

## 8

# RELEVADORES TIPO PILOTO

### 8.1 INTRODUCCIÓN.

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

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

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

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

## 8.2 PRINCIPIOS DE OPERACIÓN Y CLASIFICACIONES.

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

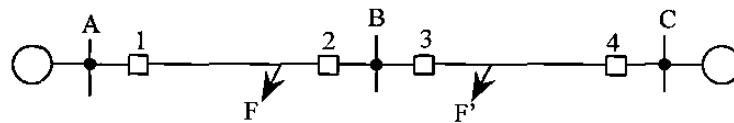


Figura 8.1 Fundamentación necesidad de protección piloto para una L.T.

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

- a) Protecciones piloto de bloqueo.

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

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

b) Protecciones piloto de disparo (disparo transferido).

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

## **8.3 CANALES PILOTO.**

### **8.3.1 HILO PILOTO.**

Este canal consiste en un par de conductores, generalmente de tipo telefónico, por los que la información puede transmitirse mediante señales de corriente directa (actualmente en desuso), de corriente alterna de frecuencia del sistema (50 ó 60 Hz) la cual es la variante más difundida, o de corriente alterna con una frecuencia del orden de 1000 a 3000 Hz (tonos de audio). Estos conductores deben de ser subterráneos para garantizar un adecuado nivel de confiabilidad del canal; no se recomienda utilizar conductores aéreos para esta finalidad, aunque esta variante se aplica en la práctica. Existen valores límites admisibles de la resistencia serie y la capacidad paralelo del hilo piloto; aunque se dispone de medios para compensar parcialmente los efectos de estos parámetros sobre el funcionamiento del canal, ellos constituyen restricciones a la longitud del canal y al calibre mínimo de conductor a utilizar. No es recomendable la aplicación de la protección por hilo piloto en líneas superiores a unos 25 Km.

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

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

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

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

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

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

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

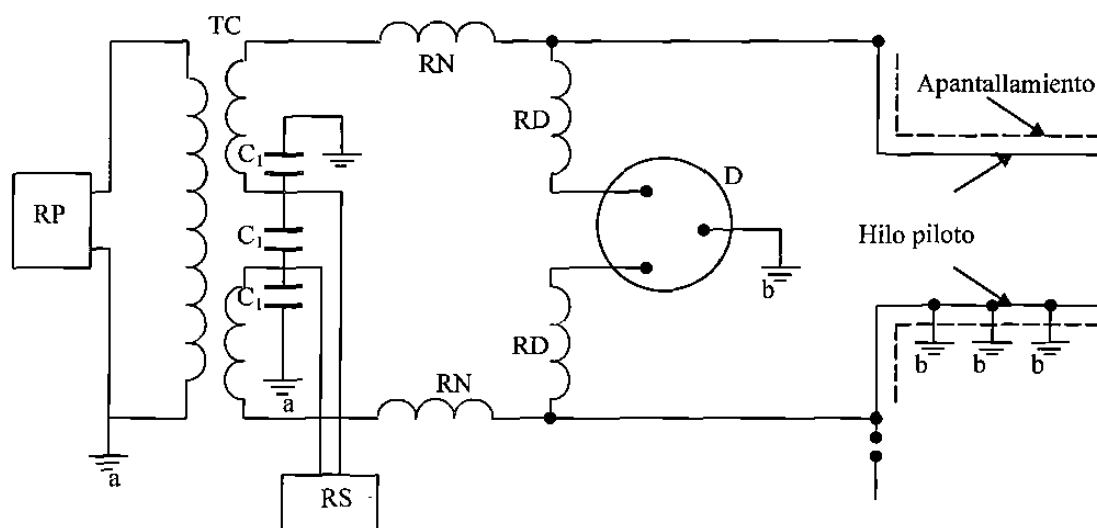


Figura 8.2 Protección y supervisión del hilo piloto y de los equipos terminales.

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

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

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

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

La protección contra sobrevoltaje por elevación del potencial de la malla de tierra de la subestación se brinda con el reactor de neutralización de dos devanados, cuya corriente de magnetización circula entre la malla de tierra y la tierra remota a través de los capacitores “C<sub>1</sub>” y la capacitancia distribuida a tierra del hilo piloto. A través de estos reactores aparece la diferencia de potencial existente entre la malla de tierra y la tierra remota, por lo que los conductores piloto tienen prácticamente el potencial de la tierra remota, mientras que el lado que corresponde al transformador de aislamiento se encuentra al potencial de la malla de tierra. El reactor “RN” presenta una impedancia baja al paso de la señal normal de protección. Esta protección también puede brindarse con un transformador de neutralización que desempeña la misma función que el reactor “RN”, pero se conecta en forma diferente. La protección contra sobrevoltaje por elevación del potencial de la malla de tierra no es necesaria si los aislamientos a tierra del transformador de aislamiento y el hilo piloto son capaces de soportar esa elevación de potencial.

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

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

El relevador de supervisión “RS” se conecta al canal a través del capacitor C<sub>2</sub>, colocado entre los dos devanados del transformador de aislamiento.

### 8.3.2 CANAL DE ONDA PORTADORA.

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

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

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

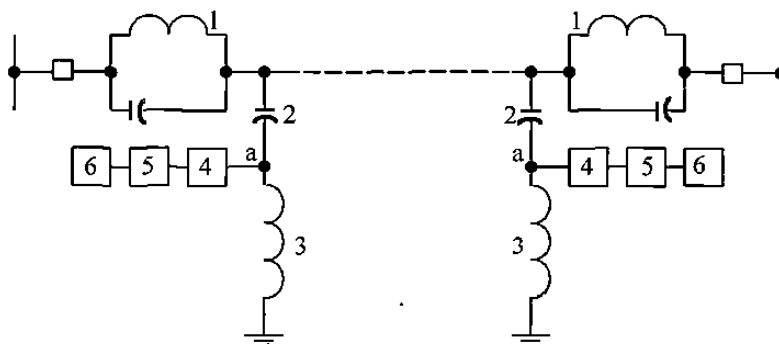


Figura 8.3 Esquema general canal de onda portadora una fase de una L.T.

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



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

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

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

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

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

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

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

### **8.3.3 CANAL DE MICROONDAS.**

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

La información puede transmitirse por el canal de dos formas:

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

Ventajas:

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

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

### **8.3.4 CANAL DE FIBRA OPTICA.**

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

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

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

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

#### **8.4 PRINCIPIO DE OPERACIÓN PROTECCIÓN DIFERENCIAL.**

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

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

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

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

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

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

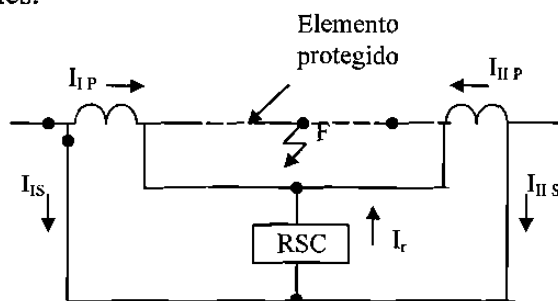


Figura 8.4 Protección diferencial de una fase elemento de dos terminales.

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

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

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

$$I_r = I_{Is} + I_{IIs}$$

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

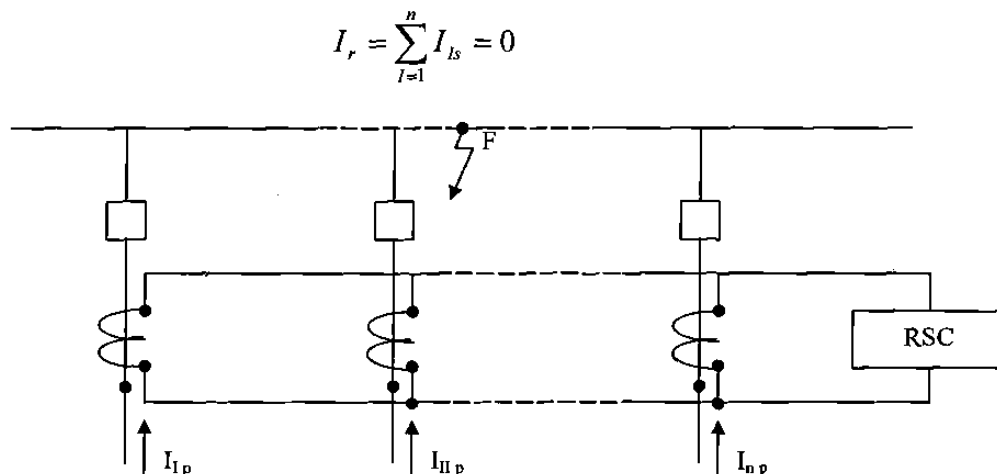


Figura 8.5 Protección diferencial elemento de dos terminales.

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

$$k_s = \frac{I_{cc_{int_{min}}}}{I_{ap}} = \frac{I_{cc_{int_{min}}}}{n_{tc} I_{ar}}$$

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



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

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

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

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

#### **8.4.1 RELEVADORES DE PORCENTAJE DIFERENCIAL.**

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

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

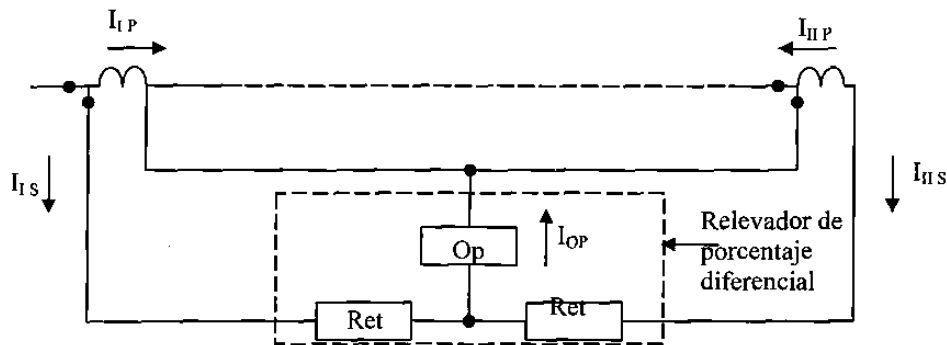


Figura 8.6 Diagrama esquemático de un relevador de porcentaje diferencial.

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

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

$$I_{op} = I_{Is} + I_{IIs}$$

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



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

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

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

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

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

La condición de operación es:

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

La característica de operación es la recta:

$$I_{op} = kI_{ret}$$

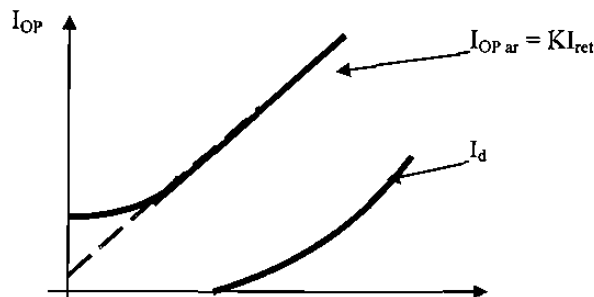


Figura 8.8 Característica de operación

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

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

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

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

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

## **8.5 PROTECCIÓN POR HILO PILOTO.**

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

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

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

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

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

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

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

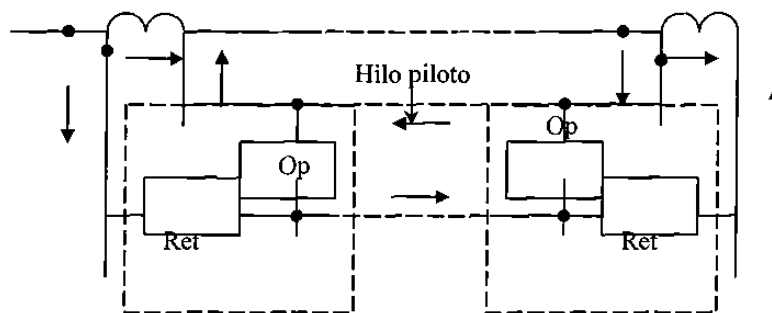


Figura 8.9a Protección piloto de corrientes circulantes.

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

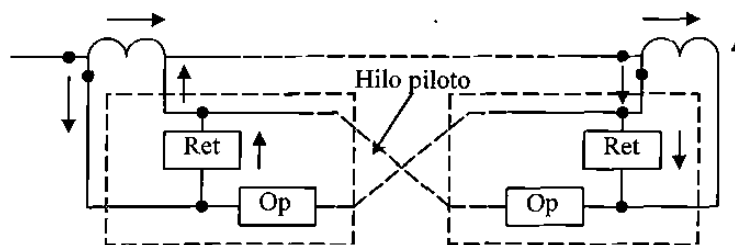


Figura 8.9b Protección piloto voltajes en oposición.

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

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

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

1. Un filtro combinado de secuencia FCS.
2. Transformador saturable "T<sub>s</sub>"
3. Relevador diferencial "RD"
4. Transformador de aislamiento "T<sub>a</sub>"

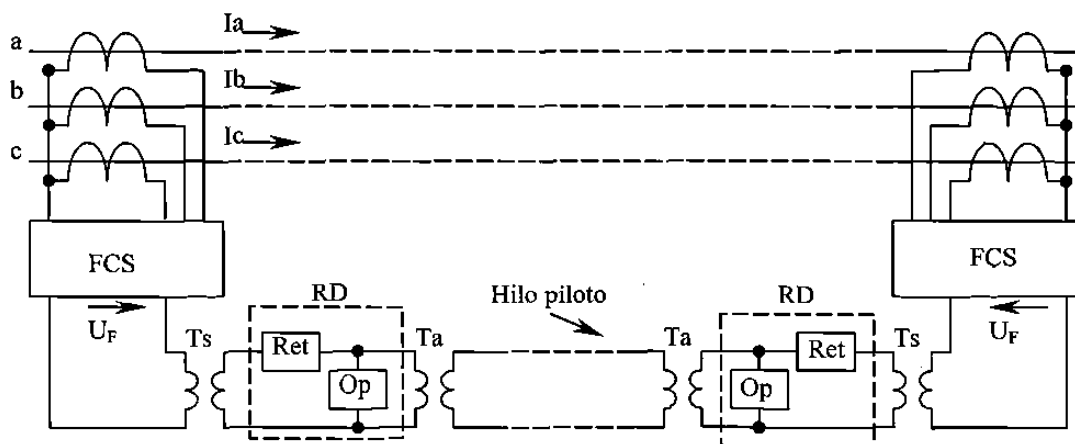


Figura 8.10 Diagrama esquemático protección hilo piloto de corrientes circulantes

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

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

Donde:

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

$K_1$ ,  $k_2$ ,  $k_0$  Coeficientes constantes.

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

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

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

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

Los problemas que presenta la protección por hilo piloto son:

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



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

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

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

## 8.6 PILOTO POR COMPARACIÓN DE FASE.

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

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

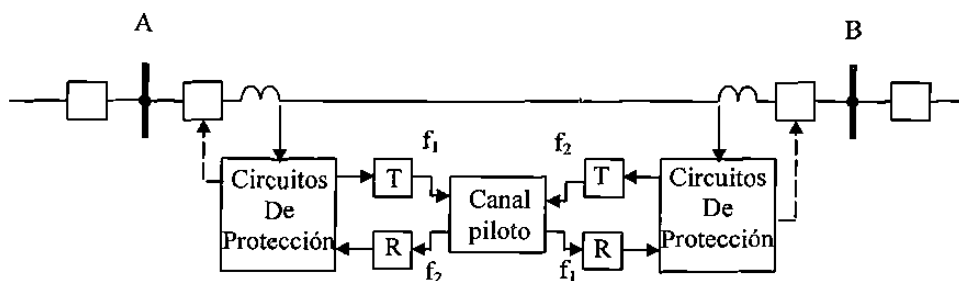


Figura 8.11 Protección piloto por comparación de fase.

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

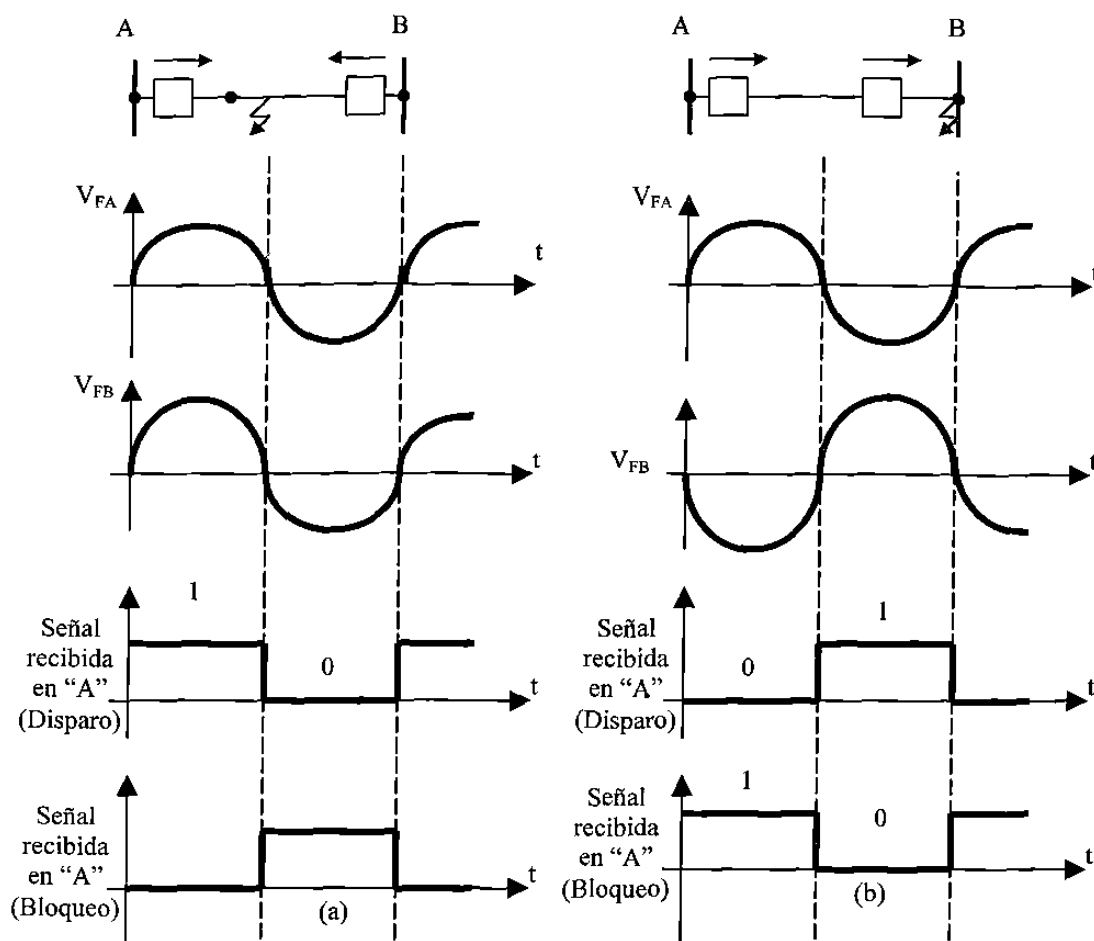


Figura 8.12 Principio de operación por comparación de fase

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

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

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

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

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

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

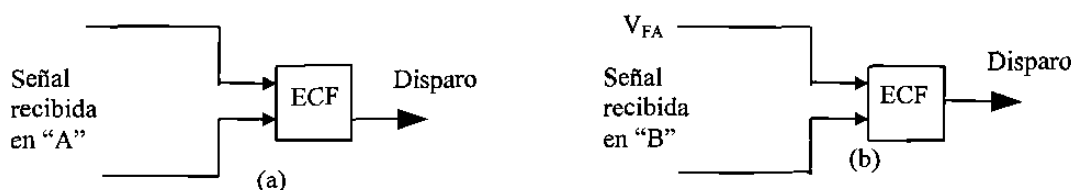


Figura 8. 13 Comparación de fase de señales de disparo (a) y de bloqueo (b)

En realidad existen errores de fase debidos a:

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

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

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

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

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

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

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

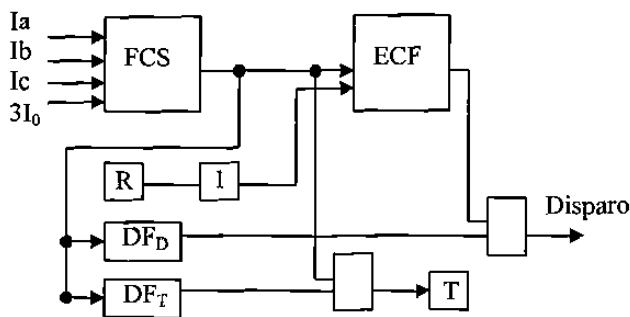


Figura 8.14 Esquema de media onda de bloqueo (“ON-OFF”)

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

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

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

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

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

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

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

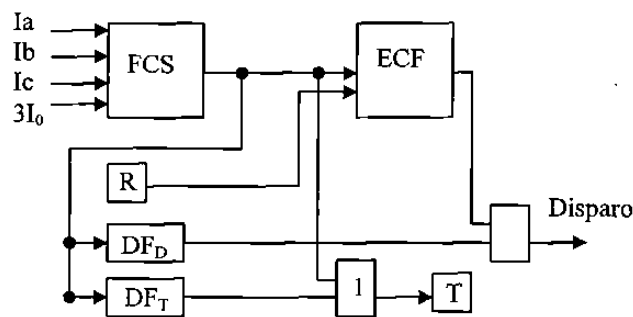


Figura 8.15 Esquema de media onda de disparo (“ON-OFF”)

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

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



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

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

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

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

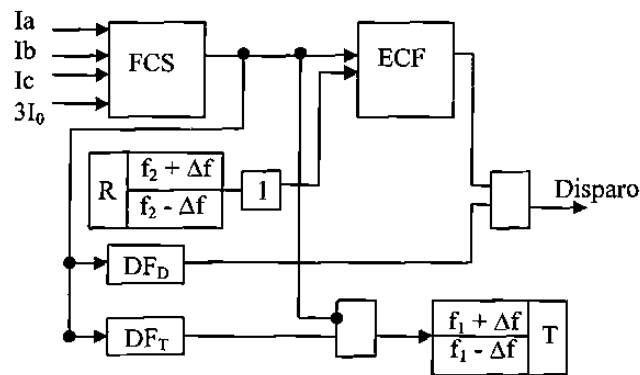


Figura 8.16 Esquema de media onda de bloqueo (Corrimiento de frecuencia)

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

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

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

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

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

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

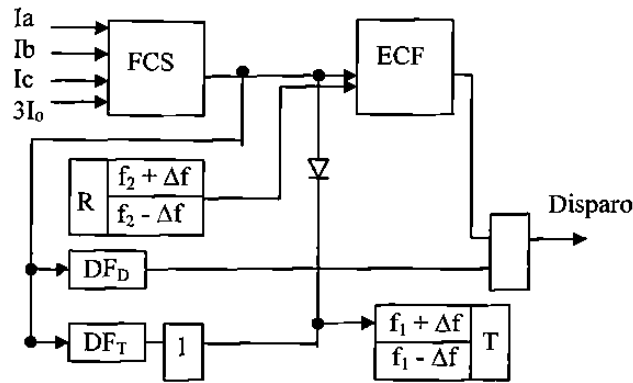


Figura 8.17 Esquema de media onda de disparo (Corrimiento de frecuencia)

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

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

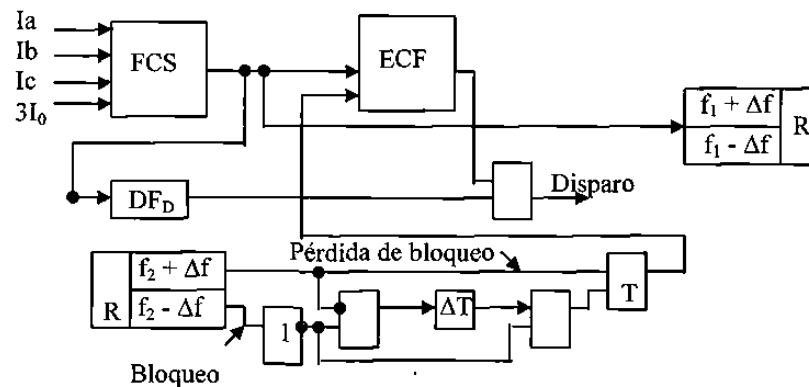


Figura 8.18 Esquema de media onda de pérdida de bloqueo (Corrimiento de frecuencia)

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

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

El canal de bloqueo realiza dos funciones:

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

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

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

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

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

### **8.6.6 PILOTO DE COMPARACIÓN DE FASE DE ONDA COMPLETA.**

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

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

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

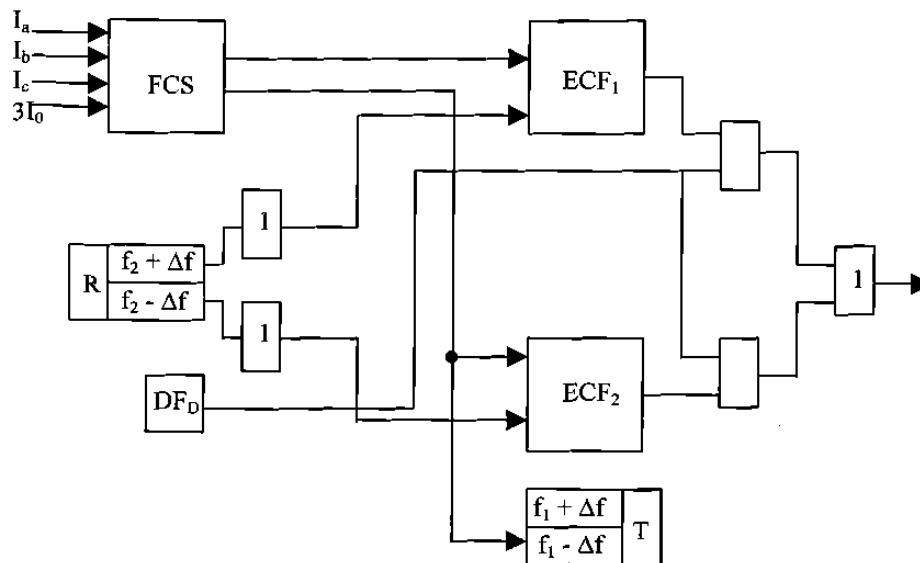


Figura 8.19 Protección piloto por comparación de bloqueo fase onda completa

### 8.6.7 CONSIDERACIONES ACERCA DE LAS SEÑALES A COMPARAR.

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

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

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

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

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

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

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

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

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

### 8.6.8 COMPARACIÓN DE FASE SEGREGADA.

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

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

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

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

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



### **8.6.9 VENTAJAS.**

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

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

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

### **8.7 PILOTO POR COMPARACIÓN DIRECCIONAL.**

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

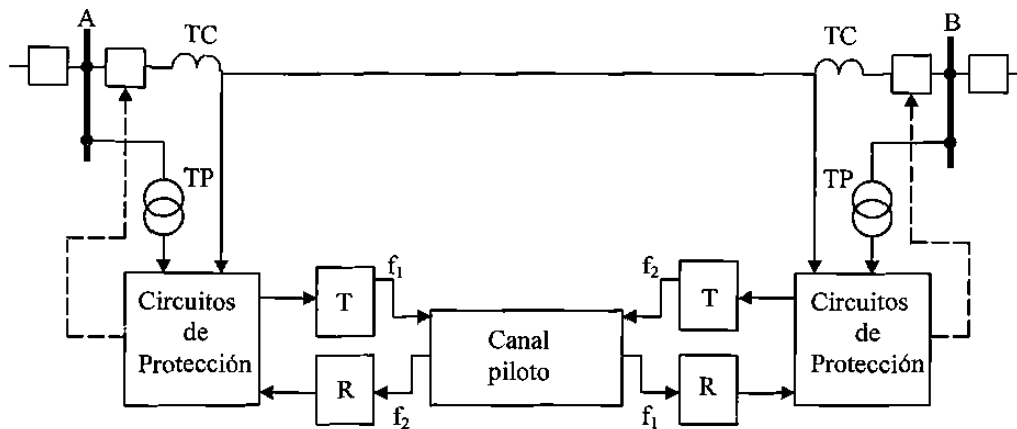


Figura 8.20 Protección piloto por comparación direccional.

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

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

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

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

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

### 8.7.1 PROTECCIÓN PILOTO DE BLOQUEO.

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

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

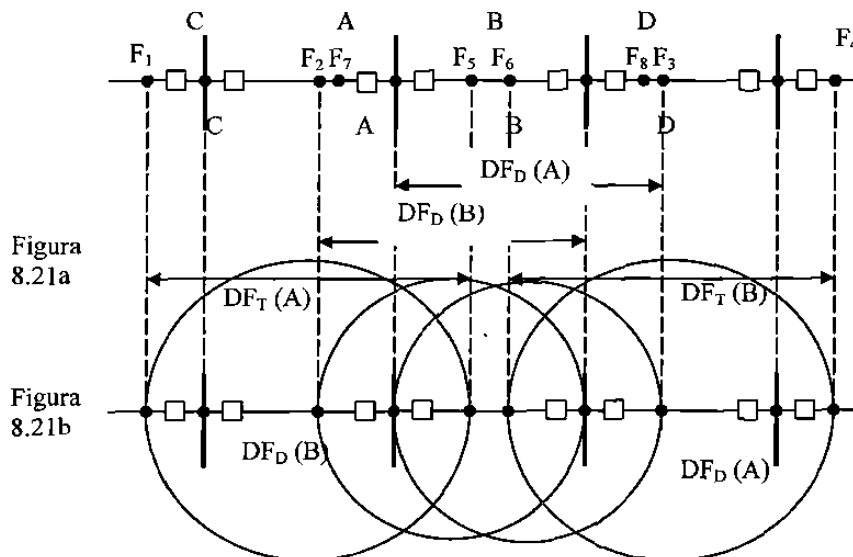


Figura 8.21 Zonas de operación (a) y características de operación (b) detectores de falla.

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

Los detectores de falla de disparo “DF<sub>D</sub>” tienen que ser direccionales y sobrealcanzar la o las terminales remotos de la línea.

Los detectores de falla de control de transmisión “DF<sub>T</sub>” deben cubrir hacia fuera de la línea protegida una zona mayor que la de los “DF<sub>D</sub>” de la otra u otras terminales. Así por ejemplo, el detector “DF<sub>T</sub>” de la terminal “A” alcanza hasta el punto “F<sub>1</sub>”, situado más lejos de “A” que el punto “F<sub>2</sub>”, hasta el que alcanza el detector “DF<sub>D</sub>” de la terminal “B”. Con esto se garantiza que todo cortocircuito externo que haga operar los “DF<sub>D</sub>” de las terminales remotos, también quede dentro de la zona de operación del “DF<sub>T</sub>” local, y éste pueda iniciar la transmisión de la señal de bloqueo. Generalmente se utiliza en calidad de “DF<sub>T</sub>” la tercera zona de protección de distancia, que debe estar desplazada hacia el tercer cuadrante del plano complejo impedancia (tercera zona invertida, es conveniente mantener cierto desplazamiento de la característica hacia la línea protegida (puntos “F<sub>5</sub>” y “F<sub>6</sub>”) para garantizar la operación de los relevadores tipo “Mho” para cortocircuitos trifásicos limpios en el inicio de las líneas adyacentes (puntos “F<sub>7</sub>” y “F<sub>8</sub>”).

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

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

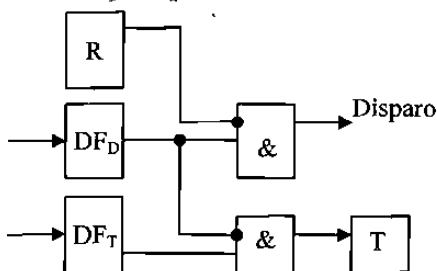


Figura 8.22 Protección piloto de bloqueo

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

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

- En la terminal “A” opera el “DF<sub>D</sub>” y prepara las condiciones para el posible disparo local.
- En la terminal “B” opera el “DF<sub>T</sub>” y se pone en funcionamiento el transmisor. La señal de bloqueo se recibe en la terminal “A” y se impide el disparo.

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

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

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

## 8.7.2 PROTECCIÓN PILOTO DE PÉRDIDA DE BLOQUEO.

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

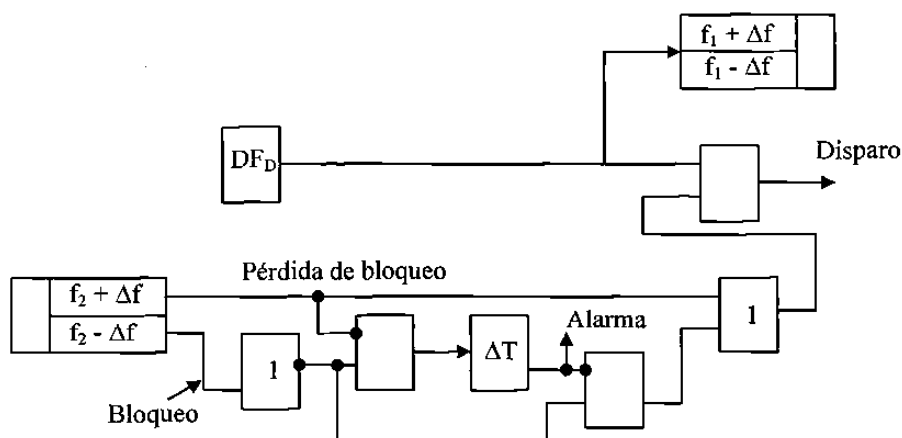


Figura 8.23 Protección piloto de pérdida de bloqueo

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

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

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

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

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

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

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

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

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

### **8.7.3 PILOTO DE DISPARO DE SOBREALCANCE.**

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

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

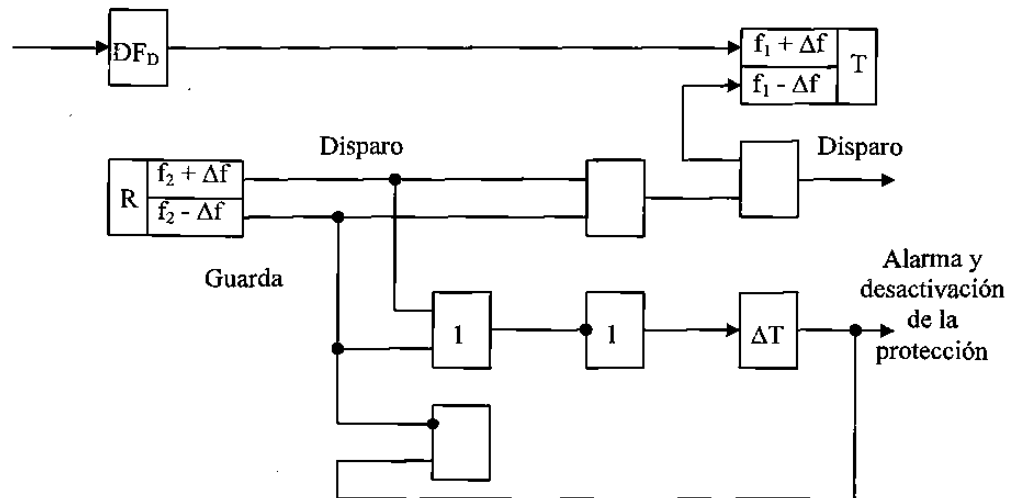


Figura 8.24 Protección piloto de disparo de sobrealcance

Los detectores de falla de disparo “DF<sub>D</sub>” deben sobrealcanzar las terminales remotos de la línea.

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

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



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

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

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

### 8.7.4 PILOTO DE DISPARO DE SUBALCANCE.

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

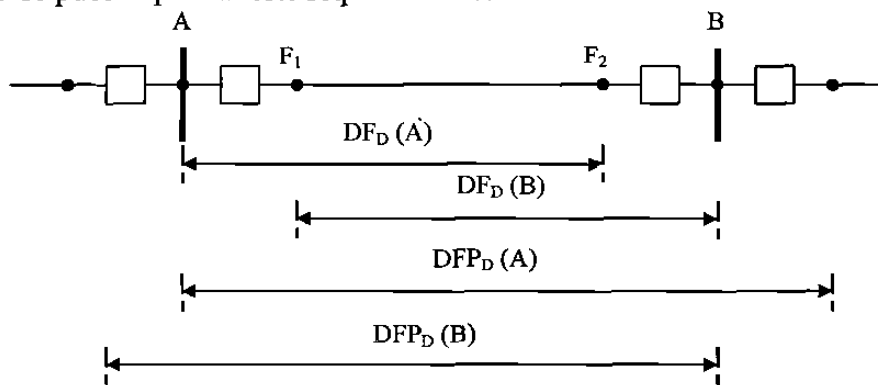


Figura 8.25 Zonas de operación de los detectores de falla.

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

Existen dos variantes de este tipo de protección:

- Protección no permisiva (figura 8.26)

En cortocircuitos externos no opera ningún “DF<sub>D</sub>” ni se pone en funcionamiento ningún transmisor, por lo que no existe el disparo. Para cortocircuitos internos en la zona central de la línea (punto “F<sub>1</sub>” figura 8.21) operan los “DF<sub>D</sub>” y se ponen en funcionamiento los transmisores, hay una señal de salida en los receptores, y por las dos razones se origina el disparo en ambas terminales. Para cortocircuitos internos cercanos a una terminal (punto “F<sub>2</sub>” figura 8.21) el “DF<sub>D</sub>” de esa terminal opera, originando el disparo de su interruptor y pone en funcionamiento su transmisor, y mientras en la otra terminal se recibe esa señal y se origina el disparo. Esta variante tiene una gran probabilidad de operación incorrecta por cualquier ruido que se genere en el canal o problemas en el receptor, pues la sola recepción de la señal es una condición de disparo.

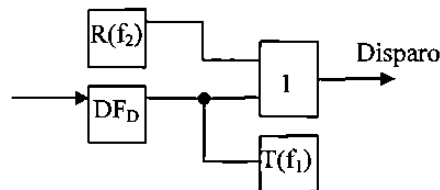


Figura 8.26 Diagrama esquemático protección piloto de subalcance no permisiva

- Protección permisiva (figura 8.27)

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

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

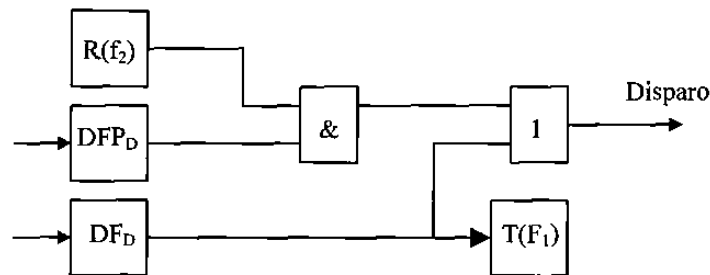


Figura 8.27 Diagrama esquemático protección piloto de subalcançe permisiva.

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

### 8.7.5 VENTAJAS.

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

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

### 8.7.6 DESVENTAJAS.

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

### 8.8 PILOTO POR COMPARACIÓN COMBINADA DE FASE Y DIRECCIONAL.

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

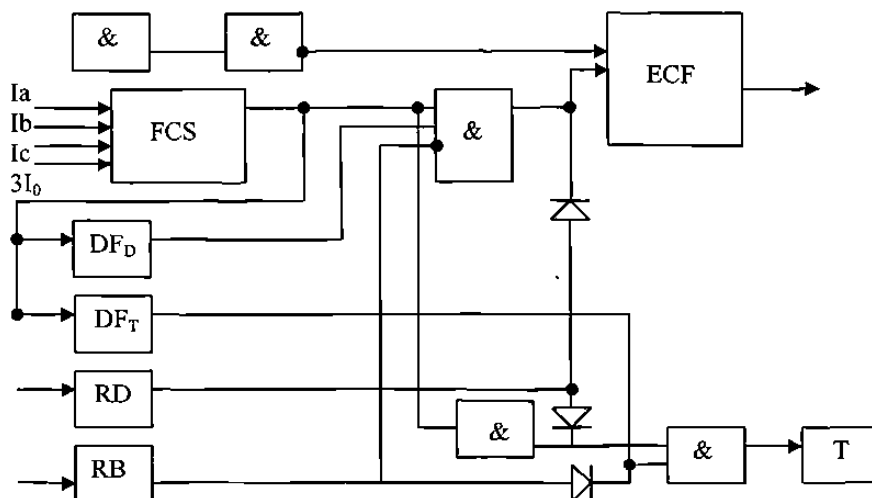


Figura 8.28 Protección piloto por comparación combinada de fase y direccional.

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

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

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

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

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

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

## 9

# CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### 9.1 CONCLUSIONES.

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

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

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

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

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

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

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

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

Por todo lo anterior expuesto podemos concluir que:

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

## **9.2 RECOMENDACIONES**

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

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



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

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

## BIBLIOGRAFIA

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

\* Literatura clásica.

# LISTADO DE TABLAS

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

# LISTADO DE FIGURAS

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

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

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

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

# GLOSARIO

TC	Transformador de Corriente.
TP	Transformador de Potencial.
C.D.	Corriente Directa.
C.A.	Corriente Alterna.
D.C.	Corriente Directa.
A.C.	Corriente Alterna.
SEP	Sistema Eléctrico de Potencia.
$\Omega$	Ohms.
Amps	Amperes.
$\beta$	Densidad Magnética.
$\alpha$	Proporcional a.
$\varphi$	Flujo Magnético (weber).
$\Phi$	Flujo Máximo (weber).
Z	Impedancia (ohms).
V	Voltaje (ohms).
Y	Admitancia (mhos).
$\Phi$	Angulo entre magnitudes de influencia
$\phi$	Angulo de la componente inductiva



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

# RESUMEN AUTOBIOGRAFICO

## ING. FRANCISCO JOEL OLVERA BLANCO

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

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

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

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

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

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

