

## TEMA VI - PROTECCIÓN DE BARRAS

Las barras son los nodos de interconexión de los diferentes elementos de un sistema eléctrico de potencia. Las fallas que pueden ocurrir en ellas con cortocircuitos entre fases o a tierra, o contactos con tierra en el caso de redes con neutro aislado o puesta a tierra resonante. Entre las causas más comunes de fallas en barras están: fallas de equipos, rotura de aisladores, contactos de animales o de objetos extraños, y contaminación.

Las fallas en barras son poco frecuentes, pero dan lugar a grandes afectaciones en el servicio eléctrico por la cantidad de circuitos que se desconectan, y comprometen seriamente la estabilidad del sistema (sobre todo en el caso de las barras de la red de transmisión).

En la protección de barras se confrontan los problemas más serios de saturación de los TI. Ello se debe a que para fallas externas el TI de la línea fallada recibe la corriente total de contribución de la barra a la falla, mientras que por los restantes TI circulan solamente las contribuciones individuales de las respectivas fuentes de generación. Estas corrientes dan lugar grandes diferencias en los niveles de saturación en los TI, y provocan valores relativamente altos de la corriente de error del esquema, si es de tipo diferencial. En resumen, el problema de la protección de barras consiste en lograr tiempos reducidos de eliminación de fallas, en condiciones de saturación probablemente severa de los TI.

En la protección de barras han tenido gran aplicación las protecciones diferenciales, aunque también se han utilizado protecciones con otros principios de operación. De los métodos presentados, los más aplicables a barra son los que utilizan relés de porcentaje diferencial y relés diferenciales de alta impedancia. Han encontrado aplicación también otros métodos, tales como, utilización de TI con núcleo de aire (acopladores lineales), operación de la protección antes que ocurra la saturación de los TI, utilización de la componente aperiódica de la corriente de desbalance para insensibilizar la protección diferencial.

### **1. Corriente diferencial de error en régimen de saturación severa de un TI**

En la fig. 1 se presenta el esquema más simple posible de protección diferencial para una barra de cuatro salidas de configuración sencilla. Se muestran también las corrientes que circulan para la falla externa F en una de las líneas, suponiendo que hay generación en todas las líneas no falladas.

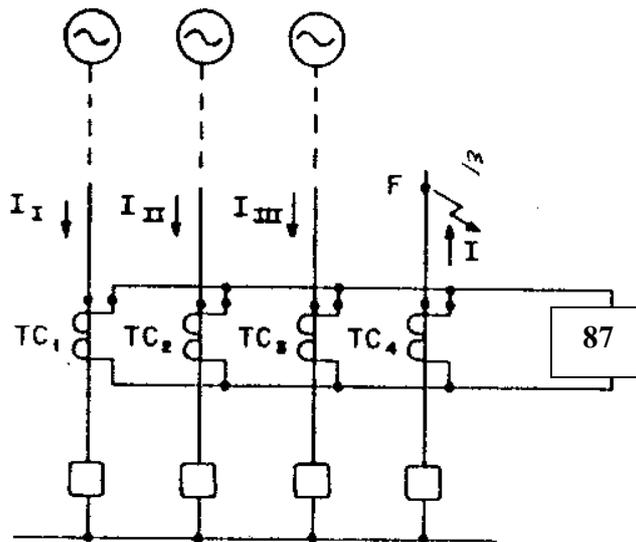


Fig. 1 Condición de falla externa en un esquema de protección diferencial de barras

En este caso el TI TC4 tiene mucho mayor tendencia a la saturación que los tres restantes. El valor máximo posible de la corriente diferencial de error ocurre cuando TC4 se satura completamente, y los otros TI no se saturan. En la fig. 2 se muestra un circuito equivalente correspondiente a esta situación. Los TI TC1, TC2 y TC3 se comportan como fuentes de corriente ideales; el TC4 se supone tan saturado, que su impedancia de magnetización es cero (se desprecia la impedancia de núcleo de aire del transformador). La resistencia  $R_s$  incluye la del arrollamiento secundario de TC4 y la de sus terminales.  $R_c$  es la resistencia de los conductores tenidos entre el TC4 y el punto de unión en paralelo de todos los TI en el patio de la subestación. Para fallas entre fases el valor de  $R_c$  es el de la resistencia de un solo conductor, mientras que para fallas a tierra  $R_c$  incluye las resistencia de los dos conductores (ida y retorno).  $R_d$  es la resistencia de la rama diferencial del esquema.

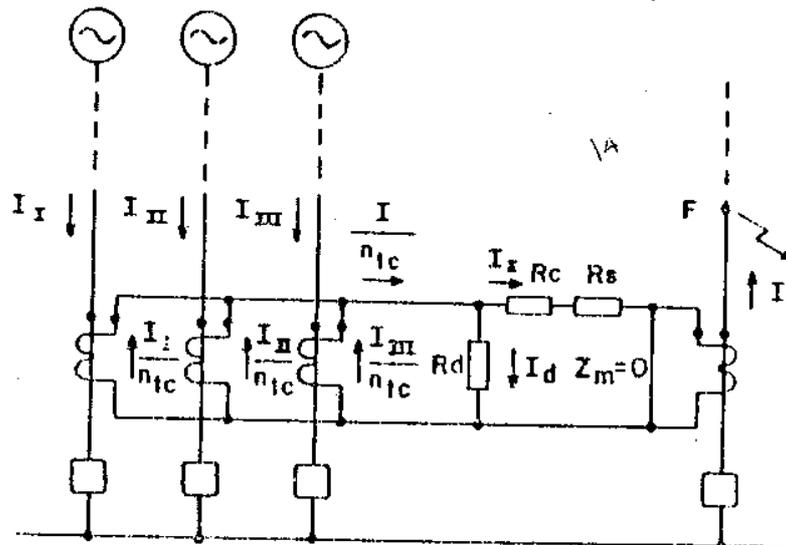


Fig. 2 Circuito equivalente de la fig. 1 con TC4 totalmente saturado

La corriente diferencial de error está dada por:

$$I_d = \frac{R_c + R_s}{R_c + R_s + R_d} \frac{I}{n_{tc}} \quad (1)$$

De la ec. 1 puede verse que  $I_d$  disminuye con el aumento de  $R_d$  y con la disminución de  $R_c + R_s$ . Esto constituye el fundamento del método de protección diferencial de alta impedancia (ver más adelante). Por otra parte, para mantener  $R_c$  en valores pequeños es conveniente hacer la conexión en paralelo de lo TI en un punto del patio que sea aprox. equidistante a todos ellos. De no aplicarse este criterio, el TI más alejado ( el de mayor  $R_c$  ) dará mayores valores de  $I_d$  al saturarse. Otra recomendación es utilizar conductores del mayor calibre posible dentro de los límites económicos. Esto, además, aumenta la confiabilidad del esquema diferencial, pues reduce la probabilidad de que se abra el circuito de un TI pro rotura de un conductor. En realidad la corriente  $I_d$  tiene un valor menor que el calculado por la ec. 1, pues el TI de la línea fallada no se satura completamente, y los restantes experimentan una cierta saturación. Esto es cierto sobre todo cuando se mantiene baja la carga de los TI, y sus relaciones de transformación se seleccionan de modo que la corriente de falla externa máxima no sobre pase un valor del orden de 20 veces la  $I_n$  del TI. Sin embargo, la ec. 1 puede servir como base para el cálculo de  $I_d$  y el resultado tiene un cierto factor de seguridad.

## 2. Protección con relés diferenciales de porcentaje

En la fig. 3a se muestra el esquema de la protección de una barra sencilla de cuatro salidas utilizando un relé de porcentaje diferencial. Se ha supuesto que existen fuentes de generación en todas las líneas, por lo que se requiere un relé con cuatro elementos de retención. La fig. 3c muestra un esquema trifásico de conexiones. Los TI de las líneas que no tienen fuentes de generación o que tienen fuentes de capacidades muy pequeñas pueden unirse en paralelo por secundario, y conectarse a un solo elemento de retención (ver fig. 3b). La cantidad de TI que puede conectarse en paralelo depende de la  $I_n$  del elemento de retención del relé, que puede ser del orden de 15 A. Un inconveniente de este esquema es que se requiere llevar a la sala de control de la subestación (donde está el relé) los conductores de conexión de todos los TI. Los relés de porcentaje diferencial para protección de barras tienen por lo general seis elementos de retención. Si la barra tiene más circuitos es necesario utilizar más de un relé por fase. Se trata de relés con características d pendiente variables, para lograr una mayor inmunidad a la corriente diferencial de error.

Cuando se toman medidas para mantener baja la carga de los TI y se seleccionan adecuadamente sus relaciones de transformación ( para que la corriente de falla no pase de 20 veces la  $I_n$ ), los relés de porcentaje diferencial dan buenos resultados, e incluso no se hace por lo general el cálculo de su pendiente. Ello, por supuesto, no es recomendable cuando es de esperar un nivel alto de saturación en los TI. En ese caso pudiera utilizarse el método de cálculo asociado con el circuito equivalente de la fig. 2, teniendo presente que el resultado es muy conservador. El circuito hay en ese caso que modificarlo insertando los elementos de retención del relé en serie con los TI. El tiempo de operación de los relés

electromecánicos de porcentaje diferencial de protección de barras (que son por general de inducción electromagnética, con dos discos acoplados a un mismo eje) es del orden de 50 a 100 ms, lo que resulta excesivo para las barras de la red de transmisión. Sin embargo, en relés estáticos se logran tiempos más reducidos e incluso hay uno que opera antes de que se manifieste por secundario la saturación de los TI.

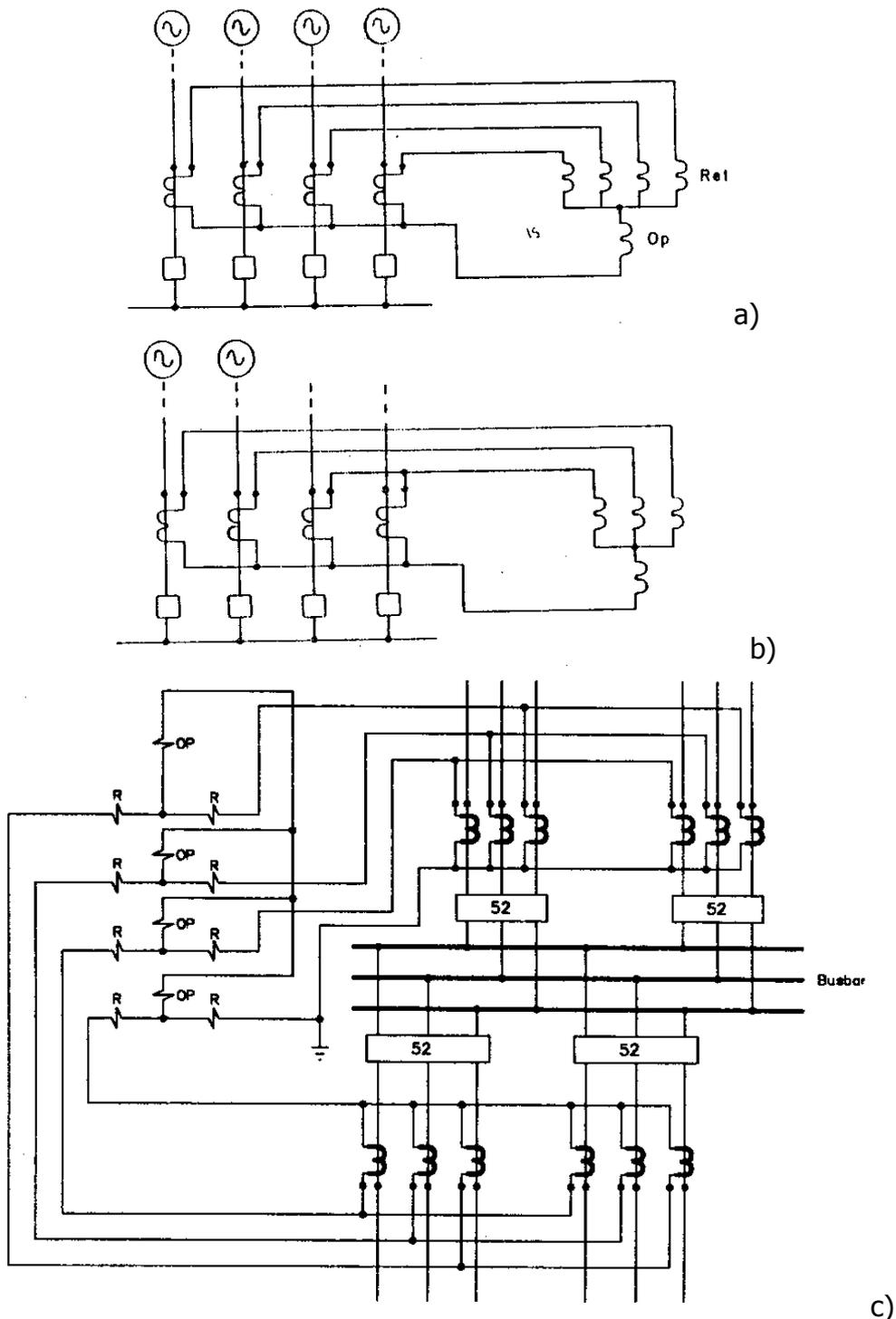


Fig. 3 Protección de porcentaje diferencial de una barra

### 3. Protección con relés diferenciales de alta impedancia

Esta protección se basa en el hecho de que la corriente diferencial de error es pequeña cuando el valor de  $R_d$  es elevado, como puede verse en la ec. 1. Para lograr un valor alto de  $R_d$  se coloca un relé de sobretensión en la rama diferencial. En la fig. 4 se muestra el diagrama esquemático de la protección; el relé de sobretensión ( $U>$ ) está conectado en la rama diferencial, en serie con un filtro LC sintonizado a la frecuencia fundamental. Con esto se reduce la tendencia a la operación del relé por efecto de la componente aperiódica y los armónicos que pueden estar presentes cuando hay saturación severa de un TI. Cuando ocurre una falla externa y un TI se satura, es válido el circuito equivalente de la fig. 2, y la corriente  $I_d$  es pequeña, debido al valor alto de  $R_d$ . Para fallas internas, en que hay poca diferencia entre los niveles de corriente de los TI, todos entregan corriente por secundario, que al pasar por  $R_d$  provocan valores peligrosamente elevados de tensión. Para proteger el esquema y al personal se coloca un limitador de tensión LV en paralelo con la rama diferencial. Este limitador es por lo general un varistor. En serie con LV se coloca un relé de sobrecorriente instantáneo ( $I>$ ) para acelerar la operación del esquema para fallas internas de altos valores de corriente; esto, además, implica cierta redundancia en el relé, y eleva su confiabilidad.

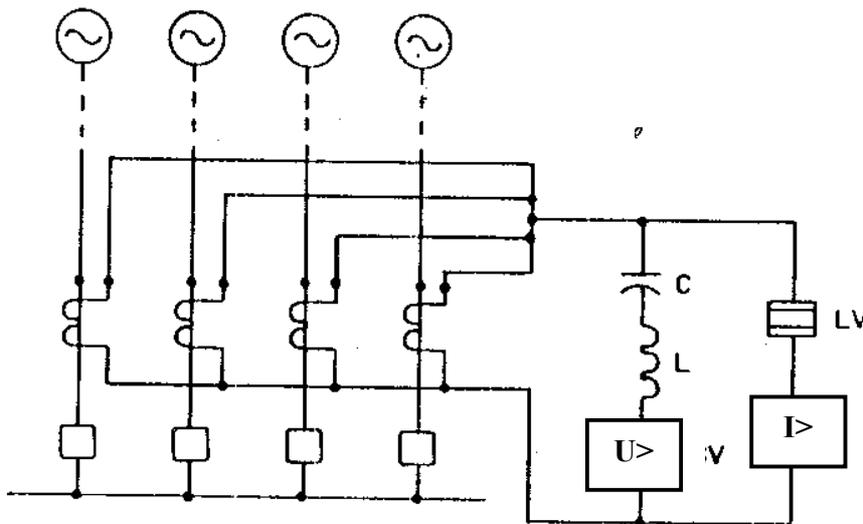


Fig. 4 Protección diferencial de alta impedancia

El cálculo de la tensión mínima de arranque  $V_a$  del relé de sobretensión puede hacerse considerando  $R_d \gg R_c + R_s$  es decir:

$$V_a \geq k * (R_c + R_s) \frac{I}{n_{tc}} \quad (2)$$

donde  $k$  es una constante de valor menor que la unidad, que tiene en cuenta el hecho de que el TI de la línea fallada no se satura completamente, y que los demás TI experimentan cierta saturación. Los fabricantes por lo general suministran información para determinar el valor de  $k$  para cada esquema concreto a partir de los datos de los TI. Para la determinación de la corriente de arranque del relé de sobrecorriente instantáneo es necesario utilizar también la

información del fabricante referente a la característica  $V=f(I)$  del limitador de tensión que es un elemento no lineal.

El esquema de protección diferencial de alta impedancia requiere que el valor de  $R_c + R_s$  sea pequeño. Ello hace recomendable utilizar TI de resistencia de secundario baja, y hacer la conexión en paralelo de todos los TI en un punto equidistante de todos ellos. Los TI deben tener iguales relaciones de transformación para evitar la necesidad de utilizar TI auxiliares. Este esquema tiene tiempos de operación de 8 a 16 ms cuando tiene relé de sobrecorriente instantáneo, y de 20 a 30 ms cuando no lo tiene. Esto, unido a su simplicidad y confiabilidad, hacen que tenga amplia aplicación en distintos países.

#### 4. Protección combinada de transformadores y barras

Cuando por razones económicas una barra y un transformador se conectan directamente sin interruptor, es conveniente considerar la posibilidad de protegerlos en forma conjunta con un solo relé diferencial. En realidad la protección más sensible se logra disponiendo un relé independiente para cada elemento, pero es más cara, y de todas formas ambas protecciones deben provocar la salida de servicio conjunto de la barra y el transformador.

El caso más común es el de un transformador que alimenta varios circuitos radiales (ver fig. 5.34); puede omitirse el interruptor entre el transformador y la barra, pues una falla en cualquiera de ellos interrumpe el servicio eléctrico a todos los circuitos. La protección se brinda con un relé diferencial de transformador (RDT) que tiene solamente dos elementos de retención, pues pueden conectarse en paralelo los TI de todos los circuitos radiales.

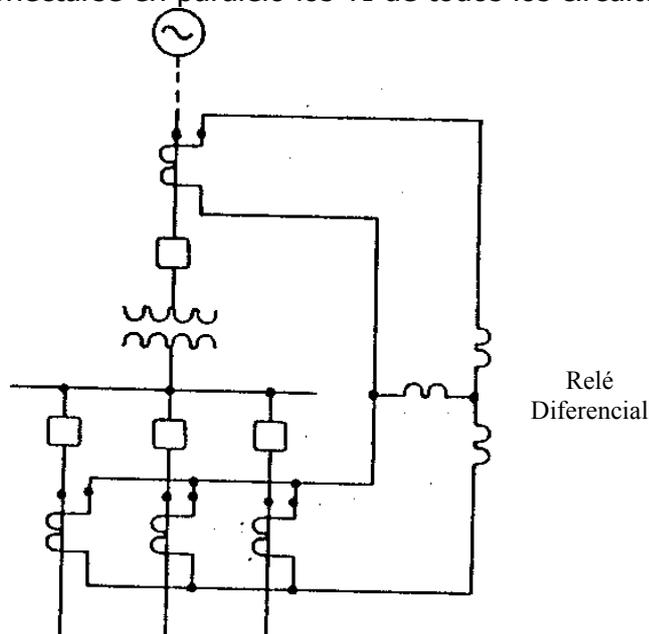


Fig. 5 Protección combinada de un transformador y una barra con varios circuitos radiales

En la fig. 6 se representa el caso de una transformador alimentado por dos líneas paralelas, en que también es posible omitir el interruptor entre la barra y el transformador. En este caso no es conveniente conectar en paralelo los TI de las dos líneas, pues se pierden posibilidades

de retención. Es recomendable utilizar un relé diferencial de transformador (RDT) con tres elementos de retención, como se muestra en la fig. 6.

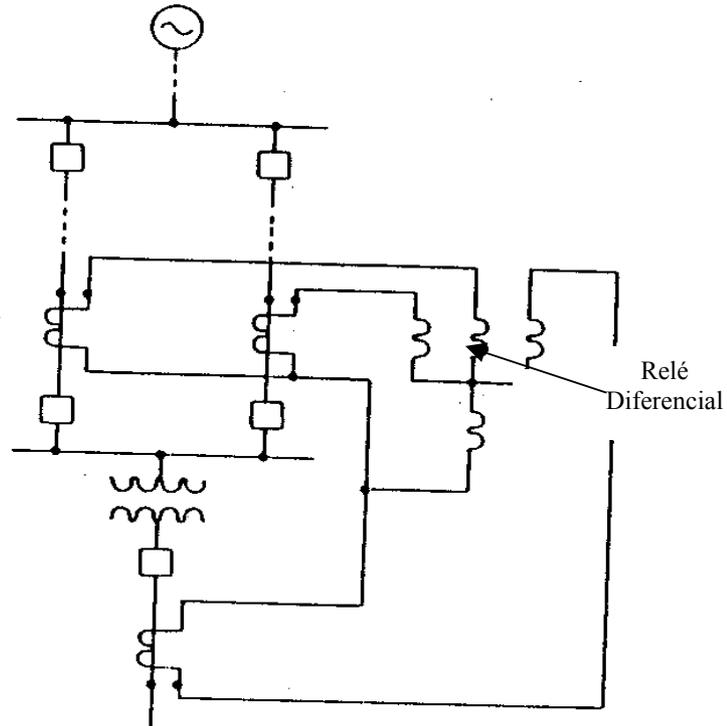


Fig. 6 Protección combinada de una barra y un transformador alimentado desde dos líneas paralelas

Cuando el transformador está instalado en una subestación de enlace del sistema (ver fig. 7) es también posible omitir el interruptor. El esquema de protección de la fig. 6 puede aplicarse en este caso, pero su sensibilidad es por lo general insuficiente para una protección adecuada del transformador. Ello se debe a que las relaciones de transformación de los TI de las líneas están determinadas por las transferencias de potencia, y son mayores que las correspondientes a la  $I_n$  del transformador. En este caso es recomendable proteger en forma independiente el transformador y la barra, con los relés diferenciales de transformador (Dif) y de tensión ( $U>$ ) respectivamente (ver fig. 7).

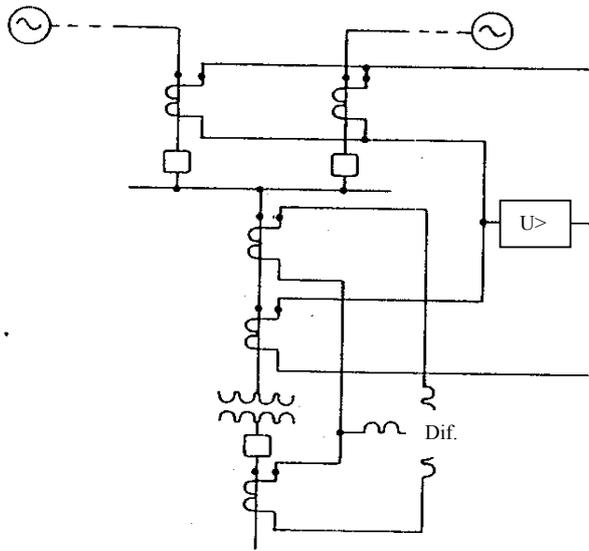


Fig. 7 Protección combinada de una barra y un transformador en una subestación de enlace

## 5. Influencia de los esquemas de barras sobre su protección diferencial

Hasta aquí se han estudiado los distintos métodos de protección de barras tomando como base el esquema de barra simple. Sin embargo, existen diversos esquemas de barras, que se diferencian por su confiabilidad, flexibilidad de operación y costo, y que encuentran aplicación en barras de distintos niveles de tensión y de importancia para el sistema. A continuación se describen brevemente los esquemas fundamentales de barras, destacando las particularidades de su protección diferencial. Estos esquemas se representan gráficamente por diagramas simplificados (para el caso de una barra de cuatro salidas), en que se omiten todos los desconectores serie que en estado normal están cerrados, y todos los desconectores paralelos normalmente abiertos.

### 5.1 Barra simple

El esquema de barra simple, mostrado en la fig. 8, es el más sencillo y económico, pero el menos flexible y fiable, y se utiliza fundamentalmente en los niveles de subtransmisión y distribución. La zona de la protección diferencial, mostrada en línea de puntos en la fig. 8 cubre totalmente la barra. La señal de tensión para las protecciones de las líneas (si se requiere) puede obtenerse con solo un conjunto de transformadores de tensión (TP) conectados a la barra.

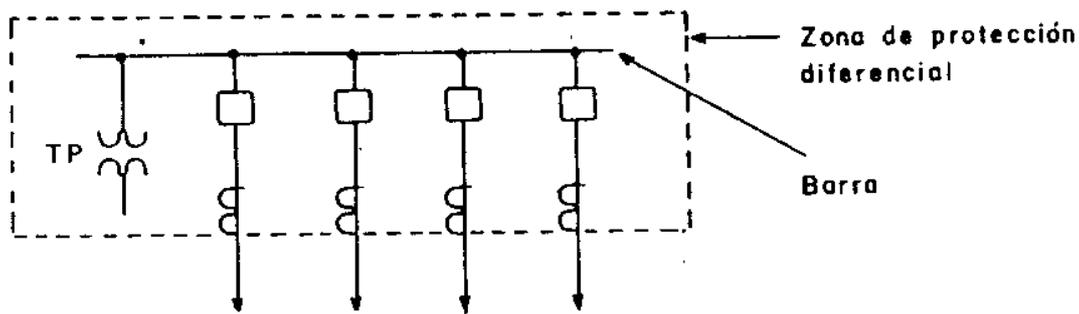


Fig. 8 Esquema de barra simple

## 5.2 Barra simple con interruptor de enlace

Este esquema constituye una extensión del anterior para el caso en que hay un número elevado de circuitos conectados a la barra (ver fig. 9). Tiene mayor flexibilidad, sobre todo en el caso en que la subestación se alimenta de dos fuentes de suministro independientes; el interruptor de enlace puede operarse abierto o cerrado, pero cuando se pierde una de las fuentes, todos los circuitos pueden alimentarse desde la otra con el interruptor de enlace cerrado. La protección se brinda con dos relés diferenciales, cuyas zonas de protección se traslapan alrededor del interruptor de enlace, como se muestra en la fig. 9; una falla en una de las secciones de barra afecta solamente el servicio de los circuitos conectados a ella, y los restantes circuitos no son interrumpidos. Las señales de tensión para las protecciones de las líneas se obtienen de transformadores de potencial conectados a ambas secciones de la barra.

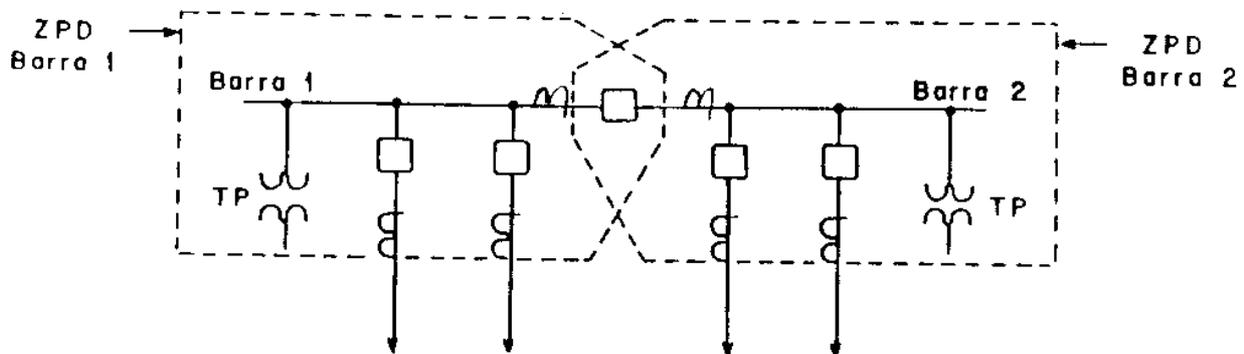


Fig. 9 Esquema de barra simple con interruptor de enlace

## 5.3 Barra simple con barra de transferencia

La adición de una barra de transferencia a un esquema de barra simple incrementa su flexibilidad de operación (ver fig. 10). Este esquema opera con el interruptor de transferencia normalmente abierto, y la protección diferencial es una sola, con la zona de protección mostrada en la fig. 10.

Cuando se desea sacar de servicio un interruptor para reparación o mantenimiento, su línea se conecta a la barra de transferencia cerrando un desconector normalmente abierto ( y se desconecta del interruptor abriendo un desconector normalmente cerrado no mostrado en la

fig. 10), y se cierra el interruptor de transferencia. De esta forma, a la barra de transferencia se conecta un solo circuito en cada ocasión. La protección asociada con el interruptor de transferencia debe ser capaz de proteger cualquiera de las líneas de salida de la barra. Para cada línea la protección requiere determinados parámetros de ajuste, en general diferentes a los de las demás líneas. No es práctico hacer cambios de parámetros de ajuste de la protección cada vez que se conecta una línea diferente a la barra de transferencia, por lo que es necesario determinar parámetros de ajuste aplicables a todas las líneas, aunque se sacrifique en alguna medida la calidad de la protección durante el tiempo en que esté en servicio la barra de transferencia. Si las protecciones de las líneas requieren señales de tensión, pueden obtenerse de transformadores de tensión conectados a la barra principal.

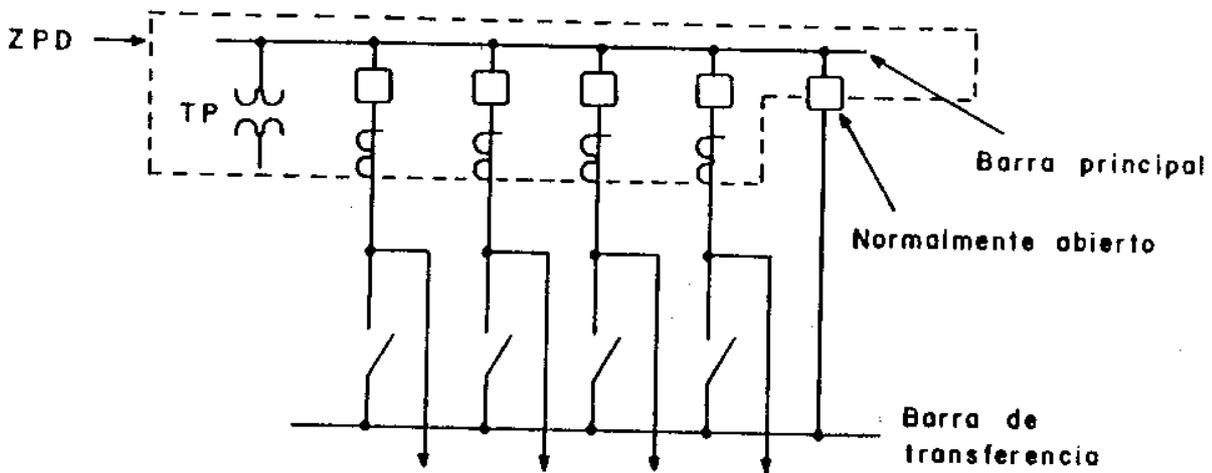


Fig. 10 Esquema de barra simple con barra de transferencia

#### 5.4 Barra doble con interruptor de enlace

Este esquema, que se muestra en la fig. 11, proporciona una gran flexibilidad de operación. Las barras pueden operarse unidas o interdependiente, cualquier línea puede alimentarse desde cualquier barra, y una de las barras puede utilizarse como barra de transferencia en caso de salida de servicio de algún interruptor de la línea.

El inconveniente del esquema es que su flexibilidad implica la necesidad de hacer conmutaciones en los esquemas de protección de barras y líneas, los que los hace complejos y afecta su confiabilidad. Para la protección de las barras se requieren dos esquemas diferenciales; en la fig. 11 se representan sus respectivas zonas de protección para el caso en que a cada barra están conectados dos líneas de salida. Si una de las barras se va a utilizar como barra de transferencia, es necesario desconectar su protección diferencial.

Las protecciones de líneas pueden recibir las señales de tensión desde transformadores de tensión conectados a las barras, pero ello genera la necesidad de conmutarlas de unos a otros transformadores al cambiar la línea de una barra a otra. Es más recomendable colocar transformadores de tensión en las líneas, pero se requiere entonces un número mayor de transformadores.

Al igual que en el esquema de barra simple con barra de transferencia, la protección asociada con el interruptor de enlace debe ser capaz de proteger cualquiera de las líneas.

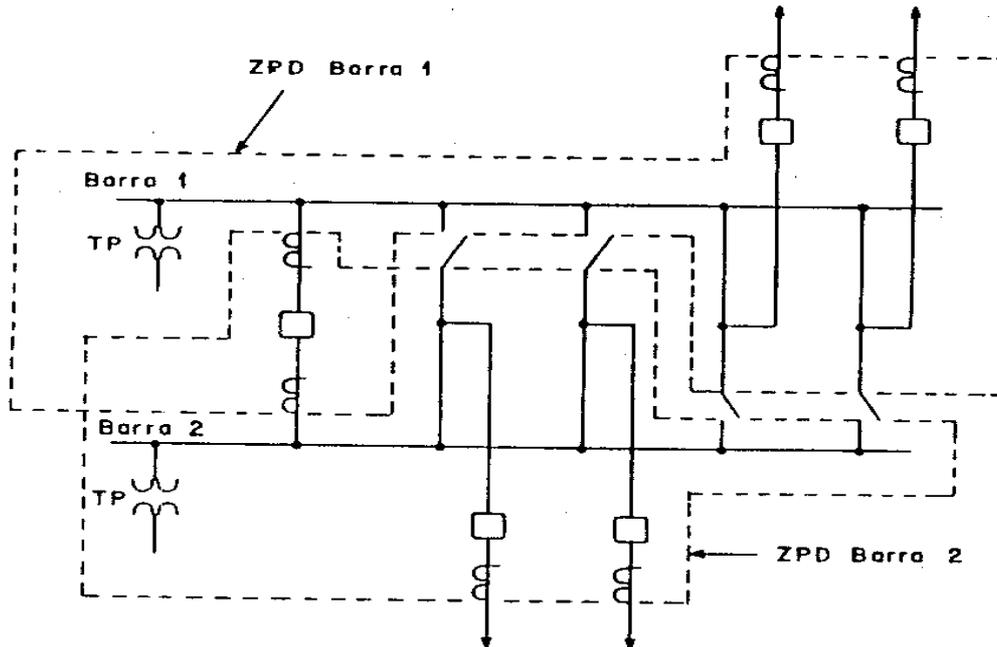


Fig. 11 esquema de barra doble con interruptor de enlace

## 5.5 Barra doble con esquema de interruptor doble

Este es un esquema de muy alta flexibilidad de operación (ver fig. 12), y de costo elevado. Cada línea está conectada mediante interruptores a ambas barras, y todos los interruptores se operan cerrados. En caso de falla en cualquiera de las líneas se abre sus dos interruptores y se mantiene el servicio en el resto del esquema. Cada barra tiene su propia protección diferencial, como se muestra en la fig. 12. Las señales de corriente para las protecciones de las líneas se obtienen de la conexión en paralelo de los TI correspondientes a cada línea, como se muestra en la fig. 12. De esta forma, las protecciones de las líneas incluyen las áreas de las barras que quedan fuera de las zonas de protección diferencial. Es necesario disponer de transformadores de tensión en cada línea para la obtención de las señales de tensión de su protección.

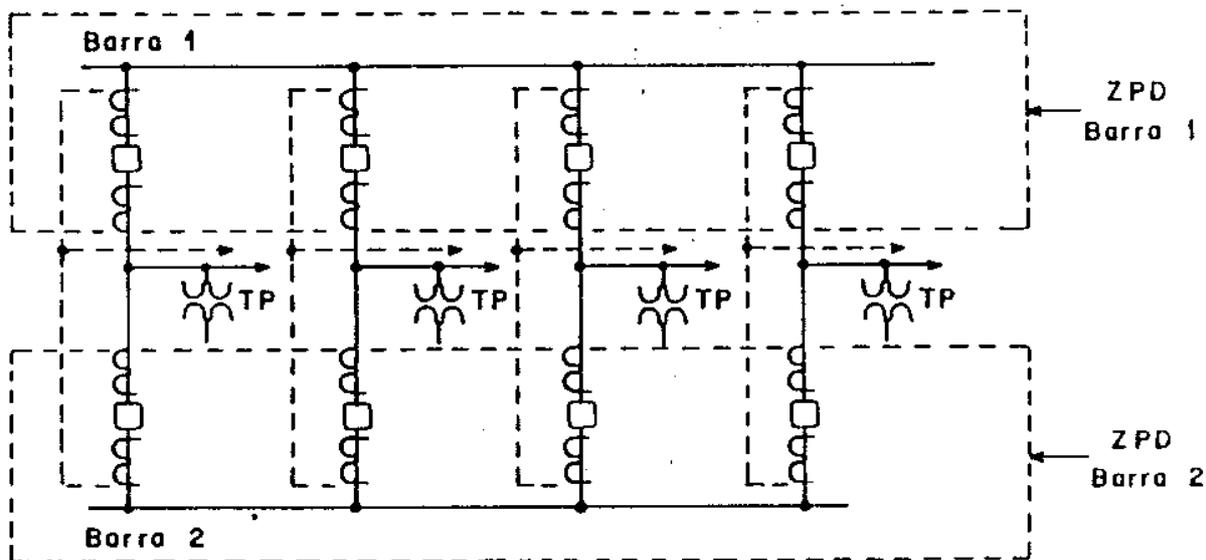


Fig. 12 Esquema de barra doble con interruptor doble

## 5.6 Barra en anillo

En la fig. 13 se representa este esquema, que proporciona una flexibilidad elevada con un mínimo de interruptores. Para falla en una de las líneas o en la sección de barra asociada con ella se abren los dos interruptores adyacentes, y se mantiene el servicio en el resto del esquema. De esta forma, cada sección de barra se protege como parte de su línea, y no se requiere protección diferencial. Las señales de corriente para las protecciones de líneas ( y secciones de barra) se obtienen de la conexión en paralelo de los TI correspondientes, como se muestra en la fig. 13 para la obtención de las señales de tensión se requieren transformadores de tensión en todas las líneas.

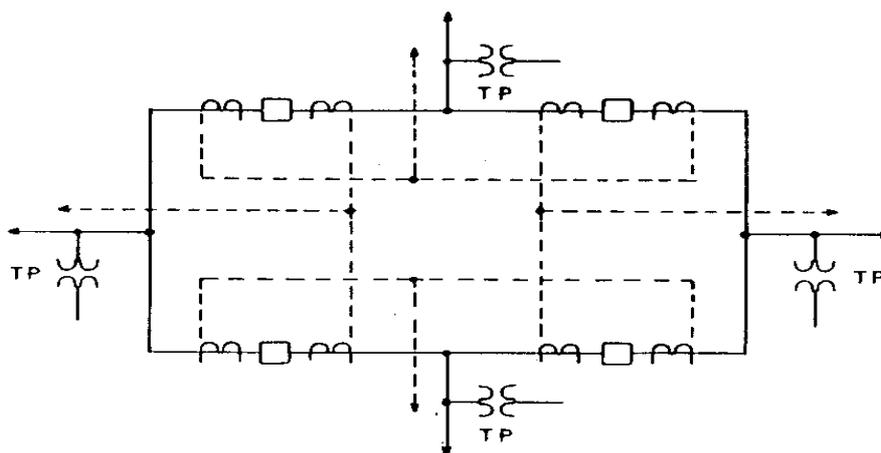


Fig. 13 Esquema de barras en anillo

## 5.7 Barra doble con esquema de interruptor y medio

En este esquema (ver fig. 14), cada línea está conectada mediante interruptores (que se operan normalmente cerrados) a ambas barras, pero el interruptor central es compartido por dos líneas (de allí la denominación de interruptor y medio). En caso de falla en una de las barras se mantiene el servicio en las líneas, y para falla en una de las líneas se abren sus dos interruptores y se mantiene el servicio en el resto del esquema. Por su flexibilidad y por el número de interruptores requeridos, este esquema está entre el de barra en anillo y el de barra doble con esquema de interruptor doble.

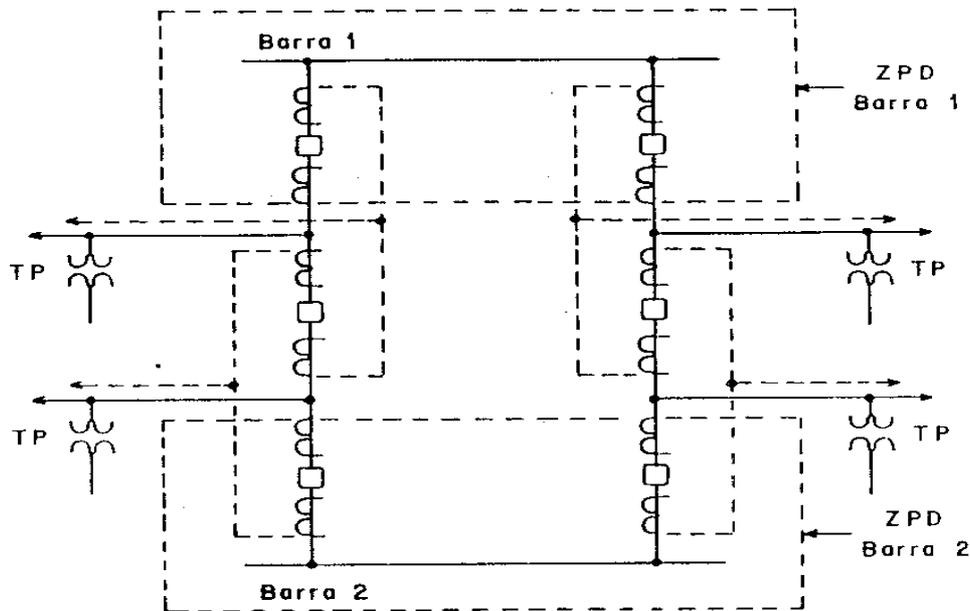


Fig. 14 Esquema de barra doble con interruptor y medio

Se requieren protecciones diferenciales independientes para ambas barras, como se muestra en la fig. 14. Las señales de corriente para las protecciones de las líneas se obtienen de TI conectados en paralelo; estas protecciones incluyen las secciones de las barras que quedan fuera de las zonas de protección diferencial. Para las señales de tensión de las protecciones de líneas se requieren transformadores de tensión en cada línea.