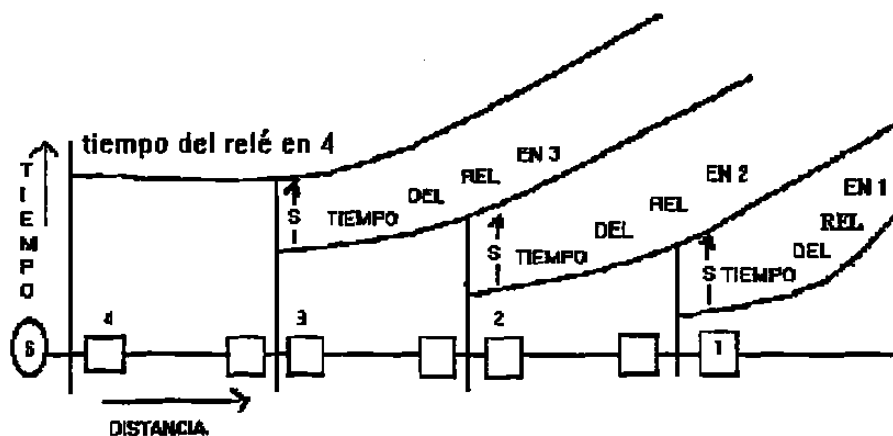


Figura 7.11

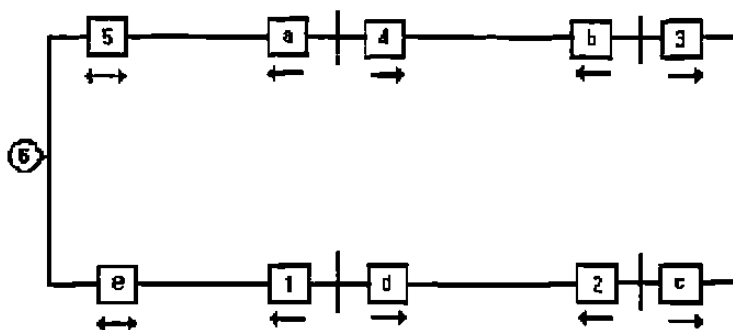


Figura 7.12

La primera complicación en el ajuste de relevadores de sobrecorriente en circuitos en anillo surge cuando los generadores están localizados en varias estaciones alrededor del anillo. El problema es entonces dónde empezar. Y en fin, cuando los circuitos de un anillo forman parte de otros anillos, el problema es más difícil. El método de tanteos es el único camino para proceder con dichos circuitos.

RECIERRE AUTOMÁTICO.

La experiencia ha demostrado que del 70% al 95% de todas las fallas de líneas de transmisión, subtransmisión y distribución de alta tensión no son permanentes si se desconecta

del sistema en forma rápida el circuito defectuoso. Esto se debe a que la mayor parte de las fallas de las líneas son originadas por las descargas atmosféricas, y si se evita que el arco que sucede en la falla dure mucho tiempo como para dañar en forma perjudicial conductores y aisladores, la línea puede regresar al servicio en forma inmediata.

El recierre automático se aplica por lo general a todos los tipos de circuitos. Las líneas de subtransmisión que tienen protección de sobrecorriente tienen por lo general equipo de recierre múltiple, con equipo suplementario de "comprobación de sincronismo" en un extremo. El equipo de comprobación de sincronismo es un equipo de relevadores que permite cerrar un interruptor sólo si las partes que van a conectarse por éste están en sincronismo. En líneas radiales no se requiere este equipo.

En sistemas de distribución en los que se incluye la selectividad con fusibles de circuitos derivados, también se utiliza el recierre múltiple. Los relevadores de sobrecorriente instantáneos y de tiempo inverso están arreglados en tal forma que, cuando ocurre una falla, el relevador instantáneo funciona para disparar el interruptor antes de que pueda quemarse un fusible de un circuitos derivado, y se recierra entonces en forma inmediata al interruptor.

Sin embargo, después de la primera salida, los relevadores instantáneos salen de servicio en forma automática, de tal manera que si la falla persistiera los relevadores de tiempo inverso tendrían que funcionar para disparar el interruptor. Esto da tiempo para que se queme el fusible del circuito derivado del circuito defectuoso, si suponemos que la falla está más allá de este fusible. En esta forma, se disminuye el costo del reemplazamiento de los fusibles quemados del circuito derivado.

PROTECCIÓN DE LINEAS DE TRANSMISIÓN CON RELEVADORES DE DISTANCIA

A medida que la redes eléctricas aumentan de tamaño y consecuentemente de complejidad, los Esquemas de Protección de sobrecorrientes con selección de tiempo resultan inadecuados por requerirse ajustes demasiado altos en los relevadores que quedaron en los últimos escalones.

Debido a lo anterior se diseñaron y construyeron los relevadores de distancia cuyo principio de Operación es tal que su tiempo de diseñamiento es proporcional a la distancia que se produce la falla.

Los relevadores utilizados para protección de cortos circuitos funciona en virtud de la corriente y/o tensión proporcionada a éstos por los transformadores de corriente y tensión, conectados en diversas combinaciones al elemento del sistema que se va a proteger.

En relevadores de distancia hay un equilibrio entre la tensión y la corriente que se expresa en función de la impedancia. La impedancia es una medida eléctrica de la distancia a lo largo de la línea de Transmisión lo que explica el nombre aplicado a ese grupo de relevadores.

RELEVADOR DE DISTANCIA DE IMPEDANCIA

Hablando en general el Termino Impedancia puede aplicarse solo a resistencia, solo a reactancia, o a la combinación de los 2, en protección el relevador de impedancia tiene una característica diferente del relevador que responde a cualquier componente de impedancia.

El elemento de corriente produce par positivo (puesta en servicio del relevador) mientras que el elemento de tensión produce par negativo (reposición). La ecuación del par es:

$$T = K1 I^2 - K2 V^2 - K3$$

donde I y V son magnitudes eficaces de la corriente y de la tensión y $K3$ el efecto del resorte de control.

Cuando el par neto es cero se tiene:

$$0 = K1 I^2 - K2 V^2 - K3$$

despejando y dividiendo entre $K2 I^2$

$$K2 V^2 = K1 I^2 - K3$$

$$\frac{V^2}{Z^2} = \frac{K1 I^2}{K2 I^2} - \frac{K3}{K2 I^2}$$

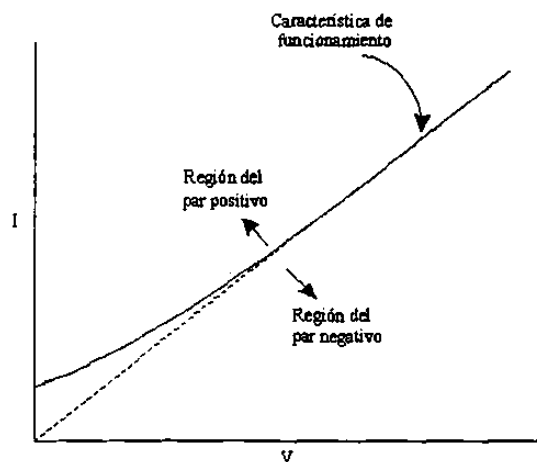
$$\frac{V}{I} = Z = \sqrt{\left[\left(\frac{K1 I^2}{K2 I^2} \right) - \left(\frac{K3}{K2 I^2} \right) \right]}$$

despreciando el efecto del resorte de control ya que su efecto solo es notorio a magnitudes de corriente relativamente bajas.

$$Z = \frac{V}{I} = \frac{K1}{K2} = \text{Constante}$$

Lo anterior nos indica que un relevador de impedancia está en el límite de funcionamiento a un valor constante dado por la relación de V a I que es una impedancia.

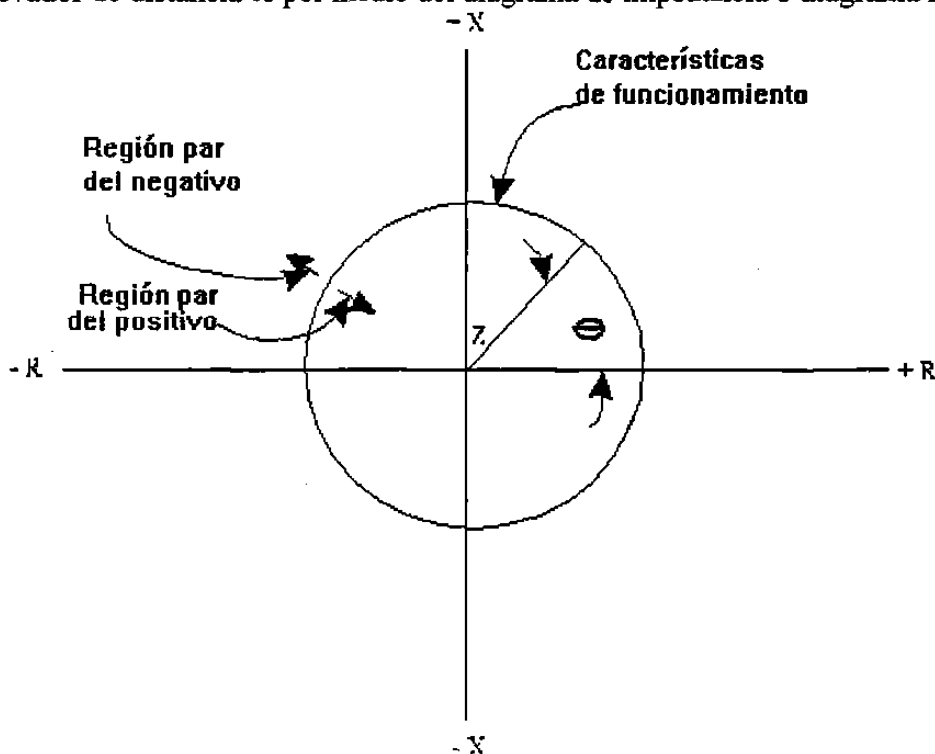
su característica se indica en la figura 7.13.



Característica de funcionamiento de un relevador de impedancia

Figura 7.13

Otra forma más común que la anterior es de mostrar la característica de funcionamiento del relevador de distancia es por medio del diagrama de impedancia o diagrama $R - X$. (fig 7.14)



Características de funcionamiento de un relevador de impedancia de un diagrama $R-X$

Figura 7.14

En este diagrama el valor numérico de la relación de V a I se muestra como una longitud de un radio vector Z y ángulo de fase θ entre V e I determina la posición. Si la I está en fase con la V el vector se sitúa en el Eje $+ R$; si I está 180° fuera de fase con V el vector se sitúa en Eje $- R$; si I se atrasa de V el vector tiene 1 componente $+ X$ y si I se adelanta de V , el vector tiene una componente $- X$.

Cualquier valor de Z menor que el radio del círculo resultara en un par positivo y cualquier valor de Z mayor que este radio tendrá par negativo haciendo caso omiso del ángulo de fase entre V e I .

El principio de operación de los relevadores de distancia lo rige la relación o el cociente entre el voltaje y la corriente en el punto de ubicación del relevador. es decir que es $\left(z = \frac{V}{I} \right)$ la impedancia de la línea hasta el punto de falla. En una línea de transmisión de la impedancia es proporcional a la distancia por lo tanto el relevador recibe el nombre de distancia.

Una forma de ilustrar el concepto de impedancia que detecta el relevador hasta el punto de falla se indica en la figura 7.15.

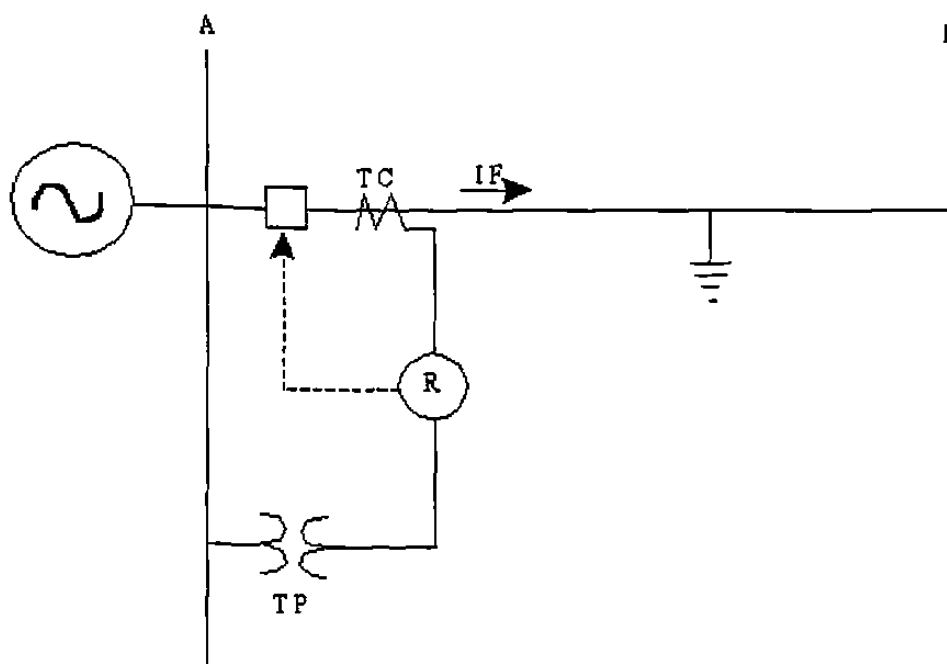


Figura 7.15

Se considera que el relevador está conectado al bus A y sus bobinas reciben las señales del V que es proporcional al de la falla y la corriente I_f que es la de la falla, el relevador opera debajo de un cierto valor $Z = V/I$ lo que hace básicamente un relevador de distancia es comparar la corriente y el voltaje del Sistema de Potencia para determinar si la falla se presentó dentro o fuera de su zona de operación.

Para Protección de Líneas de Transmisión, un relevador de distancia monofásico del tipo de impedancia consta de una unidad direccional monofásica, tres unidades de relevadores de impedancia de alta velocidad y una unidad de tiempo, junto con los indicadores comunes (banderas) unidad de sello y otros auxiliares. En la figura 7.16 se muestra un circuito esquemático.

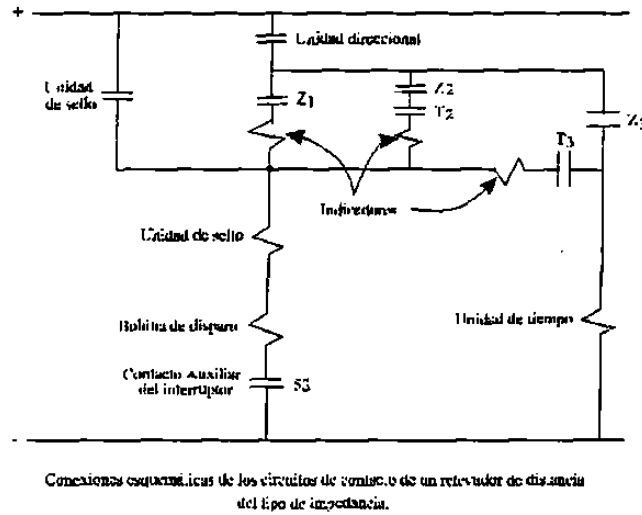


Figura 7.16

las 3 unidades de impedancia están rotuladas Z_1 , Z_2 , y Z_3 las características de funcionamiento de estas 3 unidades son ajustables independientemente. En la figura 7.17 del diagrama R-X el círculo para Z_1 es el más pequeño y el círculo para Z_3 el más grande, el círculo para Z_2 es intermedio, por tanto es evidente que cualquier valor de impedancia que este dentro del círculo Z_1 origina que funcionen las 3 unidades de Impedancia.

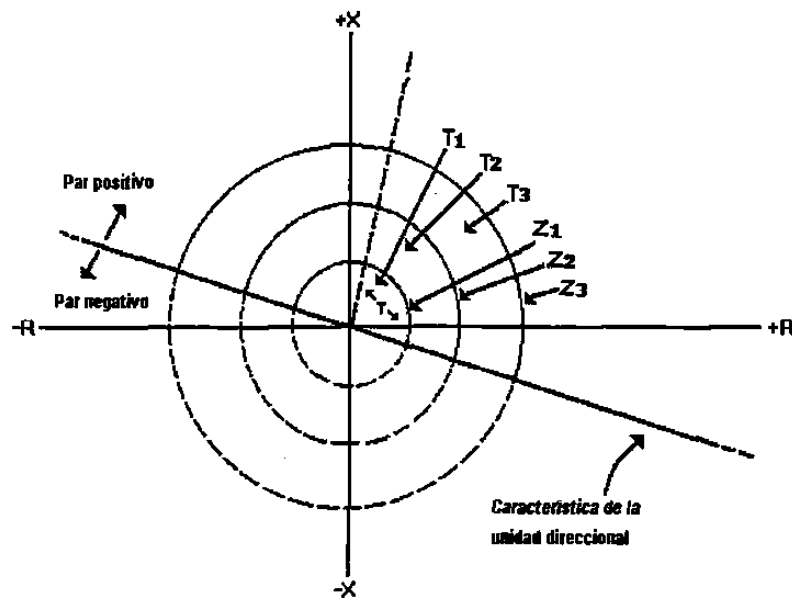
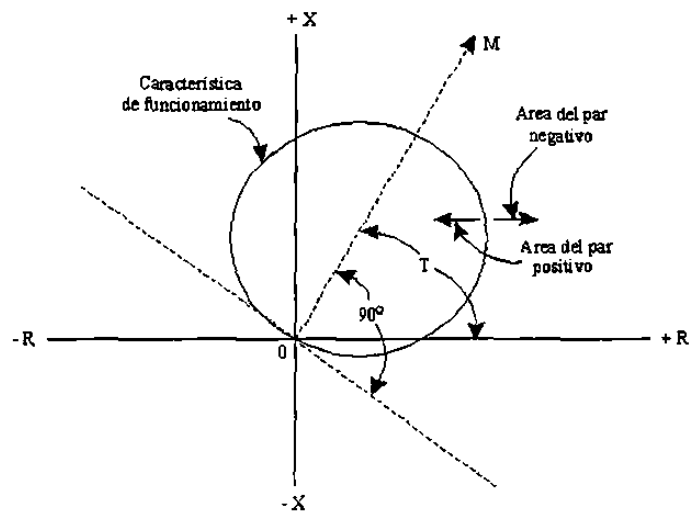


Figura 7.17

La Unidad direccional solo permite el disparo en su región positiva de par, las partes inactivas de las características de la unidad de impedancia se muestran punteadas, resultando que el disparo ocurrirá solo para puntos que estén dentro de los círculos y arriba de la unidad direccional.

La unidad direccional que se muestra en el diagrama R-X tiene una característica de funcionamiento de línea recta, solo si se desprecia el efecto del resorte de control que es suponer que no hay par de retención.

Si se desarrollara la característica de funcionamiento de una relevador direccional cuando se toma en cuenta el efecto del resorte de control nos describe una condición como la mostrada en la figura 7.18 dando una serie de círculos uno para cada valor de V .



Este desplazamiento se lleva a cabo por una corriente de polarización, la que consiste de la introducción en la tensión de alimentación de una tensión adicional proporcional a la corriente que da una ecuación de: $T = K_1 I^2 - K_2 (V + CI)^2$, lo anterior nos da círculos con centro desplazados del origen. Por la polarización, puede desplazarse un círculo característico en cualquier dirección del origen y por cualquier cantidad deseada aún cuando el origen está fuera del círculo.

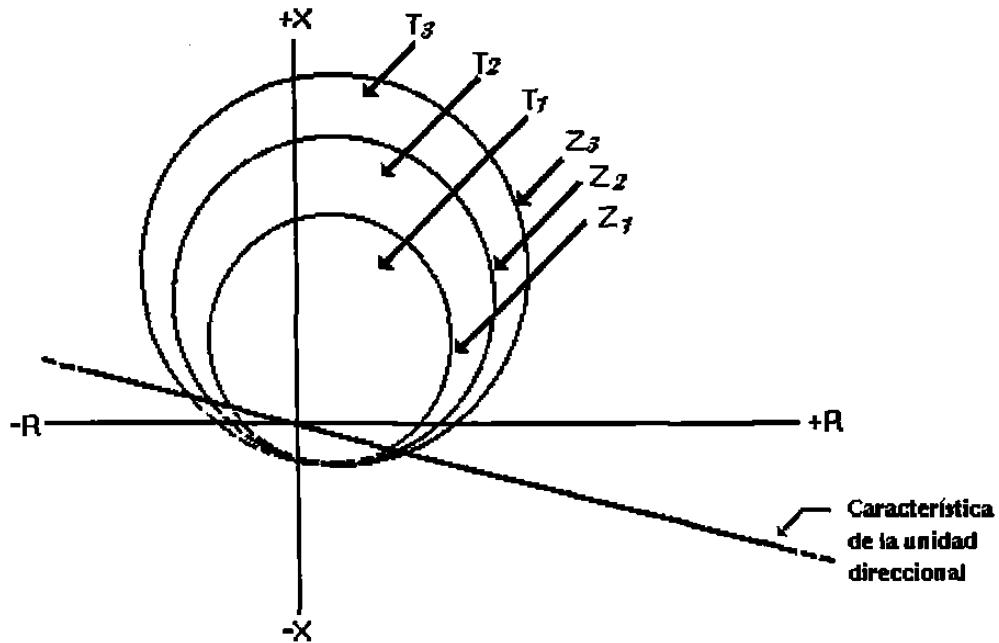


Figura 7.19

RELEVADOR DE DISTANCIA DEL TIPO DE REACTANCIA

La unidad de reactancia de un relevador de distancia del tipo de reactancia tiene, de hecho un elemento de sobrecorriente que desarrolla un par positivo y un elemento direccional corriente-tensión que se opone o ayuda al elemento de sobrecorriente según sea el ángulo de fase entre la corriente y la tensión.

$$T = K_1 I^2 - K_2 V I \text{Sen} \theta - K_3 \quad (\theta = \text{positivo cuando } I \text{ se atrasa de } V)$$

Cuando el par neto es cero se tiene:

$$K_1 I^2 = K_2 V I \text{Sen} \theta + K_3$$

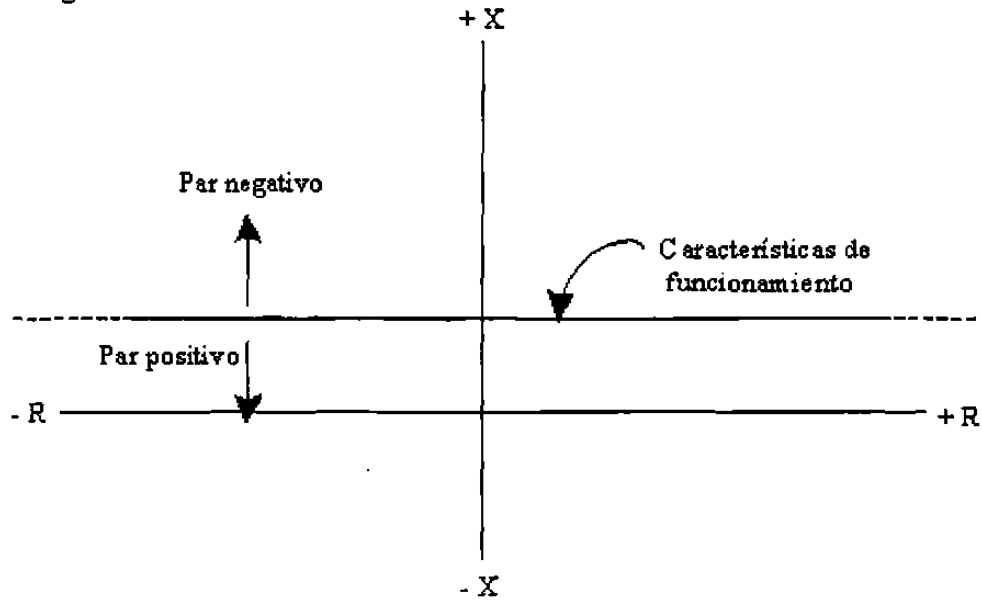
dividiendo entre I^2 se tiene:

$$K_1 = K_2 \frac{V}{I} \text{Sen} \theta + \frac{K_3}{I^2}; \text{ se tiene: } \frac{V}{I} \text{Sen} \theta = Z \text{Sen} \theta = X$$

$$X = \frac{K_1}{K_2} - \frac{K_3}{K_2 I^2}; \text{ despreciando el efecto del resorte de control:}$$

$$\text{nos queda: } X = \frac{K_1}{K_2} = \text{Constante}$$

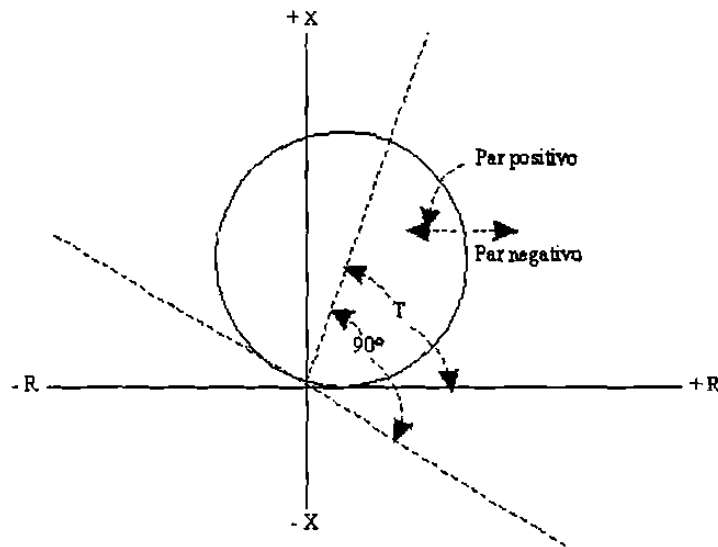
En otras palabras, este relevador tiene una característica de funcionamiento tal como se indica en la figura 7.20.



Característica de funcionamiento de un relevador de reactancia.

Figura 7.20

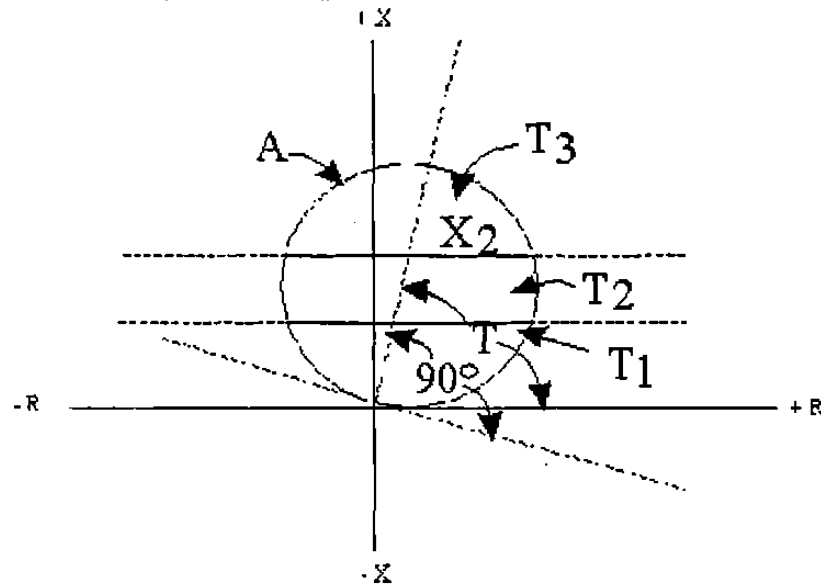
Un relevador de distancia del tipo de reactancia para protección de líneas de transmisión no podrá utilizar una Unidad direccional sencilla, porque el relevador de reactancia disparará bajo condiciones normales de carga, por lo anterior se tiene una unidad que es conocida por relevador o Unidad de Admitancia ó Mho., cuya característica gráfica se muestra en la figura 7.37.



Características de funcionamiento de un relevador direccional con tensión de retención

Figura 7.37

A continuación se muestra en la figura 7.22 el relevador de reactancia completo con las diversas unidades, se observa que la unidad direccional o de arranque tiene doble utilidad no solo proporciona dirección sino también un tercer escalón de la medición de la distancia.

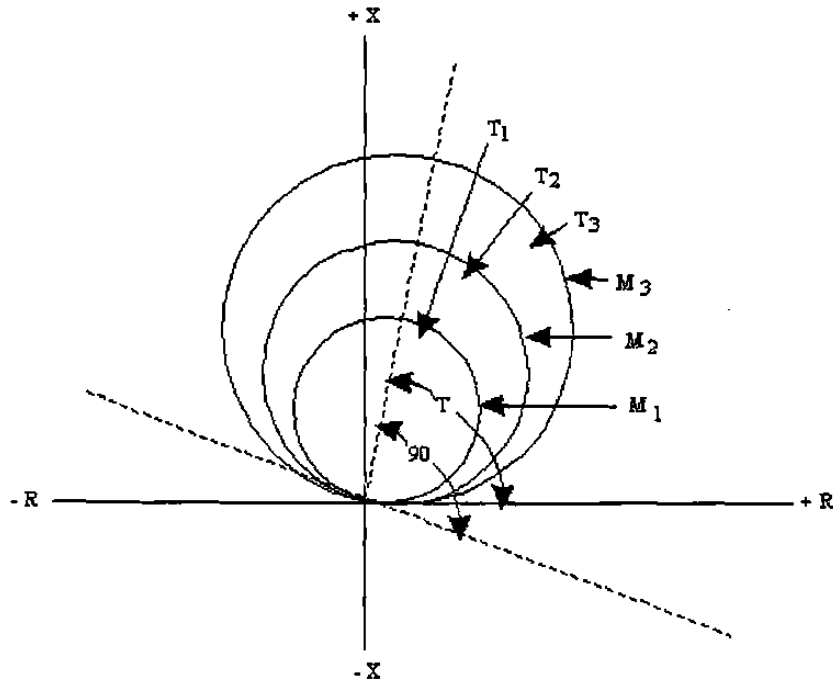


Características de funcionamiento de un relevador de distancia tipo de reactancia

Figura 7.22

RELEVADOR DE DISTANCIA DEL TIPO MHO

La Unidad Mho es igual a la unidad de arranque del relevador de reactancia, este relé completo para la protección de líneas de Transmisión está compuesto de 3 unidades Mho de alta velocidad M1, M2, M3 y una unidad de tiempo similar a la que se mostró para un relevador de distancia del tipo de impedancia, excepto que no se requiere unidad direccional separada ya que las unidades Mho son inherentemente direccionales, la característica de funcionamiento del relevador completo se muestra en la figura 7.23.



Características de funcionamiento de un relevador de distancia del tipo mho.

Figura 7.23

CONSIDERACIONES GENERALES SOBRE RELEVADORES DE DISTANCIA

Sobrealcance:

Cuando ocurre un c.c., la onda de la corriente está propensa a descentrarse inicialmente, bajo estas condiciones los relevadores tienden al sobrealcance, esto es a funcionar para un valor mayor de impedancia que para el que están ajustados para funcionar en estado estable. Esta tendencia es mayor cuanto más inductiva es la impedancia. También es mayor la tendencia en relevadores del tipo de atracción electromagnética que en los de inducción.

La compensación para el sobrealcance, lo mismo que para imprecisiones en TC y TP se obtiene por el ajuste de los relevadores para funcionar en 10% a 20% menos de impedancia que aquella para la cual se ajustarían en estado estable.

El significado de Z:

Para la protección de líneas de Transmisión contra c.c. que es el campo más amplio de aplicación de los relevadores de distancia ésta impedancia es proporcional, dentro de ciertos límites a la distancia física del relevador al c.c., sin embargo el relé estará aún alimentado por tensión y corriente bajo otras condiciones distintas que los c.c., como cuando un sistema está conduciendo carga normal o cuando una parte de este pierde el sincronismo con la otra etc.

Se puede pensar que hay diferentes tipos de relevadores de distancia para protección de líneas de transmisión y que cada tipo tiene ampliamente su campo de aplicación particular en donde resulta más apropiado.

SUPERPOSICIÓN DE LAS CARACTERÍSTICAS DEL RELEVADOR Y DEL SISTEMA

Para suponer el trazo de la característica de un relevador en el trazo de la característica de un sistema, ambos trazos deben estar hechos con las mismas bases. Un relevador funciona en respuesta a la tensión y corriente obtenida de ciertas fases, por lo tanto, deben tratarse las características del sistema en función de estas mismas magnitudes.

Si se utilizan ohms reales, ambas características, deben estar en una base primaria o secundaria tomando en cuenta las relaciones de los TC y TP como sigue:

$$\text{Ohms Secundarios} = \text{Ohms primarios} \times \frac{\text{Rel. TC}}{\text{Rel. TP}}$$

Es conveniente que ambas coordenadas tengan la misma escala por que ciertas características son circulares si las escalas son las mismas.

Es necesario establecer una conversión de las características relevador-Sistema en el diagrama R-X, es decir que una condición del sistema que requiere el funcionamiento del relevador, debe estar situada en la región de funcionamiento del relevador. La conversión consiste: tomando como referencia la figura 7.24.

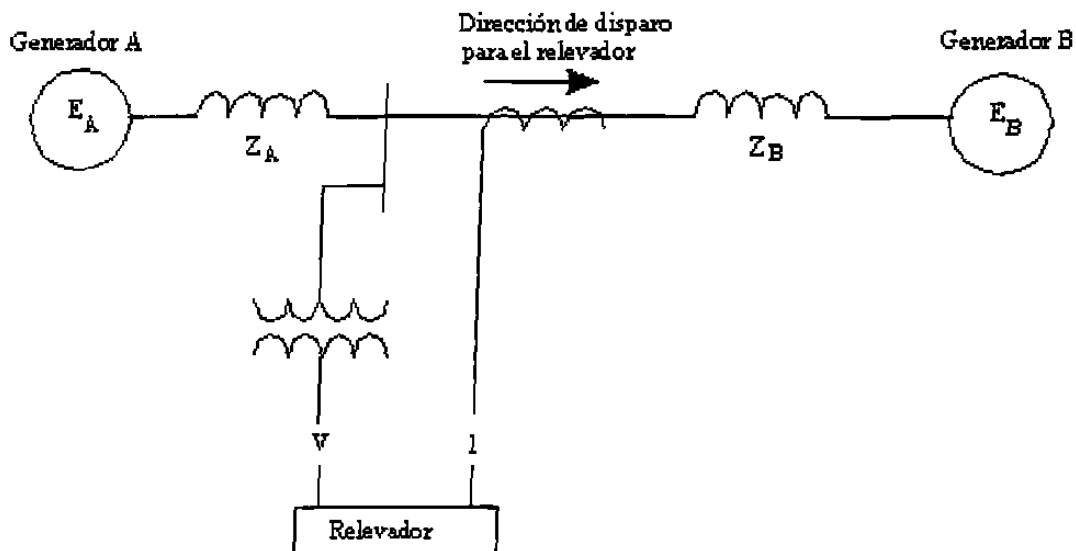


Figura 7.24

CONDICIÓN	SIGNO DE R	SIGNO DE X
Potencia (W) de A a B	±	
Potencia (W) de B a A		
Potencia reactiva (VAR) atrasada de A a B		+
Potencia reactiva (VAR) atrasada de B a A		-
Potencia reactiva (VAR) adelantada de A a B		-
Potencia reactiva (VAR) adelantada de B a A		+

Las siguientes relaciones dan los signos numéricos de R y X para una condición trifásica:

$$R = \frac{V^2}{W^2 + (VAR)^2} \quad ; \quad X = \frac{V^2 (VAR)}{W^2 + (VAR)^2}$$

V= voltaje de fase a fase

W= Potencia Trifásica

VAR = Potencia reactiva trifásica

R y X= Componentes de Sec. positiva en condiciones trifásicas equilibradas, dividiendo voltaje de fase a neutro entre la I correspondiente.

Lo anterior nos da la localización de un punto en el diagrama R-X, es decir la impedancia para cualquier condición trifásica equilibrada del sistema.

PROTECCIÓN DE LÍNEAS DE TRANSMISIÓN CON RELEVADORES TIPO PILOTO

INTRODUCCIÓN.

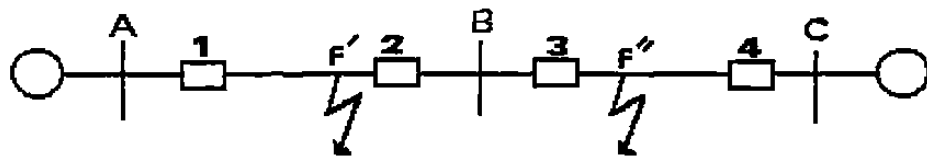
Un requerimiento fundamental que deben cumplir las protecciones de las líneas de enlace en un sistema eléctrico de potencia es lograr el disparo simultáneo con alta velocidad de los interruptores de todos los terminales de la línea para todos los cortocircuitos internos. Las protecciones direccionales de sobrecorriente y de distancia solamente cumplen este requerimiento para los cortocircuitos en la porción central de la línea, pero para fallas cercanas a sus terminales la protección opera con alta velocidad, mientras que las de las restantes

terminales (en el caso general de una línea multiterminal) 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 constituye la solución de este problema, al garantizarse el disparo simultáneo con alta velocidad de todos los interruptores de la línea, se obtienen las siguientes ventajas: a) mejoramiento de la estabilidad transitoria, b) posibilidad de aplicar el recierre automático de alta velocidad, que si es exitoso mejora la estabilidad transitoria, reduce los tiempos de interrupción y mejora las condiciones de voltaje en parte de la carga, c) reducción de la posibilidad de daño de conductores y equipos debido a la corriente de falla.

PROTECCIÓN DE OPERACIÓN Y CLASIFICACIÓN DE LAS PROTECCIONES TIPO PILOTO

La protección tipo piloto tiene selectividad absoluta y basa su funcionamiento en la comparación directa o indirecta de las señales provenientes de todos los terminales de la línea de transmisión. En la fig. 7.25 se ilustra la necesidad de esa comparación para lograr la protección de alta velocidad para cortos circuitos en cualquier punto de la línea. Si la protección 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 cortos circuitos F' y F'' , que ocurren en puntos muy cercanos entre si y por tanto dan lugar a valores muy semejantes de la corriente o de la impedancia medida por la protección 1. sin embargo, estos dos cortocircuitos representan condiciones muy diferentes cuando la información se recibe en el extremo B de la línea, ya que hay una variación de aproximadamente 180 grados en el ángulo de la corriente de uno a otro caso.



Fundamentación de la necesidad de la protección piloto de una línea de transmisión.

Figura 7.25

En la protección tipo piloto la protección 1 recibe información desde las 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 ese terminal de la línea de igual forma 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 los terminales de la línea, este canal, también denominado canal piloto en la literatura especializada, es el que da nombre a este tipo de protección. Existen en la actualidad 4 tipos de canales de comunicación factibles de utilizar con esta finalidad: a) Un par de conductores complementarios tendidos a lo largo de la línea protegida (hilo piloto), b) un canal de onda portadora de alta frecuencia, que utiliza los propios conductores de la línea protegida, c) un canal de enlace por radio en la banda de microondas, d) un 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 microonda

Una segunda posibilidad de clasificación de las protecciones tipo piloto es atendido al principio de detección del cortocircuito. Pueden en general establecerse las siguientes comparaciones entre las señales provenientes de los 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 no se han utilizado todas las variantes posibles de comparación en cada uno de los tipos de protecciones pilotos. En la protección por hilo piloto se utiliza preferentemente el principio diferencial de comparación directa de los valores instantáneos de las corrientes. En las protecciones piloto por onda portadora y por microonda, por el contrario, han encontrado mayor aplicación los principios de comparación directa de fase (o protección diferencial de fase) y de comparación indirecta direccional.

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 a 60 Hz, según el caso), que es la variante más difundida, o de corriente alterna de una frecuencia del orden de 1000 a 3000 Hz (tonos de audio). Estos conductores deben ser subterráneos para garantizar un adecuado nivel de fiabilidad canal, no es recomendable utilizar conductores aéreos con 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 de longitudes superiores a unos 25 km.

Un problema que se confronta en este tipo de canal de comunicación es el de los sobrevoltajes, 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. 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 apantallar 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 posible.

La segunda causa de sobrevoltaje 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 existente entre la tierra remota y la malla de tierra. En subestaciones con altos niveles de cortocircuito a tierra la elevación de este potencial puede ser considerable, y ello hace precisamente recomendable que el apantallamiento del hilo piloto se aisle de la malla de tierra (si se conecta también a ésta, 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 hay que disponer de una protección especial contra el mismo.

Para garantizar la seguridad del personal y de los equipos conectados al canal, es necesario instalar dispositivos especiales de protección contra los dos tipos de sobrevoltaje anteriormente mencionados, la operación de estos dispositivos no deben afectar el funcionamiento normal de la protección por hilo piloto. Adicionalmente es necesario brindar protección contra sobrevoltajes por descargas eléctricas atmosféricas o por contactos con circuitos de potencia, en cuyo caso no se considera indispensable garantizar el buen funcionamiento de la protección piloto.

El aseguramiento de niveles altos de fiabilidad en la protección implica la necesidad de supervisar ininterrumpidamente el estado del canal. Por ello se utilizan equipos de supervisión, que comprueban el estado del hilo piloto inyectando en este una corriente directa, y permiten detectar cortocircuitos, circuitos abiertos o contactos con tierra.

CANAL DE ONDA PORTADORA

Este canal se basa por lo general en la utilización de los propios conductores de la línea protegida para transmitir señales en la banda de frecuencia comprendida entre 30 y 300 KHz. La variante más difundida en la práctica 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 una frecuencia única, de las 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 puede utilizarse para bloqueo o para disparo transferido, en el sistema de simple banda lateral la señal de alta frecuencia es modulada por tonos de audio portadores de la información.

En la figura 7.26 se presenta el esquema general del canal de onda portadora de una fase de una línea de transmisión. El canal está formado por los conductores de la línea protegida (las tres fases participan en la propagación de la señal aún cuando esta se aplique a una sola fase), las trampas de onda (1), los capacitores de acomplamiento (2), los reactores de drenaje (3), los sintonizadores (4) y los transmisores-receptores (5). En la figura se muestran también los relevadores de protección, representados por bloques (6). La conexión entre los transmisores-receptores y los sintonizadores se hace mediante cables coaxiales.

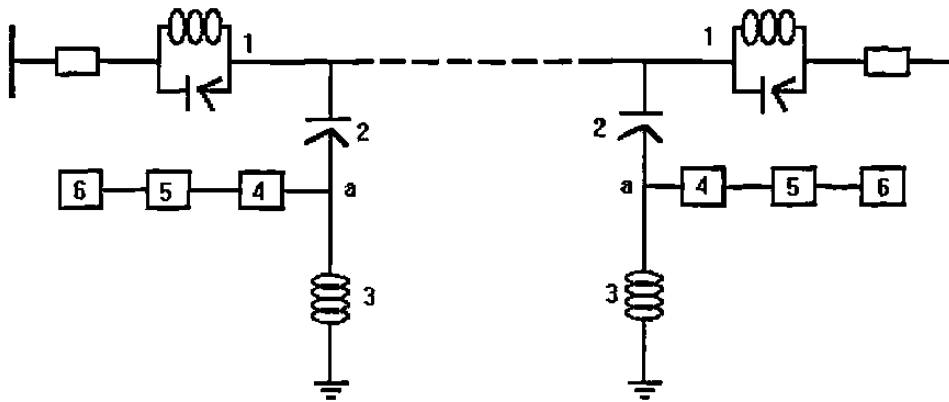


Figura 7.26

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 transmisores-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 o 60 Hz) de la línea de transmisión.

Las líneas aéreas de transmisión tienen impedancias características del orden de 200 a 500 ohm 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 discontinuaciones de la línea de transmisión pueden 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 parámetros 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 en 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 los desconectivos en aire, operación de interruptores, etc.) y factores externos, tales como canales cercanos de radiofrecuencia, descargas eléctricas, atmosféricas o estaciones de radio.

CANAL DE MICROONDAS

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

La información puede transmitirse por el canal de dos formas. En una de ellas 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 banda base). Cuando se requieren más canales se utiliza la segunda forma, en que se aplican 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.

El canal de microonda es independiente de la línea protegida, por lo que las señales no son afectadas por los cortocircuitos y las interferencias asociadas con ellos. Tiene también la

ventaja de que admite muchos canales de banda ancha, esto hace que, una vez establecido el enlace de microonda, la adición de nuevos canales no implica 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 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 operación. De hecho, los equipos de protección de un principio de operación dado pueden aplicarse a uno u otro canal.

CANAL DE FIBRA ÓPTICA

Este canal consiste en un cable de fibra óptica de pequeño diámetro (del orden de 100 micrómetros), no conductor de la electricidad, por el que la información se transmite por 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, 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 (o la desmodulación de períodos de pulsos) o las digitales.

Una variante práctica para la protección del cable 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.

PROTECCIÓN POR COMPARACIÓN DE FASE

En la protección por hilo piloto se utiliza el principio de comparación diferencial directa de los valores instantáneos de las corrientes, pero para altos valores de corriente su operación se basa en la comparación de fase, debido a la saturación del transformador variable.

El principio de la comparación de fase de las corrientes de los terminales de línea protegida (protección diferencial de fase) puede en general aplicarse con cualquiera de los tipos de canales de comunicación, en la fig. 7.27 se presenta el diagrama esquemáticos simplificado de una protección piloto por comparación de fase para una línea de dos terminales. Las señales provenientes de los transformadores de corriente conectados en estrella (I_a , I_b , I_c , $3I_o$) se aplican a los circuitos de protección de cada terminal, que también reciben señales de los receptores locales (portadoras de información de las fases de las corrientes de la terminal remota de la línea protegida.). En los circuitos de protección se hace la comparación de fase de las corrientes de ambas terminales y se omite en caso necesario la señal de disparo al interruptor local, se controla, además la transmisión de señales a control remoto, portadoras de información sobre las fases de las corrientes de la terminal local.

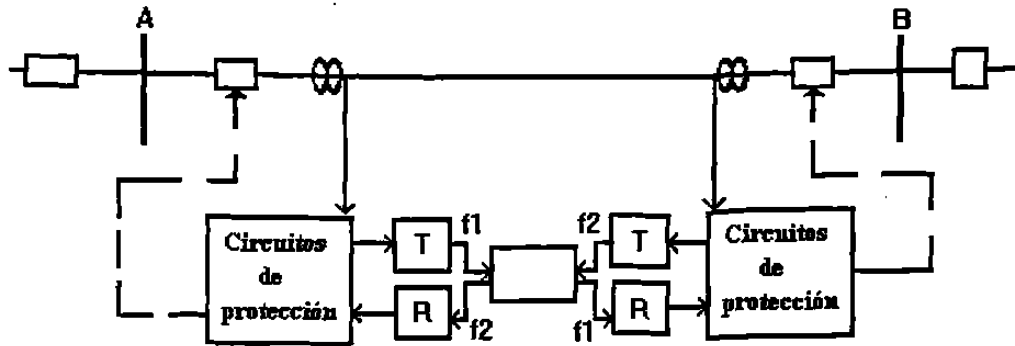


Figura 7.27

La información puede transmitirse mediante señales de naturaleza intermitente (Sistemas "ON-OFF"), la presencia de la señal representa un "1" lógico, y su ausencia, un "0". Por lo general en este caso se utiliza una frecuencia única de los equipos transmisores y receptores de todos los terminales de la línea ($f_1=f_2=f$ en la figura 7.27). 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" en dependencia de si hay o no canal presente en el canal.

El otro sistema posible es el de corrimiento de frecuencia, en cada transmisor emite en forma continua una señal que puede tener uno de dos valores de frecuencia cercanos entre sí (por ejemplo, $f_1 + \Delta f$ y $f_1 - \Delta f$ para el transmisor de la terminal A de la figura 7.27, y $f_2 + \Delta f$ y $f_2 - \Delta f$ para el transmisor del extremo B). Uno de esos valores de frecuencia representa el "1" lógico, y el otro, el "0". Los circuitos de protección controlan la emisión por los transmisores de señales de una u otra frecuencia, y los receptores tienen dos salidas independientes, uno para cada frecuencia, en cada salida del receptor hay señal presente si se está recibiendo la señal de la frecuencia es obligatorio que cada transmisor tenga una frecuencia base diferente de las demás ($f_1 \neq f_2$ en la figura 7.27). Una variante de este sistema es la que se utiliza tres frecuencias: una central, que implica ausencia de información, y dos extremas, que representan, respectivamente, el "1" y el "0" lógico 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 del tipo de ecuación:

$$V-F = k_{1-1}I + k_{2-2}I + k_{0-0}I$$

Aunque en ocasiones se omite alguna componente de secuencia, o se comparan por separado las diferentes componentes. Hay un tipo de protección que no tiene filtro, y hace la comparación de las corrientes totales de las fases (comparación de fase segregada), por razones que se discutirán más adelante.

Es conveniente para la seguridad del sistema que las señales no se transmitan continuamente, sino solamente cuando ocurra un cortocircuito. Por esa razón se utilizan detectores de falla, que por lo general son dos en cada terminal, uno de ellos, de mayor sensibilidad, inicia la transmisión de la señal, mientras el otro permite o no el disparo del interruptor local. Estos detectores son generalmente de sobrecorriente, y su corriente de

arranque debe 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 utilizar relevadores de distancia como detectores de falla, con el inconveniente de que se requieren adicionalmente transformadores de potencial para la protección.

El principio básico de operación de la protección piloto por comparación de fase se ilustra en la figura 7.28, en que se presentan, para cortocircuito interno (figura 7.28a) y externo (7.28b), los voltajes de salida de los filtros combinados de secuencia de los terminales A y B (V_{fa} y V_{fb}), así como las señales recibidas en A, en dos variantes posibles (disparo y bloqueo). En el terminal A se hace la comparación de fase de la señal V_{fa} y la señal recibida desde el extremo remoto (representa por la señal de salida del receptor local).

En la variante de piloto de disparo, el "1" lógico de la señal recibida en A corresponde al medio ciclo positivo de la señal V_{fb} . Esa señal coincide en fase con el medio ciclo positivo de V_{fa} para falla interna y tienen un defasamiento de 180° para falla externa. En la figura 7.29a se presenta 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 está ausente (por daño en el canal, por ejemplo), el disparo no tiene lugar.

En la variante de piloto de bloqueo, el "1" lógico de la señal recibida en A corresponde a medio ciclo negativo de la señal V_{fb} . La lógica de la comparación es la mostrada en la figura 7.29b, de donde se deduce que la señal recibida es de bloqueo (se hace pasar por una compuerta lógica inversora) y el disparo puede tener lugar en ausencia de la señal. La comparación de fase que se ha analizado hasta aquí es de media onda, pues solamente se utilizará información de determinados semiciclos de señales. Esto tiene el inconveniente de que las señales de disparo se omiten una vez por ciclo lo que afecta la velocidad de operación, si el cortocircuito tiene lugar durante el semiperíodo en que no hay comparación, la señal de disparo no puede originarse hasta el siguiente semiperíodo. 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, pues es necesario hacer por separado las comparaciones de los semiciclos positivos y negativos. Para la comparación de onda completa se necesitan frecuencias diferentes en los distintos transmisores.

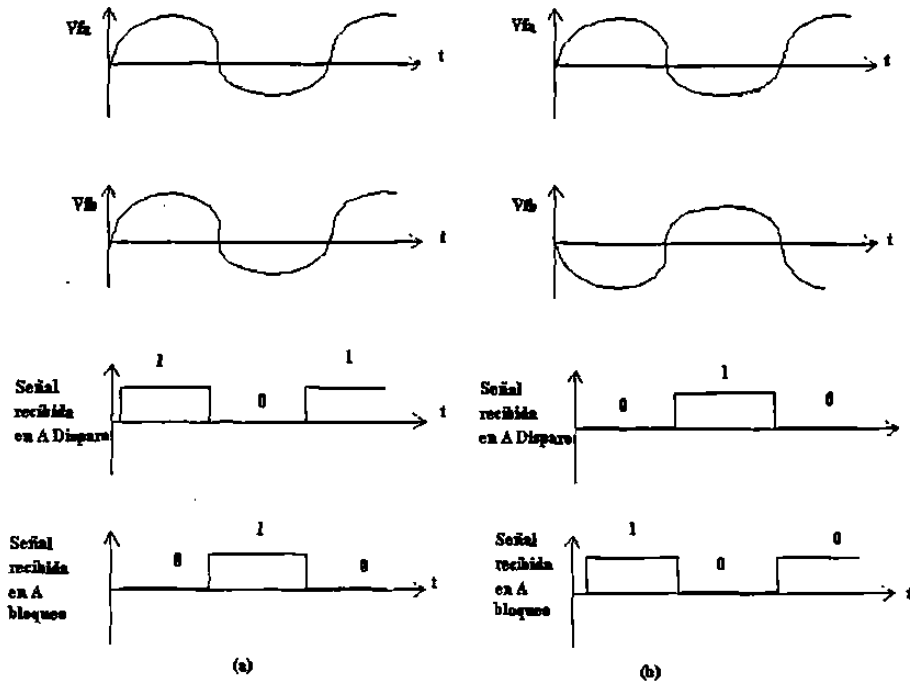


Figura 7.28

Un aspecto importante a tener en cuenta es el referente a los límites angulares del esquema de comparación de fase. En el caso ideal de la figura 7.28 las señales de entrada al esquema de comparación (ver figura 7.30) están exactamente en fase para falla interna, y desfasadas exactamente 180° para falla externa. En realidad hay errores de fase debidos a la posible corriente originada por el efecto capacitivo de la línea protegida, a los diferentes comportamientos de los filtros combinados de secuencia, al tiempo de propagación de las señales por el canal de piloto, y los retardos de tiempo que introducen los transmisores y receptores. En el caso de los cortocircuitos internos a los factores anteriores se añade el hecho de que hay un defasamiento entre las corrientes de las distintas terminales, debido al defasamiento en el 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 de 65° a 90° para el esquema de comparación de fase (es decir, que su operación tenga lugar para todo defasamiento entre las señales de entrada que este comprendido, por ejemplo, entre -90° y $+90^\circ$).

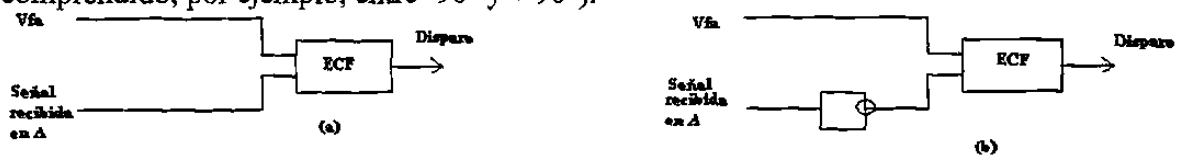


Figura 7.29

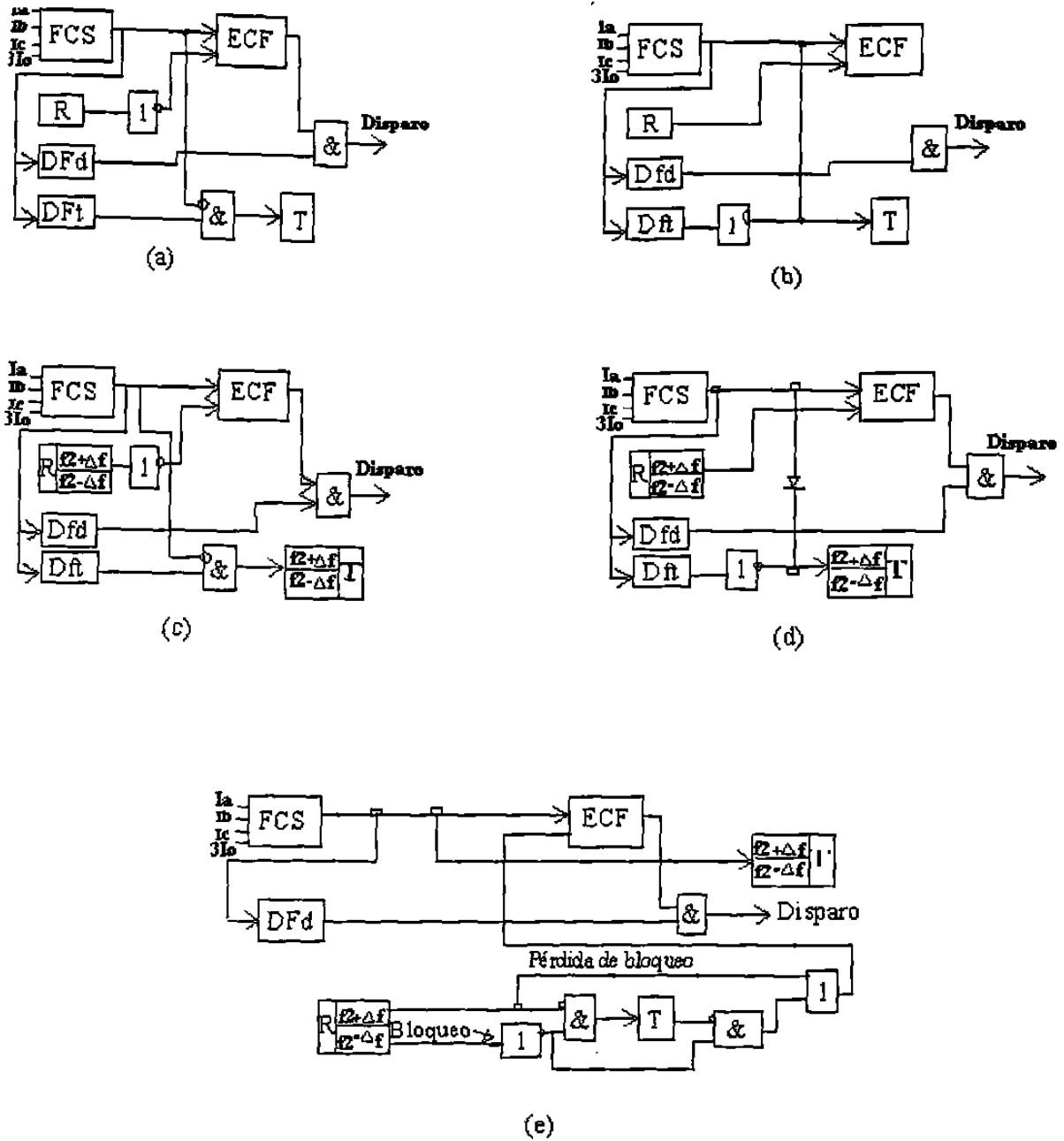


Figura 7.30

CONSIDERACIONES FINALES SOBRE LAS PROTECCIONES PILOTO POR COMPARACIÓN DE FASE

Al igual que la protección por hilo piloto, 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:

- a) No requiere transformadores de potencial (excepto en el caso en que se utilizan relevadores de distancia detectores de falla).

- b) No es afectada por la inducción mutua entre la línea protegida y línea adyacente.
- c) No es afectada por regímenes asimétricos de la línea protegida, tales como los relacionados con el cierre deficiente de interruptores o el disparo y recierre monopolar.
- d) Es aplicable a la protección de líneas largas con compensación serie capacitiva.

e) No es afectada por las oscilaciones de potencia y pérdidas de sincronismo. La comparación 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 hay una diferencia apreciable entre ambas corrientes. Por esta misma razón su aplicación es difícil en líneas con alimentación débil en un terminal, o en líneas multiterminales.

PROTECCIÓN PILOTO POR COMPARACIÓN DIRECCIONAL.

En esta protección se 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 (de tipo 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 7.31 se presenta el diagrama esquemático simplificado de una protección piloto por comparación direccional para una línea de dos terminales. Debe notarse la diferencia de este esquema con el de la protección piloto por comparación de fase (figura 7.27), que está dada por la necesidad de llevar las señales de voltaje (además de las corriente) a los circuitos de protección para la discriminación direccional.

Este principio es aplicable a líneas de más de dos terminales, donde resulta 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, con el sistema de corrimiento de sistema 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 debe complementarse con protecciones de distancia o direccionales de sobre corriente. La protección de fase generalmente es de distancia, mientras que la de tierra puede ser de distancia o direccional de sobrecorriente.

En la práctica es común disponer el esquema de modo que las protecciones de distancia o direccionales constituyen también gran parte de la protección primaria de la línea protegida, y que su operación sea acelerada por la protección piloto en los casos de cortocircuitos internos cercanos a la terminal remota de la línea (ver figura 7.25). Eso se logra disponiendo en el circuito de disparo del interruptor un contacto del relevador auxiliar de salida de la protección piloto en paralelo con el contacto de la unidad de tiempo correspondiente a la segunda zona de la protección de distancia o con el contacto 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.

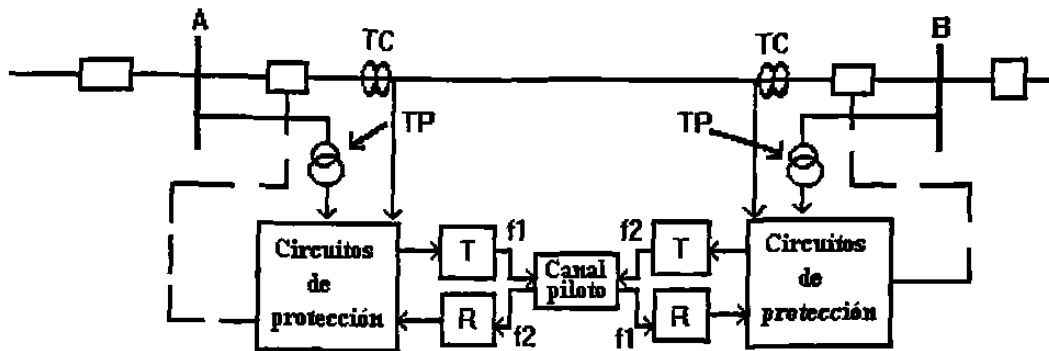


Figura 7.31

CONSIDERACIONES FINALES SOBRE LAS PROTECCIONES PILOTO POR COMPARACIÓN DIRECCIONAL

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

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

La protección piloto por comparación direccional, por utilizar detectores de falla de tipos direccional o de distancia, requiere transformadores de potencial, puede ser afectada por regímenes asimétricos de la línea protegida (disparo y recierre monopolar o cierre deficiente de interruptores) o por la inducción mutua entre líneas, tiene limitaciones para su aplicación a líneas largas con compensación serie capacitiva, y puede operar incorrectamente por oscilaciones de potencia y pérdidas de sincronismo.

PROTECCIÓN PILOTO POR COMPARACIÓN COMBINADA DE FASE Y DIRECCIONAL

En este esquema se combinan 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 (generalmente son relevadores de tiempo Mho), uno de ellos opera para fallas en la dirección de la línea protegida, y hace la función de disparo, mientras el otro opera para fallas en la dirección contraria, y hace la función de bloqueo. En la figura 7.32 se presenta un diagrama esquemático de esta protección, en la variante "ON-OFF" de bloqueo.

Al combinarse ambos principios, para la comparación de fase no se requiere la componente de corriente de secuencia positiva, pues la comparación puede cubrir aquellos cortocircuitos que no se detecten por comparación de fase. Esto tiene la ventaja de que la corriente de carga no afecta la protección, y no hay problemas de sensibilidad. El esquema de la figura 7.32 constituye una modificación del de la figura 7.30a, con la adición de los detectores de falla (relevadores de distancia tipo Mho) de disparo RD y de bloqueo RB.

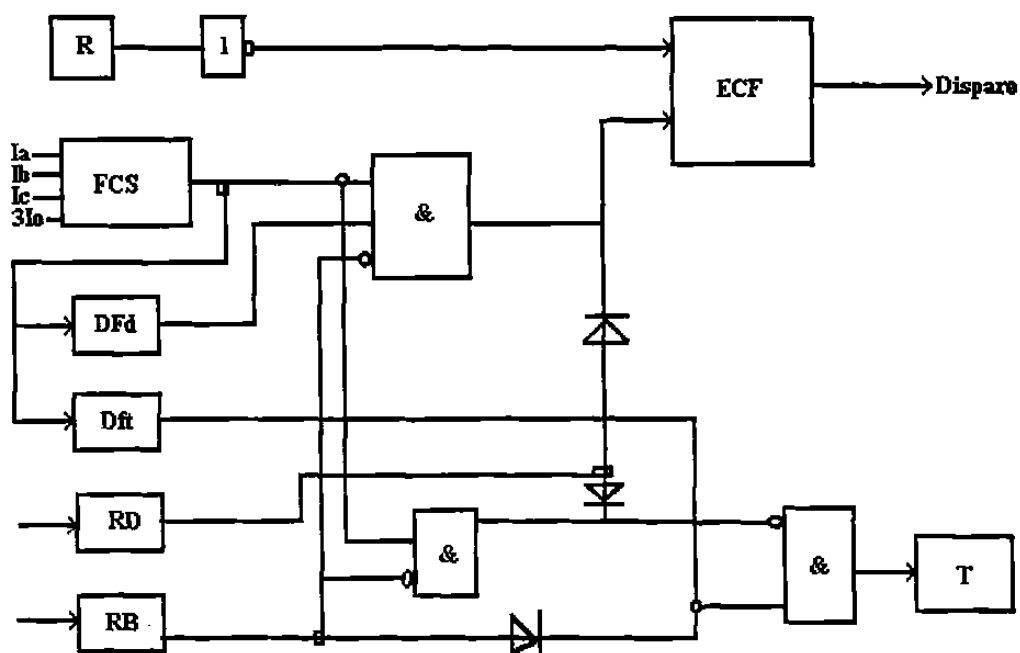


Figura 7.32

Si no existieran estos detectores, el esquema funcionaría como de comparación de fase de media onda de bloqueo (figura 7.30a). Por otra parte, si se supone que en el esquema no hay salida en el filtro combinado de secuencia FCS, su operación se basa en el principio de la comparación direccional: para cortocircuitos internos del 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 hay señal recibida, en la otra entrada del ECF también hay un "1". El ECF responde a esta condición como si a su entrada hubiera dos señales de corriente alterna en fase, y opera. El resultado es 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 remota.

Para la operación conjunta del esquema está previsto que tenga preferencia la comparación direccional sobre la comparación de fase. Cuando opera el detector RD (cortocircuitos en la dirección de la línea) se detiene la transmisión y se prepara para operar el ECF (se fija un "1" en su entrada inferior) independientemente de las señales de salida que haya en FCS y DFd. Por otra parte, cuando opera RB (cortocircuitos externos) se pone al transmisor a generar una señal continua de bloqueo, y se impide que la señal de salida de FCS detenga esta transmisión cada medio ciclo, se evita también que las señales de salida de FCS y DFd influyen sobre la señal que llega al ECF.

La necesidad de esta preferencia de la comparación direccional puede comprenderse a partir del análisis de la operación del esquema para un cortocircuito externo cercano a uno de las terminales de la línea. En la terminal cercana opera RB e inicia la transmisión de una señal continua de bloqueo, en la terminal que se está recibiendo. Si se permite que el FCS de la terminal cercana al cortocircuito detenga la transmisión de señal cada medio ciclo, tiene lugar el disparo incorrecto de la terminal lejana durante el medio ciclo en que falta la señal de bloqueo, estando presente un "1" continuo en la entrada del ECF.

CAPITULO 8

PRINCIPIOS BÁSICOS DEL FUNCIONAMIENTO DE LOS RELEVADORES ESTÁTICOS DE DISTANCIA.

INTRODUCCIÓN

La base de la relevación estática la constituye el empleo de circuitos y de componentes para lograr la variedad de funciones y características de operación que, con fines de protección, se han venido obteniendo mediante dispositivos electromecánicos.

La confiabilidad, siempre importante, ha sido objeto de especial atención al aumentar los niveles de cortocircuito, la capacidad de los circuitos y la complejidad de las conexiones. La reducción de los tiempos de operación se ha convertido en un factor especial para preservar la estabilidad dinámica, al aproximarse el carácter y la carga de los sistemas a los límites de diseño.

El cumplimiento de tales requisitos ha dejado poco potencial para posibles mejoras en los relevadores electromecánicos convencionales.

Un relevador estático para la protección, es aquel en el que la medición o la comparación de las cantidades eléctricas se hacen por medio de una red estática diseñada para dar una señal de salida en la dirección del disparo, cuando se pasa una condición crítica.

Las características de los arreglos estáticos modernos son tales que pueden reemplazar a los elementos funcionales, que se usan en el relevador electromecánico para dar las características necesarias.

A continuación se enumeran algunas ventajas que tienen los relevadores estáticos sobre los electromecánicos:

- a) Respuesta rápida, larga vida, alta resistencia al choque y vibraciones.
- b) Acción rápida de restablecimiento, el alto valor de restablecimiento y la ausencia de sobredisparos, son condiciones que se logran fácilmente por la ausencia de inercia mecánica y de almacenamiento térmico.
- c) No hay fricción en los cojinetes ni problemas de contactos, (No hay corrosión, rebote ni desgaste), por lo cual requieren un mantenimiento mínimo.
- d) La facilidad de proveer amplificación permite obtener mayor sensibilidad.

- e) Los bajos niveles de energía que se requieren en la medición de los circuitos permiten la miniaturización y minimizar las inexactitudes de los transformadores de corriente.
- f) El empleo de circuitos impresos o integrados para evitar los errores en el alambrado.
- g) En algunos hay funciones de autodiagnóstico para detectar fallas o daños en la circuitería.
- h) El tamaño del equipo puede ser reducido a la mitad de los analógicos.
- i) El costo es menor.
- j) Requiere del mínimo de mantenimiento.

La gran desventaja de este equipo, es la variación de la característica con la temperatura. Esto es solucionado con un sistema de enfriamiento funcional y confiable. Considerando las ventajas que tienen los relevadores de protección estáticos, se han considerado éstos en la protección de líneas de transmisión.

Por otra parte, se ha hecho práctica el empleo de "sistemas redundantes", es decir, se emplean dos esquemas para el mismo fin respaldándose mutuamente.

PRINCIPIOS BÁSICOS DE FUNCIONAMIENTO DE LOS RELEVADORES ESTÁTICOS DE DISTANCIA.

Los relevadores estáticos de distancia utilizan básicamente los mismos principios de funcionamiento de los relevadores electromecánicos.

La diferencia principal radica en la forma en que son manipuladas las cantidades de entrada a los circuitos de medición.

En la figura 8.1, se ilustran las cantidades que va a recibir el relevador.

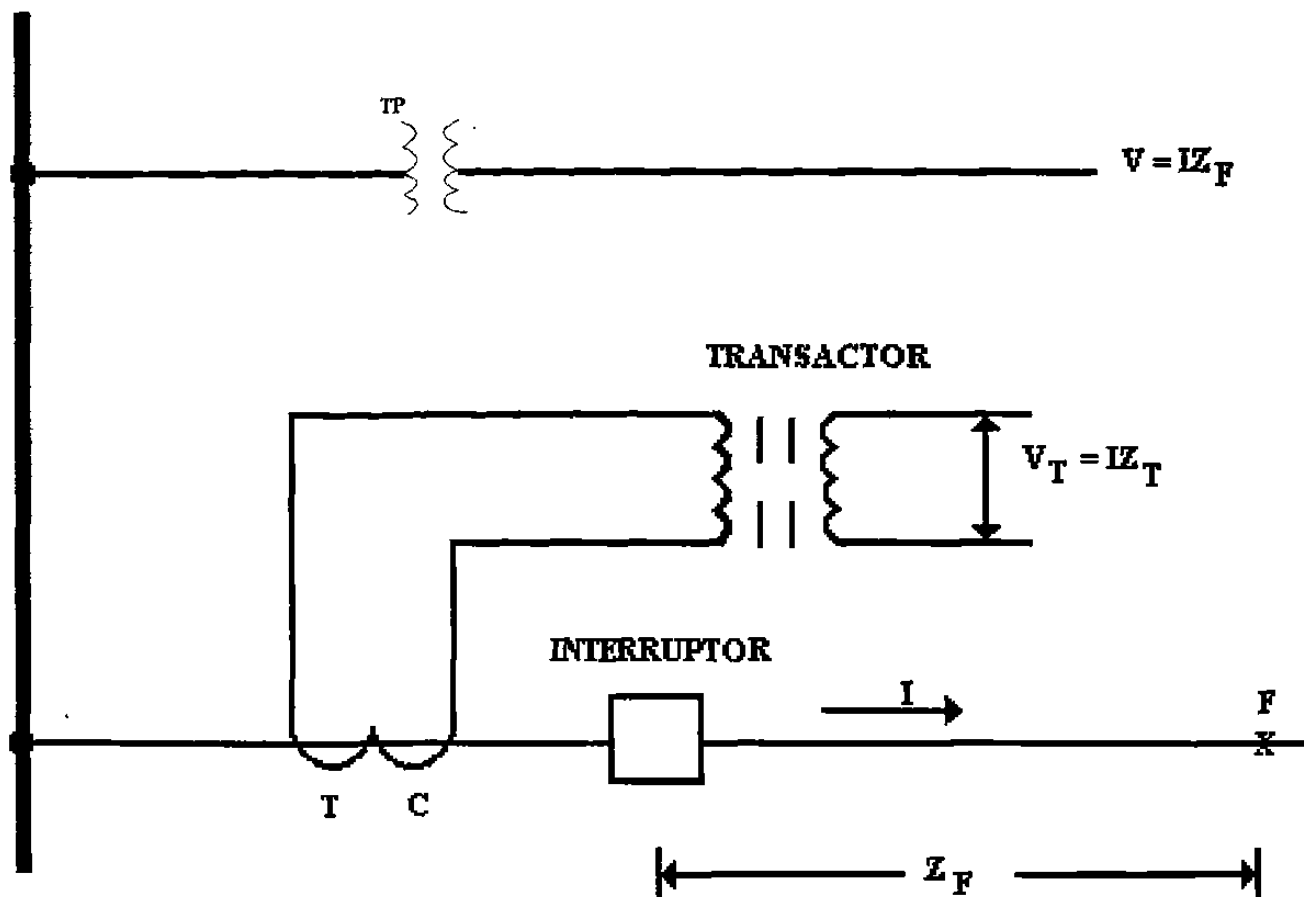


Figura 8.1

1) La corriente de entrada, I , se alimenta a una impedancia réplica (transactor), que determina el alcance y el ángulo de máximo alcance de la función.

2) El voltaje de salida del transactor, $V_T = IZ_T$, que representa el alcance del relevador y en algunas figuras se representa como IZ_R (R de reach), ó simplemente IZ ; es el producto de la corriente de falla por la impedancia del alcance del relé (Z_T) llamado también: impedancia de transferencia.

3) El voltaje $V = IZ_F$ es el voltaje de polarización, y es el producto de la corriente de falla por la impedancia que hay entre la localización del relevador y el punto de falla (Z_F); en algunas figuras se representa como V_P , (P de polarización), ó simplemente V .

La diferencia vectorial entre el voltaje que representa el alcance del relevador (IZ), y el voltaje de polarización (V) será el voltaje de operación: $V_{op} = IZ - V$; en algunas también se representa como $IZ_R - V_P$ ó $IZ_T - V$.

El voltaje de polarización V , es el vector de referencia con el que se compara el voltaje de operación ($IZ - V$); ver la figura 8.2.

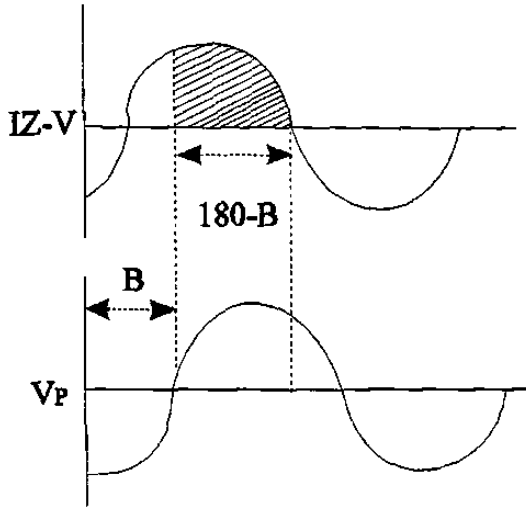


Figura 8.2

El relevador mide el ángulo entre el vector-voltaje de operación (IZ-V) y el vector-voltaje de polarización (V ó V_p), es decir, estos dos voltajes alimentan a un circuito comparador de ángulo de fase (AND) según se muestra en la figura 8.3.

Por simple observación podremos darnos cuenta que el voltaje de entrada V , se utiliza tanto para la retención de la señal de operación como para la señal de polarización.

Estos dos fasores: el voltaje de operación (IZ-V) y el de polarización (V), son procesados en un amplificador de onda cuadrada antes de alimentar al comparador (AND), según se muestra en la figura 8.4.

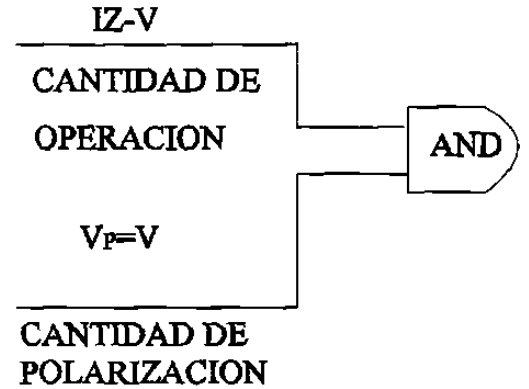


Figura 8.3

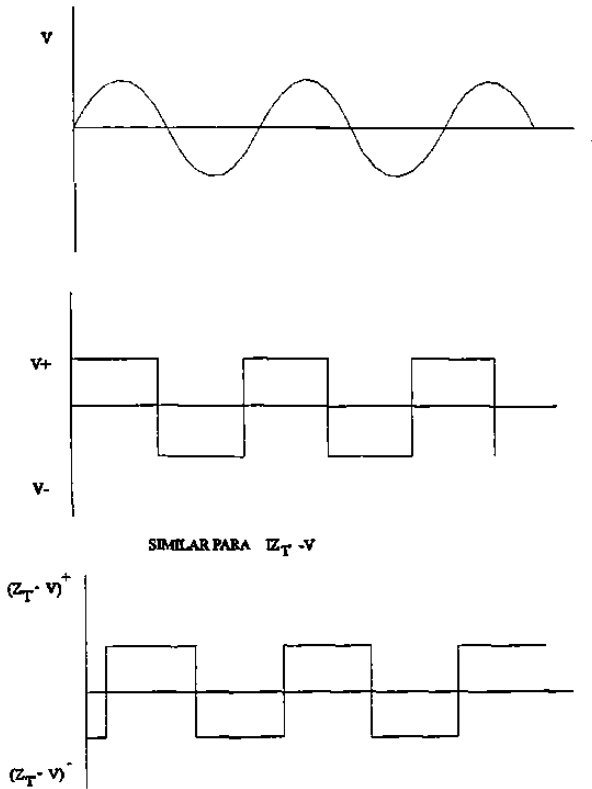


Figura 8.4

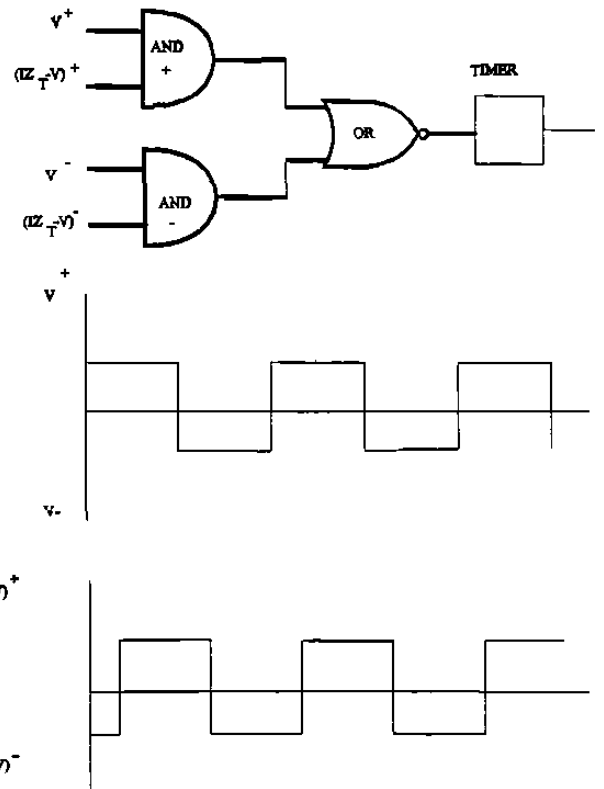


Figura 8.5

Los bloques de salida de estos amplificadores de onda cuadrada alimenta a dos circuitos comparadores (AND): Uno para medios ciclos positivos y otro para medios ciclos negativos, según se muestra en la figura 8.5.

Estos comparadores, (AND +) y (AND -), miden la COINCIDENCIA de los bloques positivos y negativos. (figura8.6).

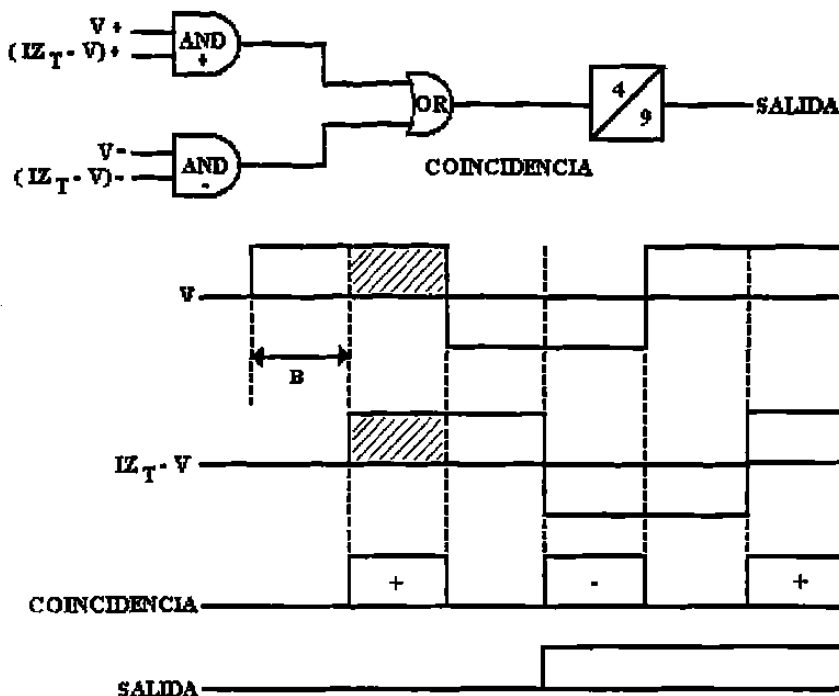


Figura 8.6

Para cualquier ángulo B de desfase entre los dos voltajes, la coincidencia entre ellos es igual a $(180^\circ - B)$, según se ilustra en la figura 8.2.

Cuando hay coincidencia entre los voltajes de operación y de polarización, el circuito AND proporcionará una entrada al temporizador, tanto en los medios ciclos positivos como en los medios ciclos negativos. (figura 8.6).

Si el tiempo de coincidencia es mayor que el ajuste del tiempo de operación (pickup) del temporizador, la función producirá salida (fig. 8.6).

Este temporizador es el que define la forma de la característica de la función de distancia, por eso se le llama temporizador de la CARACTERÍSTICA, ó temporizador característico.

De aquí podemos deducir que la forma de la característica de la función de distancia quedará determinada por el ajuste del "pickup" del temporizador de la característica. Esta característica y los vectores que la generan, se representan en un diagrama IR -IX (figura 8.7).

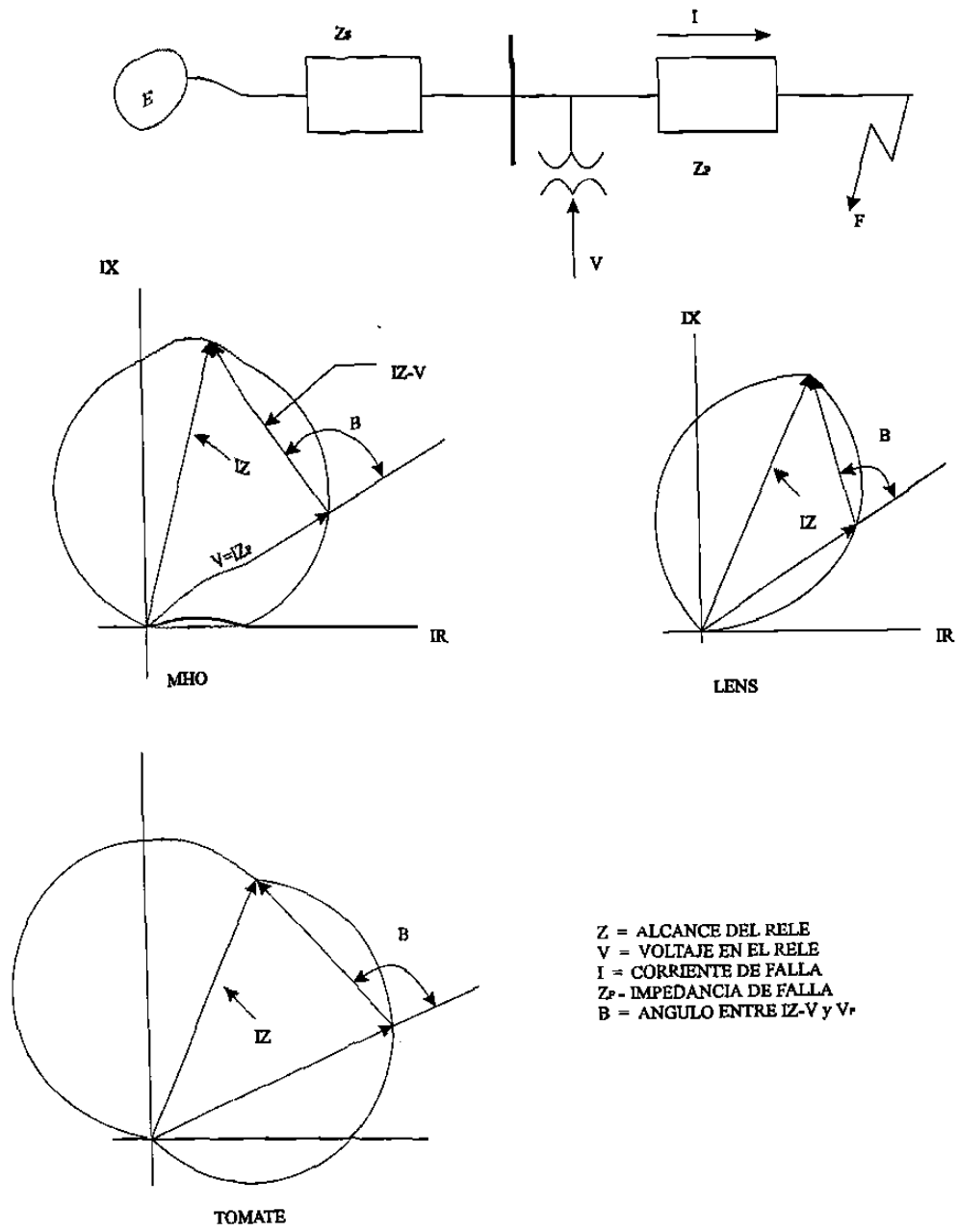


Fig. 8.7

Como el ajuste del temporizador característico se expresa en milisegundos, es más conveniente expresar el ángulo de coincidencia entre los voltajes de operación y de polarización en milisegundos, más que en grados.

Para ello, bástenos recordar que 1 ciclo, representa 360° y también 16.667 mseg. a la base de 60 Hz o sea, $360^\circ/16.667 = 21.6^\circ$, es decir, dividiendo el ángulo de coincidencia expresado en grados entre 21.6° , obtendremos ese ángulo expresado en milisegundos.

Teniendo esto en mente y recordando que el ángulo de coincidencia entre los voltajes es $(180^\circ - B)$, en donde B es el ángulo mostrado en la figura 8.2 y también ahora en la figura 8.7, podremos determinar fácilmente las formas que adoptará la característica de la función de distancia al variarse el "pickup" del temporizador característico.

La característica circular (mho) se generará cuando $B=90^\circ$ (fig.8.7), es decir cuando la coincidencia entre los voltajes de operación y polarización sea igual a 90° , porque $180^\circ - B = 90^\circ$.

Estos 90° corresponden a 4.167 mseg. ($90^\circ/21.6^\circ$). Es decir, si el "pickup" del temporizador característico se ajusta a 4.167 mseg; se generará una característica circular (Mho), mostrada en la figura 8.6.

Si el ángulo B es menor de 90° (fig.8.7), la coincidencia entre los dos fasores (operación y polarización) ocurrirá a ángulos mayores de 90° porque $180^\circ - B > 90^\circ$ y que corresponden a tiempos mayores de 4.167 mseg. o sea, si el "pickup" del temporizador característico (fig.8.6), se ajusta a valores mayores de 4.167 mseg, se generará una característica circular (Mho) (fig. 8.7).

Si el ángulo B es mayor de 90° (fig.8. 7), la coincidencia entre los dos fasores (operación y polarización) ocurrirá para ángulos menores de 90° porque $180^\circ - B < 90^\circ$ que corresponden a tiempos menores de 4.167 mseg.

Así, si el "pickup" del temporizador característico (fig.8. 6), se ajusta a valores menores de 4.167 msg, se generará una característica "mho expandida" ó "tomate" (fig. 8.7).

Podemos concluir diciendo: siempre que el tiempo de coincidencia sea igual ó mayor que el ajuste del "pickup" del temporizador característico, la falla es interna; si es menor, la falla es externa. Y también: no importa el ángulo que haya entre V e I (parte sup. fig. 8.7), para la operación de la función; es el ángulo entre V_{OP} (voltaje de operación) y V_{POL} (voltaje de polarización) - la coincidencia- la que determina si la función opera o nó. (ver fig.8.9A).

Podemos, ahora, analizar dos condiciones "extremas" que se le pueden presentar al relevador estático de distancia.

Para ello nos referiremos a la fig.8.8., que ilustra la característica mho de un relevador estático de distancia de fase (fases A-B).

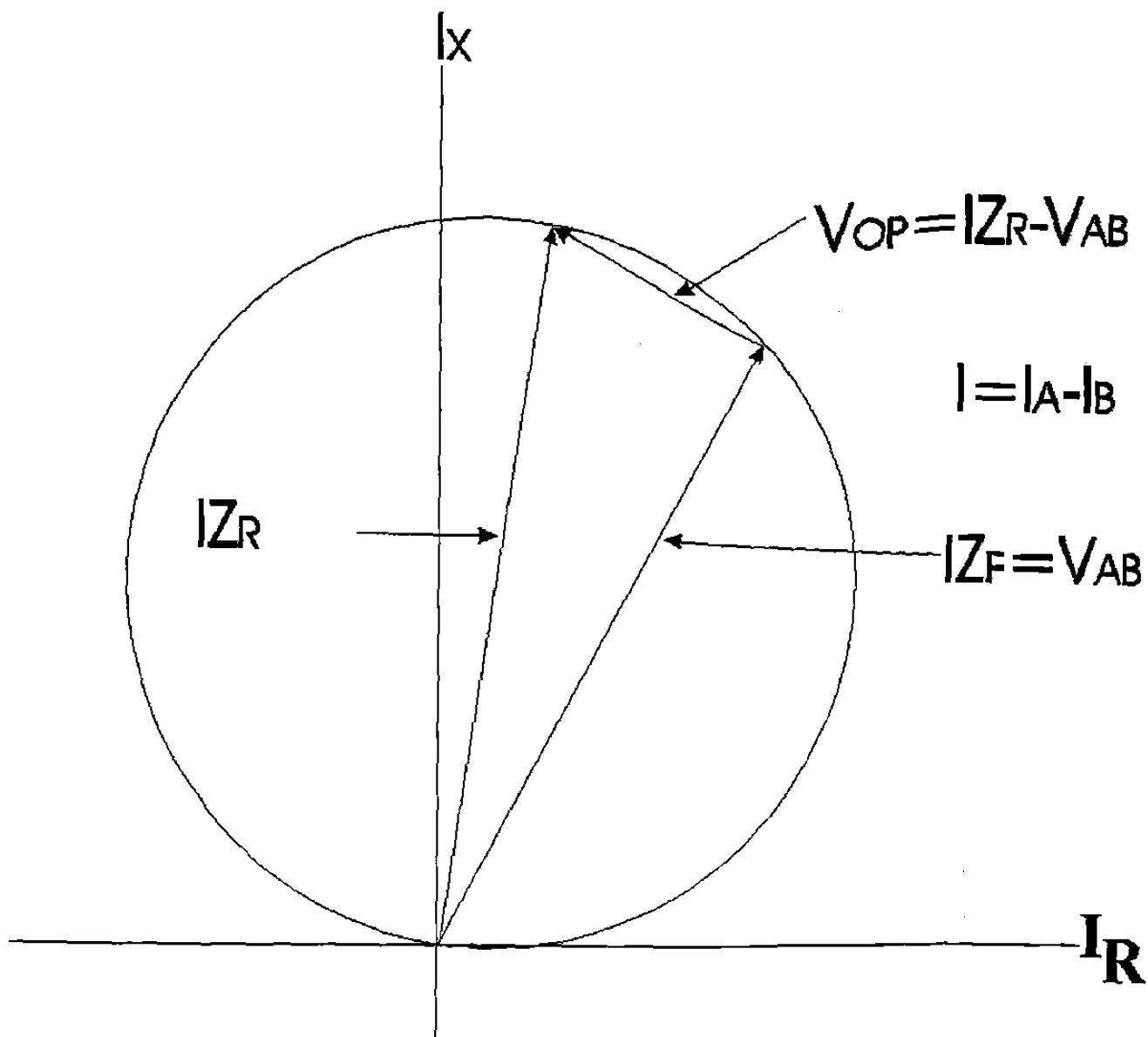


Figura 8.8

1. Si ocurre una falla entre las fases A y B, sin resistencia de arco, dentro del alcance del relevador, y si el ángulo de la impedancia réplica, Z_R , es igual al ángulo de la línea, entonces el voltaje de operación (V_{OP}) estará en fase con el voltaje de polarización (V_{AB}), la cual representa una coincidencia de 180° entre estos voltajes, y la entrada al temporizador característico será una cadena de bloques de casi medio ciclo de duración, o sea, de 8.33 mseg ($180^\circ/21.6^\circ$), según se ilustra en la figura 8.9.

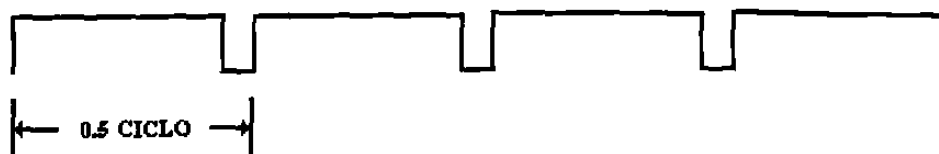


Figura 8.9

Esto producirá salida de disparo. Si hay resistencia de arco, V_{OP} no estará totalmente en fase con V_{AB} , y la coincidencia de los bloques será menor de 8.33 mseg. (1/2 ciclo).

2. Para condiciones en las que no hay circulación de corriente de carga ni de falla, el voltaje de operación (V_{OP}) está defasado 180° del voltaje de polarización (V_{POL}) porque $V_{OP} = -V_{AB}$ y $V_{POL} = V_{AB}$ (fig.8.8), lo que representa una coincidencia de 0° entre estos voltajes, y por consiguiente no habrá bloques de entrada al temporizador característico.

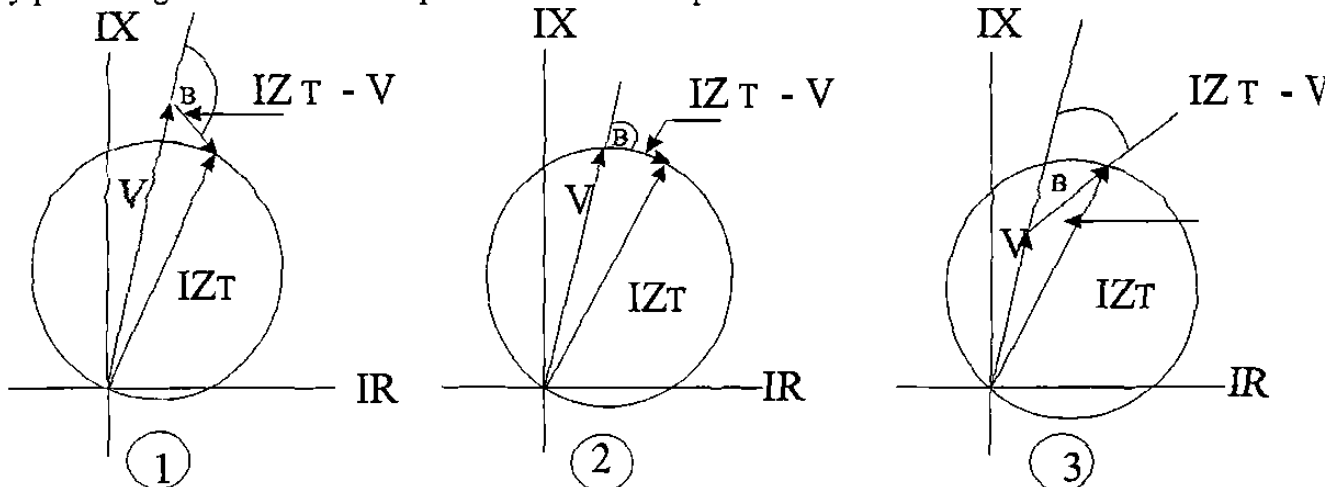


Figura 8.9A

En la figura 8.9A se ilustran, de izquierda a derecha, tres condiciones de falla para un relevador con característica mho (temporizador de característica ajustado con 4.167 mseg de pickup).

1. *Falla externa:* $B > 90^\circ$, por lo que el ángulo de coincidencia ($180^\circ - B$) es menor de 90° (4.167 mseg) y no hay operación de la función.
2. *Falla en el punto de balance:* $B = 90^\circ$, y el ángulo de coincidencia ($180^\circ - B$) es igual a 90° (4.167ms) el relevador comienza a operar.
3. *Falla interna:* $B < 90^\circ$, así que el ángulo de coincidencia ($180^\circ - B$) es mayor de 90° (4.167 mseg), hay operación de la función.

CARACTERÍSTICA DINÁMICA.

Hasta aquí hemos visto cómo se genera la característica del relevador estático de distancia en estado estable, es decir, la característica que pasa por el origen.

Sin embargo, el diseño de estos relevadores utilizan un circuito de memoria en el circuito de polarización, para “recordar” el voltaje de prefalla durante el tiempo suficiente para poder tomar la decisión de si la falla (fallas severas cercanas a la localización del relevador) ocurrió enfrente o detrás del relevador (figura 8.10).

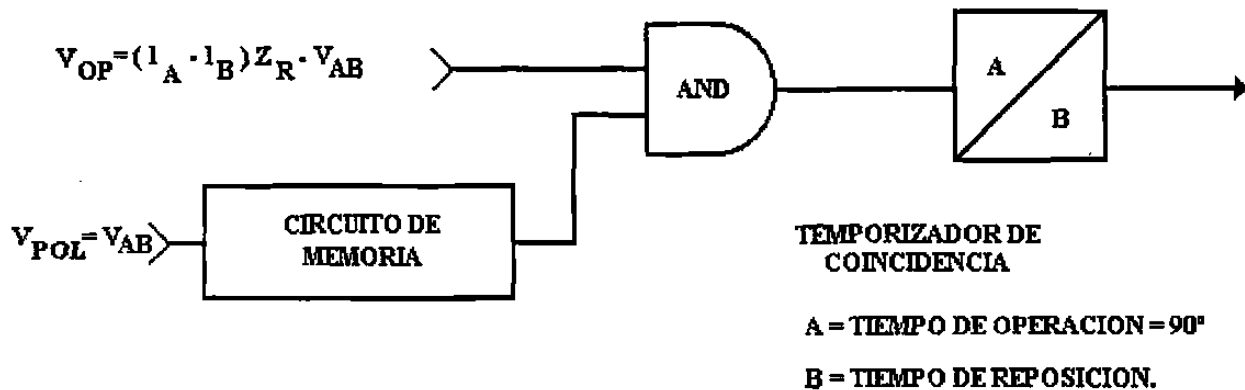


Figura 8.10

Básicamente, el circuito de memoria consiste en un filtro sintonizado a la frecuencia del sistema.

Si la señal de entrada al filtro es cortocircuitada repentinamente, como sería en el caso de una falla severa cercana al relevador, el circuito de la memoria continuará oscilando durante varios ciclos a la frecuencia del sistema (figura 8.10).

La figura 8.10 es para un relevador estático de distancia de fase (fases A-B), con característica circular (mho).

Los relevadores estáticos de distancia con memoria en su circuito de polarización tendrán, además de la característica en estado estable, la llamada característica dinámica, la cual determina la respuesta del relevador inmediatamente después de haber ocurrido la falla.

Dicho de otra forma, la característica dinámica es el resultado del tiempo que le toma al voltaje de polarización (en el circuito de memoria) para “acomodarse” de la condición de prefalla a la de falla.

Justo en el momento de ocurrir la falla, el voltaje inicial de polarización es el voltaje de la fuente atrás del relevador, V_{AB} (source), es decir, es el voltaje de prefalla, que es diferentes al voltaje V_{AB} de falla, según se ilustra en la figura 8.11.

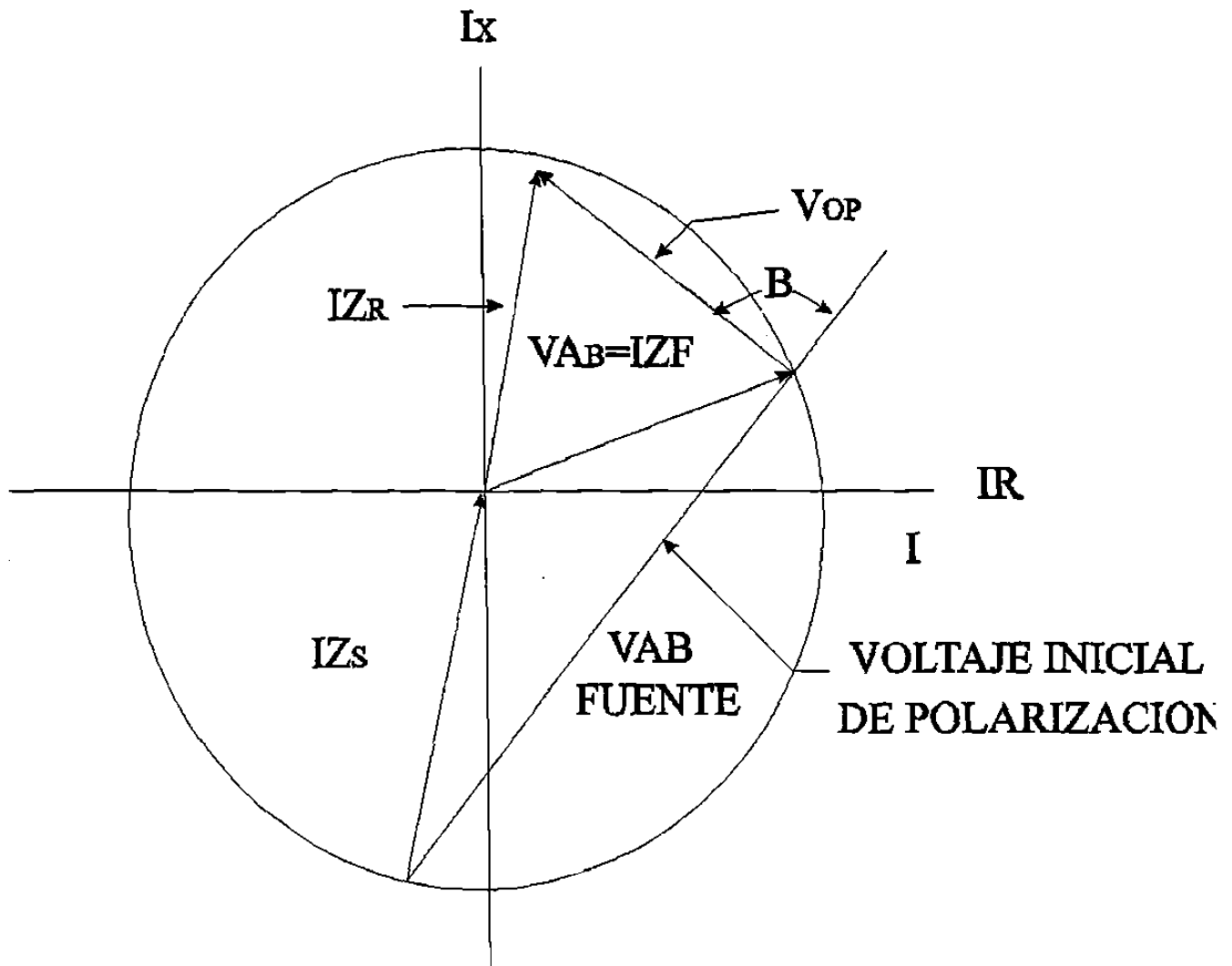


Figura 8.11

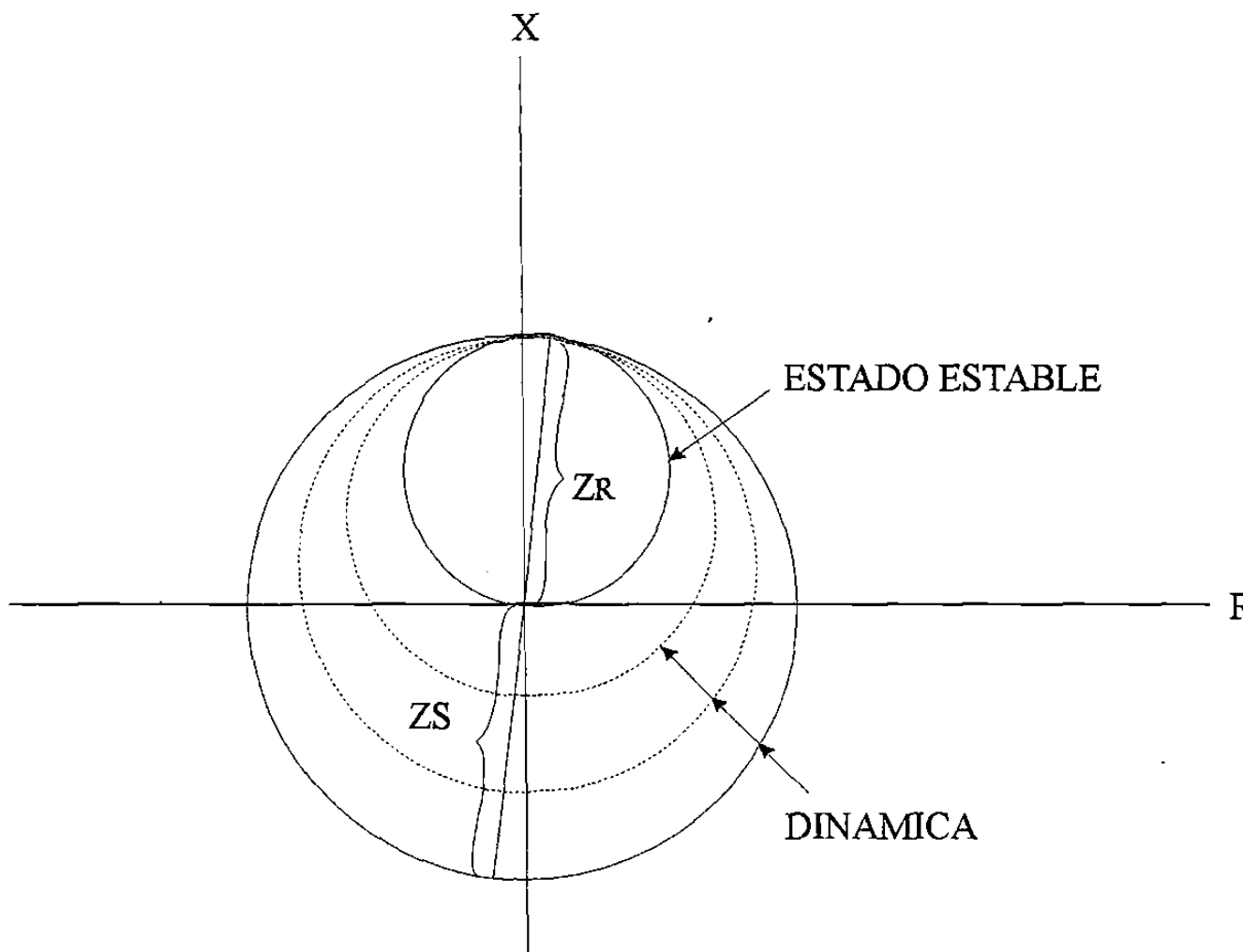
El ángulo B , existe entre el voltaje inicial de polarización, V_{AB} (source) y el de operación, V_{OP} , es el responsable de producir la característica dinámica inicial. (figura 8.11).

El ángulo de la impedancia réplica del relevador (Z_R), se escogió igual al ángulo de la impedancia de la fuente.

Como se trata de una característica circular (mho), el ángulo B , entre los voltajes de operación y polarización es de 90° y la coincidencia, por consiguiente es también 90° ($180^\circ - B$), ó 4.167 msec. El diámetro de la característica dinámica inicial es $I_Z S + I_Z R$.

De aquí podemos deducir que el tamaño inicial de la característica dinámica es una función de la impedancia de la fuente detrás del relevador. Es decir, que cuanto más débil sea la fuente, mayor será el diámetro de la característica dinámica y viceversa.

La característica dinámica que se ha ilustrado en la figura 8.11 es, como hemos mencionado, la que existe inmediatamente después de la incidencia de la falla. Después, la característica comienza a contraerse hasta llegar a la de estado estable, como se muestra en la figura 8.12.



CARACTERÍSTICA CAMBIA CON EL TIEMPO

Figura 8.12

El tiempo que le toma "acomodarse" al voltaje de polarización de la posición de prefalla (t_0) a la de falla (t_3), está determinada por la constante de tiempo del circuito de memoria y por la magnitud del voltaje de prefalla que se manifieste a la entrada del circuito de memoria y es del orden de 3 a 5 ciclos.

La característica dinámica, aunque por naturaleza es variable, sólo tiene significado durante el corto período en el que es efectivo el circuito de memoria y no debe confundirse con la característica "variable" en estado estable que tienen algunos relevadores estáticos de distancia.

A primera vista parecería que la característica dinámica no es direccional al incluir un área considerable debajo del eje R.

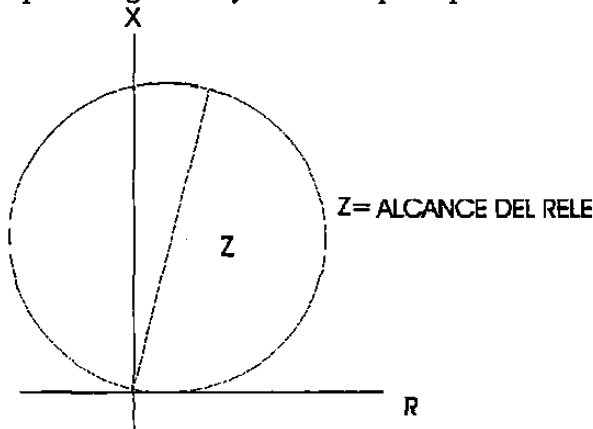
Esto no es cierto, porque la construcción de la figura 8.11, sólo es válida para corrientes que fluyan a partir de la impedancia de la fuente, detrás del relevador, hacia la localización de éste y hacia la falla, en la dirección de disparo.

Esta característica dinámica ofrece ventajas, entre ellas:

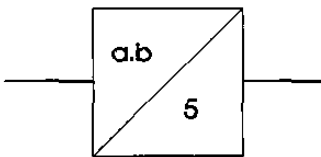
1. Tiene mucho más alcance a lo largo del eje R que la característica en estado estable; esto implica que fallas con resistencia de arco considerable, cercanas al relevador, podrán ser vistas con amplio margen.
2. Operación confiable para fallas trifásicas severas enfrente del relevador, en las que el voltaje puede llegar a cero.
3. El área bajo el eje R permitiría disparo (dinámicamente hablando) para fallas capacitivas, enfrente del relevador (si hubiese capacitores serie), pero esto, claro, no significa que habrá disparo para fallas atrás del relevador.

TEMPORIZADOR DE LA CARACTERÍSTICA:

La forma de la característica de las funciones estáticas de distancia está determinada por el ajuste del tiempo de operación (pickup) del temporizador estático. Este temporizador es del tipo "integrador" y tiene un "pickup" transitorio y otro en estado estable (figura 8.13.).



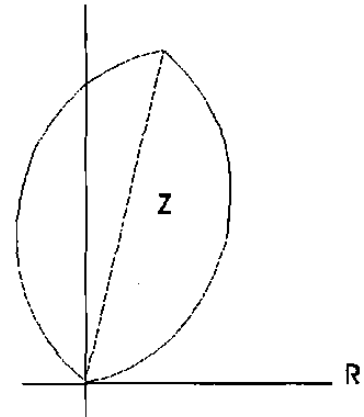
A. CIRCULO (MHO)
TEMPORIZADOR



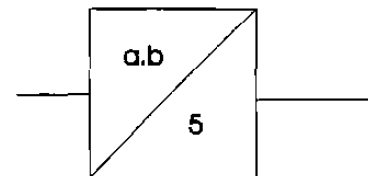
a= Pick -up Transitorio > b

b= Pic-up de estado estable = 4.16ms.

5= Tiempo de restablecimiento



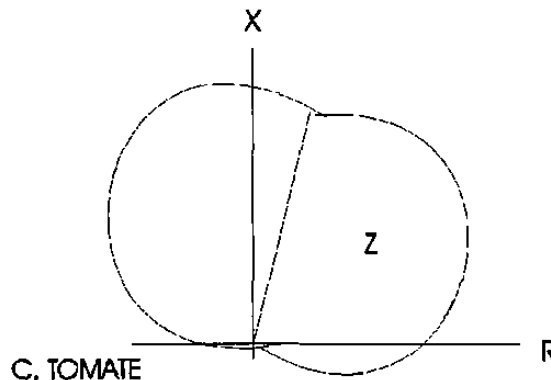
B. LENTE
TEMPORIZADOR



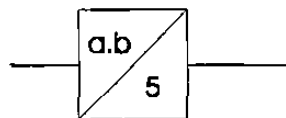
a= Pick-up transitorio. b

b= Pick-up de estado estable < 4.16

5= Tiempo de restablecimiento



C. TOMATE
TEMPORIZADOR



a= Pick-up transitorio. b

b= Pick-up de estado estable < 4.16ms

5= Tiempo de restablecimiento

Figura 8.13

Básicamente, un temporizador integrador es aquel en el que al desaparecer la señal de entrada que lo hizo operar, su circuito de entrada no se repone inmediatamente, sino que le toma un cierto tiempo que dependerá del diseño del circuito; es decir, si la señal de entrada se restablece antes de que se haya repuesto completamente el circuito de entrada, el temporizador producirá salida más rápidamente de lo que se espera en un temporizador que no sea integrador.

El tiempo de operación transitoria "a" (figura 8.13) se refiere a la mínima duración que debe tener el primer bloque de entrada para que opere el temporizador.

Este, entonces, se mantendrá operando si los bloques subsiguientes tienen una duración igual ó mayor que el tiempo de operación en estado estable "b", y si la separación entre ellos es menor que el tiempo de reposición (5 mseg, en el caso de la figura 8.13).

Si la duración del primer bloque es menor que el tiempo de operación transitoria "a" del temporizador, entonces la función sólo producirá salida si los bloques siguientes tienen una duración igual al tiempo de operación en estado estable "b" del temporizador y si la separación entre bloques es menor que el tiempo de reposición del temporizador (Figura 8.13).

Esta operación transitoria y en estado estable del temporizador tiene por objeto aumentar la seguridad para fallas que ocurran en el sentido contrario de disparo y durante los transitorios que se generan al librarse una falla.