



INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL

ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA

Departamento de Ingeniería Eléctrica

Academia de Utilización

ESIME

Apuntes de clase

Protecciones de Sistemas Eléctricos I

PROFESOR: CAMACHO RODRÍGUEZ ISRAEL.

PROTECCIÓN DE SISTEMAS ELÉCTRICOS I

CONTENIDO TEMÁTICO

1.- ELEMENTOS BASICOS DE LOS SISTEMAS DE PROTECCION

2.- TRANSFORMADORES DE INSTRUMENTO

3.- INTRODUCCION A LOS RELEVADORES

4.- PROTECCIONES PRINCIPALES

5.- ESTUDIO PRELIMINARES Y COORDINACION

INTRODUCCION

No es descabellado pensar en un mundo "Todo Eléctrico" pero esto no es posible imaginarlo sin seguridad en el uso de la electricidad.

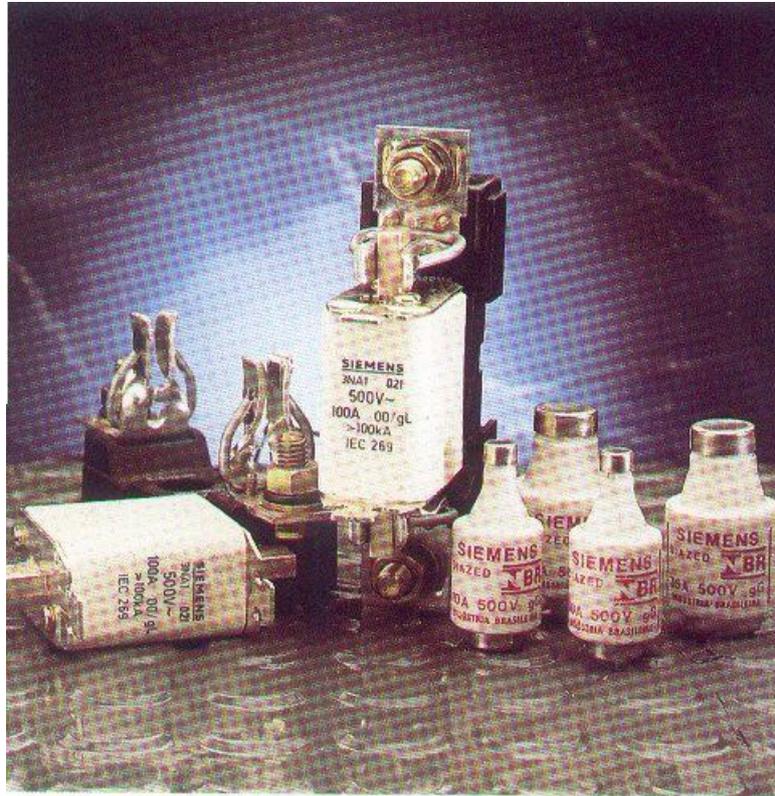
Quien alguna vez no ha recibido un "aviso", y si el toque fue leve todo pasó, y se olvidó. Sin embargo debemos pensar en ello seriamente.

Cada año en nuestro país mueren aproximadamente 300 personas por electrocución (sin incluir los incendios originados por las diversas fallas de las instalaciones eléctricas), algunas de estas causas tan solo por corrientes bastante pequeñas.

La determinación de los límites técnicos de utilización de materiales conductores y aislantes en instalaciones y en los artefactos, sin producir sobrecalentamiento y cortocircuitos, han permitido que se construyan elementos que cumplan con las protecciones necesarias en la actualidad.

1.- ELEMENTOS BASICOS DE LOS SISTEMAS DE PROTECCION

1.1 FUSIBLES



Los cortacircuitos fusibles son el medio más antiguo de protección de los circuitos eléctricos y se basan en la fusión por efecto de Joule de un hilo o lámina intercalada en la línea como punto débil

Se denomina **fusible** a un dispositivo, constituido por un soporte adecuado, un filamento o lámina de un metal o aleación de bajo punto de fusión que se intercala en un punto determinado de una instalación eléctrica para que se funda, por *Efecto Joule*, cuando la intensidad de corriente supere, por un cortocircuito o un exceso de carga, un determinado valor que pudiera hacer peligrar la integridad de los conductores de la instalación con el consiguiente riesgo de incendio o destrucción de otros elementos.

El principio de funcionamiento del fusible es muy simple: se basa en intercalar un elemento más débil en el circuito, de manera tal que cuando la corriente alcance niveles que podrían dañar a los componentes del mismo, el fusible se funda e interrumpa la circulación de la corriente.

Los fusibles sirven para proteger las líneas eléctricas contra:

- ❖ **Sobrecargas:** Intensidades superiores a las nominales para las que se diseñan las líneas y que de mantenerse un período de tiempo más o menos largo acaban con ellas por sobrecalentamiento.
- ❖ **Cortocircuitos:** Intensidades muy altas, casi instantáneas, que deterioran rápidamente las líneas. Un cortocircuito se manifiesta por un aumento excesivo de corriente, que alcanza en pocos milisegundos un valor igual a centenas de veces la corriente de empleo

Los fusibles o cortocircuitos no son más que una sección de hilo más fino que los conductores normales, colocado en la entrada del circuito a proteger, para que al aumentar la corriente, debido a sobrecargas o cortocircuitos, sea la parte que más se calienta y, por tanto, la primera en fundirse. Una vez interrumpida la corriente, el resto del circuito ya no sufre daño alguno.

Actualmente la parte o elemento fusible suele ser un fino hilo de cobre o aleación de plata, o bien una lámina del mismo metal para fusibles de gran intensidad, colocados dentro de unos cartuchos cerámicos llenos de arena de cuarzo, con lo cual se evita la dispersión del material fundido; por tal motivo también se denominan cartuchos fusibles.

Sirven para proteger la instalación y los receptores interrumpiendo la alimentación cuando se produce un cortocircuito o una sobrecarga, según el tipo de fusible.

Pueden usarse, por ejemplo para proteger contra cortocircuitos en el circuito de alimentación de un motor o equipo de medida.

Están formados por un conductor diseñado y calculado para que cuando circule por él una corriente de valor superior a la intensidad nominal del mismo calibre (IN), se funda, interrumpiéndose el circuito.

El conductor está rodeado de arena de sílice o aire y recubierto por una cápsula de cerámica, plástico o cristal. El sílice se emplea para que pueda extinguirse rápidamente el arco eléctrico provocado por la interrupción del circuito. La tensión de funcionamiento y el calibre determina su tamaño.

Presentan el inconveniente de que para restablecer el funcionamiento del circuito hay que reponerlos por otros nuevos.

El tiempo de fusión es una característica fundamental. Esto da lugar a los distintos tipos de fusibles y curvas de funcionamiento de los mismos. La norma contempla dos clases de fusibles para usos industriales, que son los siguientes:

- 📖 •Clase gG o gI (fusible de empleo general y de líneas). Uso general: protegen circuitos contra todo tipo de sobrecargas, incluyendo cortocircuitos. Su curva de fusión "intensidad-tiempo" para una respuesta lenta en las sobrecargas, y rápida frente a los cortocircuitos.
- 📖 Clase aM (fusible de acompañamiento de Motor). Acompañamiento de motores: especialmente concebidos para arranque de motores ya que resisten las sobreintensidades que tienen lugar en el arranque. Sólo sirven como protección contra cortocircuitos. La fusión de éstos es más lenta que los del tipo gI, para pequeñas intensidades. Si se necesita una protección contra sobrecargas, hay que colocar relés térmicos.

Existen otras clases de fusibles, que son:

- ✍ Clase gF. Fusión rápida: protección contra cortocircuitos.
- ✍ Clase gT. Fusión lenta: protección contra sobrecargas.
- ✍ Ultrarrápidos: para protección de semiconductores.

Los fusibles de tipo aM, especialmente diseñados para la protección de motores, tienen una respuesta extremadamente lenta frente a las sobrecargas, y rápida frente a los cortocircuitos. Las

Escuela Superior de Ingeniería Mecánica Y Eléctrica -- Ingeniería Eléctrica --- Protecciones uno intensidades de hasta diez veces la nominal ($10 I_N$) deben ser desconectadas por los aparatos de protección propios del motor, mientras que las intensidades superiores deberán ser interrumpidas por los fusibles aM.

La intensidad nominal de un fusible, así como su poder de corte, son las dos características que definen a un fusible. La intensidad nominal es la intensidad normal de funcionamiento para la cual el fusible ha sido proyectado, y el poder de corte es la intensidad máxima de cortocircuito capaz de poder ser interrumpida por el fusible. Para una misma intensidad nominal, el tamaño de un fusible depende del poder de corte para el que ha sido diseñado, normalmente comprendido entre 50 y 100 kA.

Un dato importante es la intensidad mínima de fusión, que para los fusibles tipo gG y gL viene dada por:

$n (I_{FUSIÓN} = n \text{ veces la } I_N)$	2,1	1,9	1,6
I_N	< 4A	Entre 4A y 16A	>16A

Para fusibles tipo aM, este valor se incrementa a $n=5$. Es decir, una sobrecarga de 3 o 4 veces la intensidad nominal no es eliminada por este tipo de fusibles.



CURVA DE OPERACIÓN EN FUSIBLES

El material de que están formados es siempre un metal o aleación de bajo punto de fusión a base de plomo, estaño, zinc, etc.

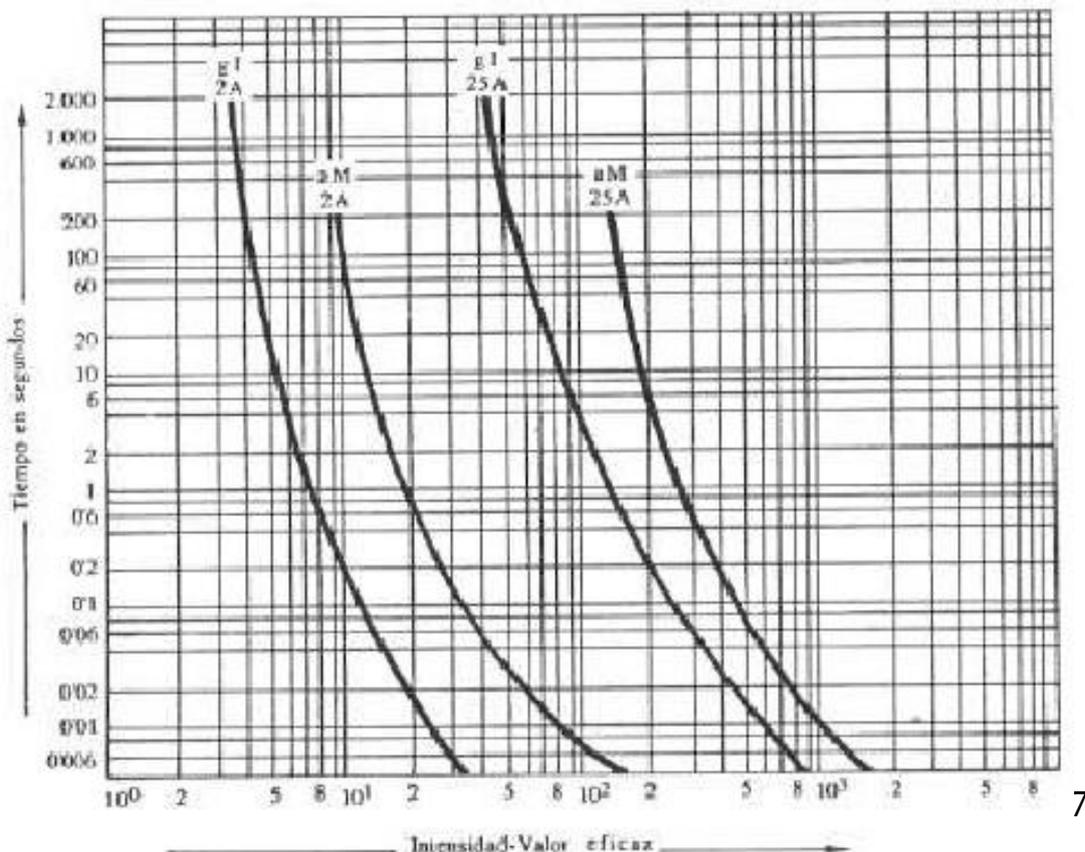
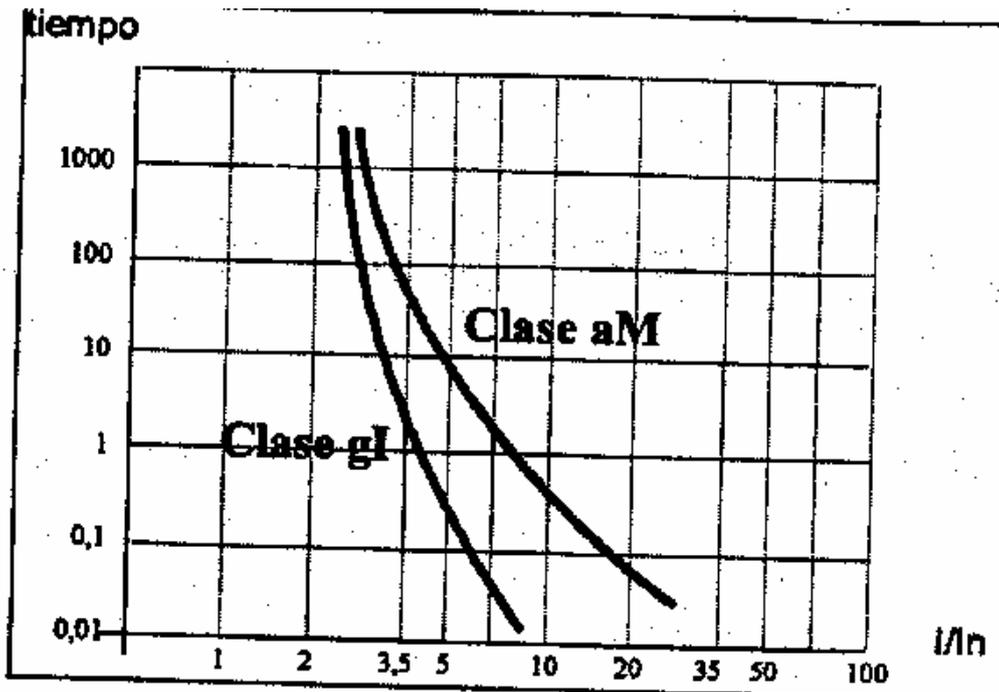
Un gran inconveniente de los fusibles es la imprecisión que tiene su curva característica de fusión frente a otros dispositivos que cumplen el mismo fin, tales como los interruptores automáticos. Esto equivale a decir que la banda de dispersión de los fusibles es mayor que la de los interruptores automáticos, pese a que el fabricante solamente facilita la curva media de los fusibles.

Otro inconveniente de los fusibles es la facilidad que tienen de poder ser usados con una misma disposición de base, hilos o láminas no adecuadas. Así mismo, la independencia de actuación de los fusibles en una línea trifásica supone un serio problema, ya que con la fusión de uno de ellos se deja a la línea a dos fases, con los inconvenientes pertinentes que ello conlleva.

Escuela Superior de Ingeniería Mecánica Y Eléctrica -- Ingeniería Eléctrica --- Protecciones uno
 La selectividad entre fusibles es importante tenerla en cuenta, ya que de ello dependerá el buen funcionamiento de los circuitos. Idéntico problema se nos presentara con la selectividad de los interruptores automáticos.

Para desconectar la zona afectada, es necesario que los fusibles reaccionen de forma selectiva, es decir, debe desconectar primero el fusible más próximo al lugar de defecto. Si por alguna causa este fusible no responde correctamente, debe actuar el siguiente, y así sucesivamente.

La selectividad entre dos fusibles se determina gráficamente mediante la comparación de ambas características de disparo; para ello, las curvas, a la misma escala, no deben cortarse ni ser tangentes.



Características Tiempo-Corriente:

Las curvas tiempo-corriente entregadas por los fabricantes muestran los tiempos de operación de los fusibles para diferentes valores de corrientes. El valor de tiempo indicado en las curvas puede corresponder al tiempo mínimo de fusión del fusible, o bien tiempo promedio de fusión, o tiempo total de apagado de la corriente. En caso de no indicarse específicamente a que valor corresponde, se asume un valor promedio de tiempo de fusión.

Este valor promedio asume una tolerancia de 10% en la corriente para un tiempo de operación definido. Por lo tanto, el tiempo mínimo de fusión se considera inferior en un 10 % en corriente al valor promedio. Para tiempos superiores a 0.1 segundo, el tiempo máximo de fusión se considera igual al tiempo total de despeje de la falla.

Para tiempos entre 0.1 y 0.01 segundos, el tiempo de despeje se considera mayor al tiempo de fusión debido al tiempo de apagado del arco, que en este caso adquiere importancia.

Tanto los fusibles como las pastillas tienen capacidades medidas en Amperes por ejemplo las pastillas más comunes van de los 15 a los 50 Amperes para uso domestico y de 60 a 100 Amperes para uso residencial, comercial e industrial.

Fusibles de baja tensión (600 V o menos) y fusibles de alta tensión mas de 600 V. Tipos de fusibles. El tipo de cartucho o contacto de casquillo es útil para las tensiones nominales entre 250 y 600 V en los de tipo fijo y recambiable. El tipo fijo contiene polvo aislante (talco o un adecuado aislante orgánico) redondeando el elemento fusible. En caso de cortocircuito, el polvo tiene como misión:

Los fusibles de cartucho comunes poseen cierta capacidad de limitación de la corriente ya que interrumpen el circuito casi instantáneamente antes de que el cortocircuito tenga la oportunidad de existir y fundir o unir los contactos de los disyuntores o relés de máxima. El fusible de potencia limitador de la corriente contiene elementos fusibles de aleación de plata rodeados por cuarzo en polvo.

Generalmente, los fusibles de cartucho cilíndrico se emplean para pequeñas intensidades (hasta unos 10 o 15 A), para intensidades de valores intermedios (desde unos 15 A hasta intensidades del orden de 90 A) y los fusibles de cuchilla suelen fabricarse para intensidades muy elevadas (del orden de los 150 A o más).

Cómo calcular el tamaño de un fusible

Para la elección del fusible, deben considerarse los datos siguientes:

-  El calibre (intensidad nominal del fusible, I_n) debe ser igual (o mayor) que la intensidad nominal de la máquina o circuito a proteger.
-  Además debe ser menor que la capacidad de carga del conductor (máxima corriente admisible por el conductor)
-  El poder de corte del fusible debe ser lo más alto posible.

- 📖 El tiempo de fusión y el tipo de curva dependerá del tipo de receptor y de si existe o no protección contra sobrecargas por medio de otro dispositivo.
- 📖 La selectividad entre dos fusibles se estima que puede conseguirse siempre que la relación de calibres sea mayor o igual de 1,6.

El cálculo se basa en dos condiciones:

Condición 1: Relacionada con la intensidad máxima admisible del conductor protegido

$$I_b \leq I_n \leq I_z$$

Esta condición indica físicamente que el fusible debe dejar pasar la corriente necesaria para que la instalación funcione según la demanda prevista, pero no debe permitir que se alcance una corriente que deteriore el cable, concretamente, su aislamiento, que es la parte débil.

I_b: corriente de diseño del circuito correspondiente.

La intensidad de diseño se calcula a partir de las fórmulas:

Monofásica:

$$I = \frac{P}{V * \cos \theta}$$

Trifásica:

$$I = \frac{P}{\sqrt{3} * V * \cos \theta}$$

La potencia será la correspondiente al tramo de la instalación que estemos protegiendo.

I_n: corriente nominal del fusible

I_z: corriente máxima admisible del conductor protegido

Se obtiene con la Tabla de intensidad admisible en amper

Condición 2: Relacionada con la sobrecarga transitoria que puede soportar el conductor Protegido

$$I_f \leq 1,45 * I_z$$

Esta desigualdad expresa que en realidad los cables eléctricos pueden soportar sobrecargas transitorias (no permanentes) sin deteriorarse de hasta un 145% de la intensidad máxima admisible térmicamente y sólo entonces los fusibles han de actuar, fundiéndose cuando, durante el tiempo convencional se mantiene la corriente convencional de fusión.

Se obtiene de la Tabla II:

I_n (A)	Tiempo convencional (h)	I_r Corriente convencional de fusión
$I_n \leq 4$	1	2,1 I _n
$4 < I_n \leq 16$	1	1,9 I _n
$16 < I_n \leq 63$	1	1,6 I _n
$63 < I_n \leq 160$	2	1,6 I _n
$160 < I_n \leq 400$	3	1,6 I _n
$400 < I_n$	4	1,6 I _n

Tabla II

I_z: corriente máxima admisible del conductor protegido

Se obtiene con la Tabla de intensidad admisible en amper (nom)

Ejemplo de diseño

Calcular los fusibles que protegen una Línea General de Alimentación de las siguientes características:

Potencia total a instalar de 1533.5 W, Sección del conductor de fase preseleccionado: cobre de 3.307 mm².

Aplicando la **CONDICIÓN 1**

$$I_b \leq I_n \leq I_z$$

$$I = \frac{P}{V * \cos \theta}$$

$$I = \frac{1533.5}{127 * 0.7} = 17.24$$

I_z: corriente máxima admisible del conductor protegido

Sección del conductor de fase preseleccionado: cobre de 3.307 mm², esto equivale a un calibre # 12 con una capacidad de 25 ampers

$$17 \text{ A} \leq I_n \leq 25 \text{ A}$$

Vemos que, no existe fusible normalizado que entre en la desigualdad:

La única posibilidad es aumentar el valor de I_z , para lo que tenemos que aumentar la sección de las fases. Seleccionamos la sección siguiente, la de 5.260 mm^2 , con una $I_z = 35 \text{ A}$. Esta sección permite cumplir la desigualdad, escogiendo un fusible de intensidad nominal 30 A .

$$I_b = 17 \text{ A} \leq I_n = 30 \text{ A} \leq I_z = 35 \text{ A} \text{ ----- Si CUMPLE}$$

Ahora hay que comprobar la **CONDICIÓN 2** del fusible:

$$I_f \leq 1,45 * I_z$$

En la Tabla II, el fusible elegido en la CONDICIÓN 1, de $I_n = 30 \text{ A}$, está en el intervalo [16, 63] y, por tanto, la intensidad que por fabricación normalizada funde, al cabo de 1 hora de funcionamiento en esas condiciones, es de 1,6 veces su I_n , queda:

$$1,6 * 17,24 \text{ A} \leq 1,45 * 35 \text{ A}$$

$$27,56 \text{ A} \leq 50 \text{ A} \text{ ----- Si CUMPLE}$$

NOTA. En caso de no cumplir de nuevo es necesario aumentar la sección del conductor para cumplir esta condición, y pasar a la sección siguiente.

Finalmente, el fusible que debo elegir es de $I_n = 30 \text{ A}$, y habrá que redimensionar las secciones de los conductores de fase, quedando éstos de 5.260 mm^2 .

Diámetro del hilo en milímetros	Corriente de fusión en Amper			
	Plomo	Plata	Cobre	Estaño-plomo
0,10	-	2	-	-
0,20	-	6	-	-
0,30	1	8	-	-
0,40	2	10	20	-
0,50	3	15	30	-
0,60	4	20	40	-
0,70	5	25	50	-
0,80	6	30	60	-
0,90	7	40	70	-
1,00	8	50	80	13,3
1,25	12	80	110	19,8
1,50	16	120	135	25,4
1,75	20	-	-	32,0
2,50	40	-	-	-
4,00	85	-	-	-

(Tabla I)

Ejemplo 2

Calcular los fusibles que protegen una Línea General de Alimentación de las siguientes características:

Potencia total a instalar de 125335 W, Sección del conductor de fase preseleccionado: cobre de 67.43 mm², con aislamiento THW-LS, 70° C.

Aplicando la **CONDICIÓN 1**

$$I_b \leq I_n \leq I_z$$

$$I = \frac{P}{V * \cos \theta}$$

$$I = \frac{125335}{600 * 0.7 * 1.73} = 172.49 \text{ Ampers}$$

$$172.49 \text{ A} \leq I_n \leq 175 \text{ A}$$

La única posibilidad es aumentar el valor de **I_z**, para lo que tenemos que aumentar la sección de las fases. La sección siguiente, la de 85.01 mm², con una I_z = 200 A. Esta sección permite cumplir la desigualdad, escogiendo un fusible de intensidad nominal 200 A.

$$173 \text{ A} \leq I_n=200\text{A} \leq I_z =200 \text{ A} \text{ ----- SI CUMPLE}$$

Ahora hay que comprobar la **CONDICIÓN 2** del fusible:

$$I_f \leq 1,45 * I_z$$

En la Tabla II, el fusible elegido en la CONDICIÓN 1, de I_n = 200 A, está en el intervalo [160, 400] A y, por tanto, la intensidad que por fabricación normalizada funde, al cabo de 3 horas de funcionamiento en esas condiciones, es de 1,6 veces su I_n, queda:

$$1,6*200 \text{ A} \leq 1,45*200 \text{ A}$$

$$320 \text{ A} \leq 290 \text{ A} \text{ ----- NO SE CUMPLE}$$

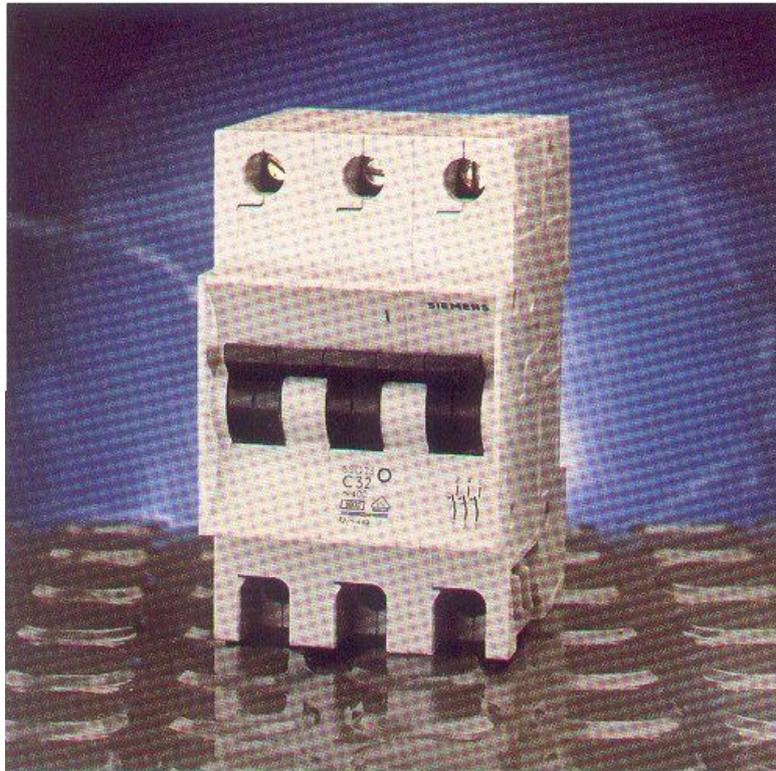
De nuevo es necesario aumentar la sección del conductor para cumplir esta condición, y pasar a la sección siguiente de 107.2 mm², con una I_z = 230 A, con la que:

$$1,6*200 \text{ A} \leq 1,45*230 \text{ A}$$

$$320 \text{ A} \leq 333.5 \text{ A} \text{ ----- SI CUMPLE}$$

Escuela Superior de Ingeniería Mecánica Y Eléctrica -- Ingeniería Eléctrica --- Protecciones uno
Finalmente, el fusible que debo elegir es de $I_n = 200 \text{ A}$, y habrá que redimensionar las secciones de los conductores de fase de la, quedando éstos de 107.2 mm^2 .

1.2 INTERRUPTORES TERMOMAGNÉTICOS



GENERALIDADES

Son aparatos destinados a la protección de los conductores en las instalaciones eléctricas domésticas donde la temperatura ambiente está comprendida entre 0 y 40° C (rango de la temperatura operativa).

Se lo define como un aparato interruptor provisto de un comando manual destinado a desconectar automáticamente de la red una instalación eléctrica o una parte de ella cuando la corriente sobrepasa un valor determinado. Cada interruptor termo debe poseer tres elementos:

1. Disparo térmico
2. Disparo magnético.
3. Mecanismo de desconexión.

La función del disparo térmico es proveer protección contra las corrientes de sobrecarga que son las producidas en un circuito eléctrico sano o sin fallas cuando la corriente eléctrica sobrepasa por lo menos en uno de los conductores la intensidad admisible, durante un tiempo tal que pueda provocar deterioros en la instalación.

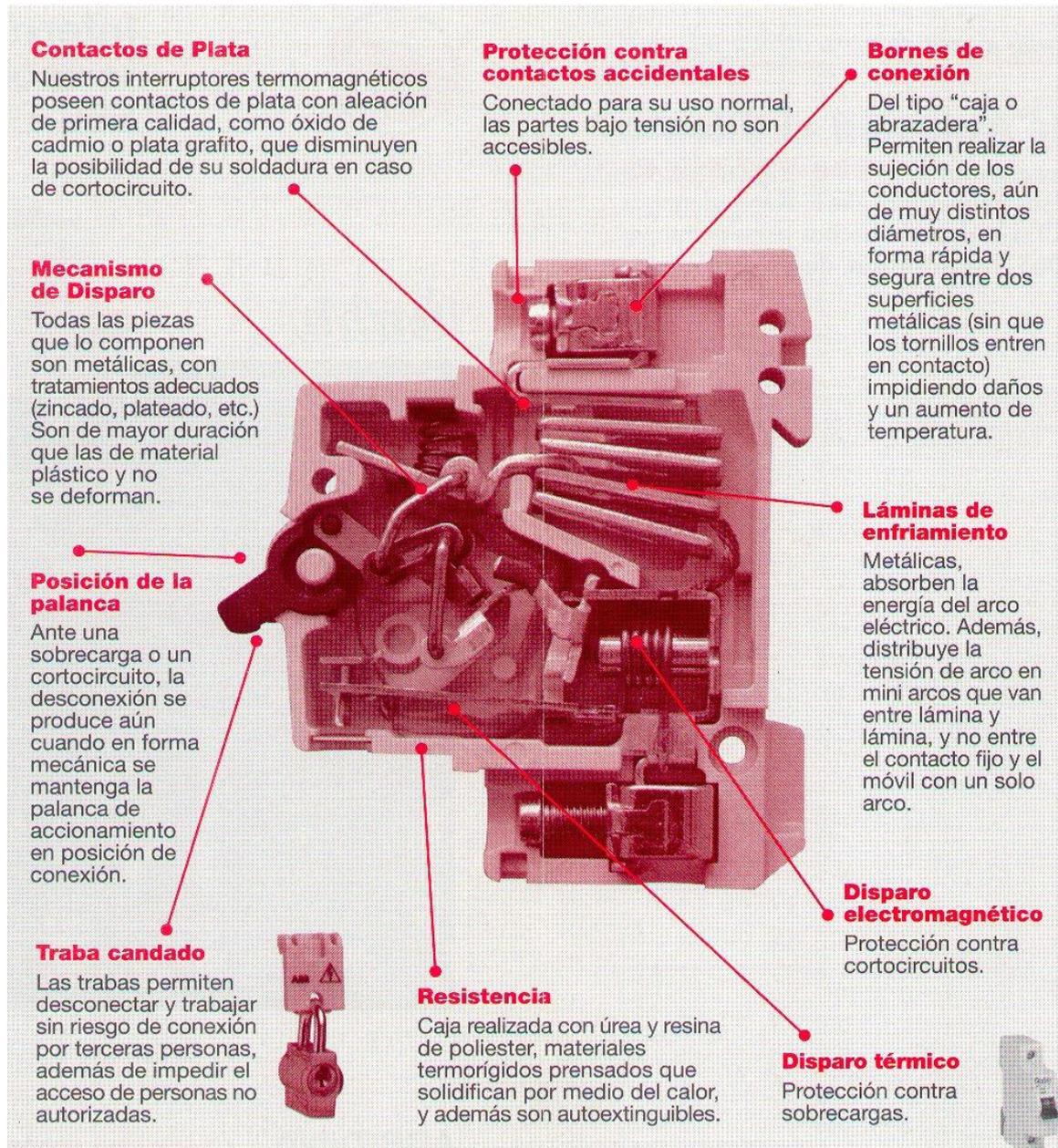


Figura 7

Qué es sobrecarga?

La sobrecarga es el defecto más frecuente sobre las máquinas. Se manifiesta por un aumento de la corriente absorbida por el motor y por sus efectos térmicos. Por ejemplo, la vida de un motor es

Escuela Superior de Ingeniería Mecánica Y Eléctrica -- Ingeniería Eléctrica --- Protecciones uno reducida en un 50% si su temperatura de funcionamiento (definida por su clase de aislamiento) se sobrepasa en 10° C de manera permanente.

Disparador térmico: Está formado por una pieza bimetálica que se deflexiona al ser calentada, en proporción al valor de la corriente y a su duración, actuando sobre el mecanismo de desconexión. El ajuste y calibrado del disparo bimetálico es hecho en fábrica lo que asegura su precisión e invariabilidad.

El disparo magnético: Actúa en forma instantánea sobre el mecanismo de desconexión en caso de un corto circuito, proporcionando una protección contra el mismo independientemente del disparo térmico. Las corrientes de cortocircuito son las sobre intensidades producidas por una falla de impedancias despreciables entre dos puntos de un circuito.

El disparo magnético consiste en principio en una bobina atravesada por la corriente del circuito. En caso de producirse un corto circuito en el mismo, la bobina atrae a un núcleo en el momento en que la corriente alcanza un valor predeterminado, actuando sobre el mecanismo de desconexión. Como consecuencia de esto los contactos se abren en un intervalo de tiempo muy corto.

Mecanismos de Desconexión:

El disparo térmico es el elemento que protege al circuito contra sobrecarga y requiere un cierto período de tiempo para operar. A su vez el disparo magnético asegura protección contra cortocircuitos y sobrecargas elevadas y peligrosas que no podían ser interrumpidas en forma lo suficientemente rápida por el disparo térmico.

Los dos disparos actúan sobre el mecanismo de desconexión en forma independiente sobre su elemento de traba. A su vez los dos disparos se protegen mutuamente el uno al otro.

El disparo magnético protege a la pieza del bimetálica de ser sobrecalentada peligrosamente para su elasticidad, actuando inmediatamente sobre el mecanismo de desconexión y el disparo térmico protege al alambre de la bobina del disparo magnético contra sobrecargas excesivas.

Disparo Térmico

Puede ser atravesado durante una hora sin desconectar por una corriente igual a 1,05 veces la corriente nominal. Luego en la hora siguiente debe producirse la desconexión por una corriente igual a 1,35 veces la corriente nominal.

Disparo Magnético

Por una corriente comprendida entre 3 y 10 veces la corriente nominal debe producirse la desconexión en forma instantánea (menos de 0,5 seg.). Las características de disparo, o sea el tiempo(en segundos) de disparo en función del valor seleccionado por encima de la intensidad nominal del circuito o aparato, y viene suministrada en los catálogos de los fabricantes. Normalmente los fabricantes elaboran dos tipos de llaves (tipo L o tipo G).

Escuela Superior de Ingeniería Mecánica Y Eléctrica -- Ingeniería Eléctrica --- Protecciones uno
Unas pueden ser para proteger instalaciones solamente (por ejemplo circuitos de iluminación y control para oficinas o requerimientos similares en industrias livianas) y otras para protección de instalaciones con aparatos eléctricos.

Construcción:

Los automáticos N tienen disparador térmico para la protección contra sobrecargas y disparador magnético para la protección contra cortocircuitos, ambos son ajustados en fábrica.

Los aparatos tienen desconexión libre, es decir que cuando se produce el disparo (bien por sobrecarga o por cortocircuito) el automático desconecta aunque se sujete la palanca de accionamiento. Los automáticos multipolares tienen desconexión interna, independiente del accionamiento que une los distintos polos.

TIPOS DE TERMOMAGNÉTICAS SEGÚN:

TIPO L

Para la protección de instalaciones. Este tipo es usado para proteger circuitos de iluminación y control. Se usan principalmente en instalaciones de edificios, oficinas o similares requerimientos en industrias livianas. La corriente nominal de los interruptores es equivalente a las corrientes nominales y a las curvas intensidad / tiempo de los fusibles, de acuerdo a la norma VDE 0636. La elección de la corriente nominal del interruptor a colocar, se hace en base a la sección y al número de conductores eléctricos existentes en la canalización. El interruptor debe permitir el paso de corrientes eléctricas que no dañen la aislamiento de los conductores que constituyen la instalación. Como valor de referencia, la intensidad permanente máxima del interruptor debe ser menor o igual que la intensidad máxima admisible del conductor. El margen de acción del disparo magnético comprende valores entre 3,5 y 5 veces la corriente nominal del interruptor.

TIPO G:

Protección de instalaciones y aparatos eléctricos. La intensidad permanente máxima prácticamente es igual a la corriente nominal. En la protección de conductores contra sobrecargas, la corriente nominal del interruptor debe ser igual o menor que la intensidad máxima admisible del conductor. El disparo magnético se produce cuando la corriente alcanza valores entre 6 y 10 veces la corriente nominal del interruptor. Son adecuados para la protección de motores contra cortocircuitos, empleados en combinación con contactores y relevos de protección por falta de fase.

ACCIÓN TÉRMICA

a) Los tipos B, C y D son sobrecargas de $1,13 I_n$ no desconectan en tiempos mayores que 1 hora (hasta 36 A).

b) En cambio con $1,45 I_n$ – corta en un tiempo menor a 1 hora (hasta 63 A). El comportamiento frente a sobrecargas instantáneas de 3 a 50 I_n es distinto según el tipo, y el instalador debe saber cual utilizar según sea el tipo de carga de su instalación.

Tipo B:

Con 3 I_n d sobrecarga, no desconecta.

Con 5 I_n de sobrecarga, desconecta.

Aplicación: En líneas con cargas fuertemente (horno eléctrico) resistivas o con alumbrado fluorescente (de bajas corrientes de conexión).

Tipo C:

Con 5 In de sobrecarga, no desconecta.

Con 10 In de sobrecarga, desconecta.

Aplicación: En líneas con cargas del tipo de alumbrado y aparatos electrodomésticos (sin preponderancia de motores).

Tipo D:

Con 10 In de sobrecarga, no desconecta.

Con 50 In de sobrecarga, desconecta.

Aplicación: En caso de circuitos que alimentan motores que pueden arrancar con I corrientes d 6 a 7 veces la In (con cuples resistentes de arranque importantes). Los tiempos de desconexión son menores de 0,1 seg.

Los ensayos que más caracterizan la calidad de un termomagnético son:

Ensayo de vida:

- | | | |
|---|---|-----------------------|
| <ul style="list-style-type: none"> 📖 Mecánica (sin carga) 📖 Eléctrica (con carga) 📖 Cortocircuito, 1500, 3000, 4500, 6000, 10.000 KA | } | 10.000 accionamientos |
| <p>(en una instalación normal, la Icc en bornes de la termomagnética en el tablero principal. Electrificación media, no supera los 3000 A de Icc.</p> | | |

CURVAS DE DISPARO:

Una sobrecarga, se caracterizada por un incremento paulatino de la In, puede deberse a una anomalía permanente que se empieza a manifestar (falla de aislamiento), o transitoria (por ejemplo, corriente de arranque de motores). Tanto cables como receptores están dimensionados para admitir una carga superior a la normal durante un tiempo determinado sin poner en riesgo sus características aislantes. Cuando la sobrecarga se manifiesta de manera violenta (varias veces la In) de manera instantánea estamos frente a un cortocircuito, el cual deberá aislarse rápidamente para salvaguardar los bienes. Dos protecciones independientemente están asociadas en un aparato de protección para garantizar:

- ❖ Protección contra sobrecarga. Su característica de disparo es a tiempo dependiente o inverso, es decir que a mayor valor de corriente es menor el tiempo de actuación.
- ❖ Protección contra cortocircuitos. Su característica de disparo es a tiempo independiente, es decir que a partir de cierto valor de corriente de falla de protección actúa, siempre en el mismo tiempo.

Las normas IEC 947.2 y 898 fijan las características de disparo de las protecciones de los interruptores automáticos.

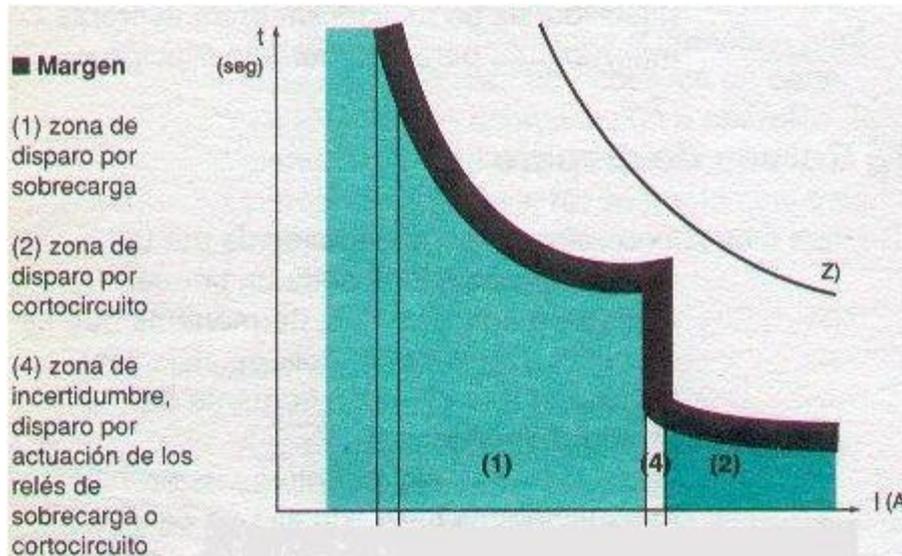


Figura 8

Capacidad de ruptura:

En todas las instalaciones que requieran el uso de interruptores termomagnéticos del sistema N, prácticamente sin excepción, el nivel del cortocircuito en los bornes del automático no supera los 3000 A, debido a la impedancia propia del transformador y de los elementos de conexión entre la fuente y el automático.

Si el nivel de cortocircuito excede la capacidad de interrupción al automático, pueden colocarse fusibles como protección de respaldo. Con fusibles tipo GI / GT según VDE o IEC el valor de los mismos puede ser de hasta 100 A, con lo que el nivel de cortocircuito manejable por la combinación alcanza los 25 KA, sin afectar el posterior funcionamiento del automático.

En corriente continua la capacidad de ruptura es de más de 20 KA a 60 VCC o a 110 VCC para la versión bipolar (para constantes de tiempo a 4ms.) Con interruptores de respaldo se pueden emplear hasta un nivel de cortocircuito de 6 KA.

Selectividad:

La selectividad entre automático y fusible antepuesto se da si el valor de $I_2 t$ de actuación total del automático es menor que el valor $I_2 t$ de prearco del fusible.

La generalidad de las fallas ocurre en el consumo o en sus cercanías, lo que equivale a una distancia considerable al automático.

Esas fallas son considerablemente menores que la capacidad de interrupción del automático, por lo que el automático actuará individualmente sin la activación del fusible.

Influencia de la temperatura ambiente:

Escuela Superior de Ingeniería Mecánica Y Eléctrica -- Ingeniería Eléctrica --- Protecciones uno
El disparador sobrecorriente (bimetal) está ajustado para una temperatura de $20 \pm 5^\circ\text{C}$.
Temperaturas de ambiente más elevadas (por ejemplo, armarios donde la temperatura es alta),
obligan a una corrección de la carga.

1.3 INTERRUPTOR ELECTROMAGNETICO



Escuela Superior de Ingeniería Mecánica Y Eléctrica -- Ingeniería Eléctrica --- Protecciones uno Interruptor que comprende una base, una cubierta de contacto conectada a la base, un grupo de contactos estacionarios dispuestos dentro de la cubierta de contacto, un accionador montado en la base para deslizarse a lo largo de su eje y contactos móviles montados en el accionador para moverse a lo largo del eje del mismo entre una posición abierta y una posición cerrada en la cual ecoplan con los contactos estacionarios, caracterizado por un modulo de polo de potencia, mentado a lo largo de la cubierta de contacto

los interruptores electromagnéticos tienen un electroimán dentro, si pasa mas corriente que la permitida través del electroimán este se acciona y corta los contactos e interrumpe la corriente, son mas rápidos y mas precisos en el limite de corriente que los térmicos y se emplea en lugares donde se necesita un corte rápido como alimentación de motores de gran tamaño etc.

un interruptor tiene la función de interrumpir el paso de algo, normalmente se usa este termino para interrumpir el paso de la corriente eléctrica. Ahora que si es un interruptor electromagnético será el dispositivo que de manera automática interrumpe el paso de la corriente eléctrica por medio del magnetismo. Normalmente se emplea en circuitos eléctricos para puertas automáticas elevadores, sistemas eléctricos de carros o maquinaria semi o automática para operación o suspensión de funciones.

EL CONTACTOR

El contactor se puede definir como un dispositivo diseñado para realizar funciones de conmutación repetida para la activación o desactivación de los circuitos eléctricos de potencia por medio de una señal de control eléctrica a distancia.

Los contactores pueden ser clasificados como del tipo electromagnético y como del tipo de estado sólido.

Los electromagnéticos, como los que se muestra en la figura 9, trabajan bajo el principio de inducción de Faraday, ya que son accionados cuando se energiza una bobina que forma parte de un electroimán.



Los contactores de estado sólido son accionados por el principio de semiconductores que permiten una conmutación electrónica por medio de tiristores, los cuales pueden soportar elevadas corrientes de interrupción, como los que se muestran en la figura.

En estos tipos de contactores no hay piezas mecánicas y comúnmente los circuitos de salida y entrada están separados galvánicamente por un opto acoplador.

Existe una gran variedad de marcas y modelos de contactores, cada una con características eléctricas y mecánicas diseñadas para cumplir con los requerimientos industriales.

A diferencia de los contactores electromecánicos que manejan una señal lógica para su activación, los contactores de estado sólido pueden operar con señales lógicas y con señales analógicas de 0-5, 0-10 Vcc o 4-20 mA. Pueden manejar cargas en rangos de corrientes desde 60 A hasta 500 A en tensiones desde 120 hasta 660 VCC o VCA y trabajar cualquier tipo de carga ya sea resistiva (de valor resistivo constante o no) o inductiva.



Figura 10 Contactores de estado sólido de dos marcas diferentes

ELEMENTOS QUE COMPONEN UN CONTACTOR MAGNÉTICO

Las partes básicas que conforman un contactor electromagnético son: la carcasa, el circuito electromagnético y los contactos. Cada una de estas partes las podemos desensamblar para darle mantenimiento o reparar el dispositivo, por esto es importante conocer las características de cada uno de ellos y los elementos que los conforman. A continuación se describe las características de cada una de estas partes:

La carcasa: La carcasa es el soporte de los elementos que conforman el contactor, está fabricada con un material aislante hecho de un material polímero con fibra de vidrio muy resistente a las elevadas temperaturas y con una gran rigidez eléctrica, en ella se fijan el circuito electromagnético y los contactos eléctricos. En la figura 11(a) podemos observar la parte externa de la carcasa de un contactor, en la figura 11(b) la parte de la carcasa donde se coloca el núcleo y la bobina y en la

Escuela Superior de Ingeniería Mecánica Y Eléctrica -- Ingeniería Eléctrica --- Protecciones uno
 11(c) la parte interna la armadura, donde ambas conforman el circuito electromagnético. (a) parte
 externa de la carcaza (b) carcaza interna donde se (c) Carcaza interna donde se de un contactor
 aloja el núcleo y la bobina aloja la armadura



Figura 11a, b, c.

Circuito electromagnético: El circuito electromagnético esta conformado por tres partes básicas: La bobina, el núcleo y la armadura. La bobina genera el campo magnético, el núcleo lo refuerza y la armadura reacciona a este. En la figura 12, podemos observar la bobina de tres diferentes tipos de contactores. Una bobina esta formada por un conductor enrollado de cierto número de espiras, que al energizarse con un voltaje de cd o ca. forma un campo magnético.

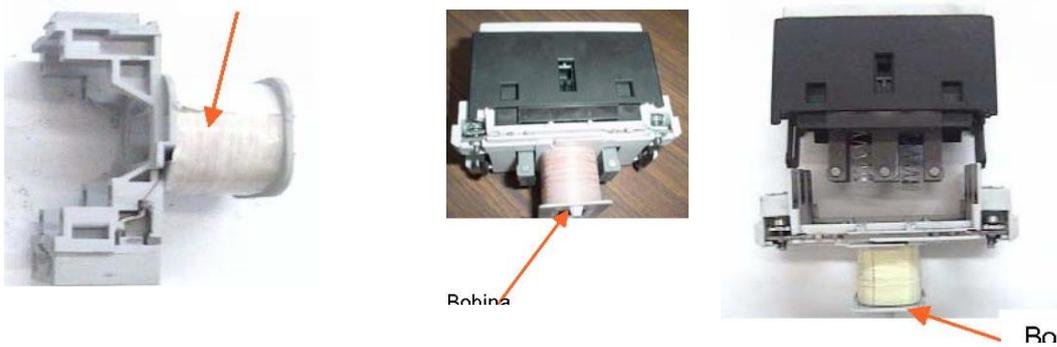


Figura 12 Bobinas de tres diferentes tipos de contactores

El núcleo es una parte metálica en forma de E, construida de laminas de un material ferromagnético y se encuentra colocada de forma fija en la carcaza. En la figura 13, se puede ver físicamente la forma de la armadura y como se encuentra colocada en los contactores. La función del núcleo es fortalecer y distribuir adecuadamente el flujo magnético que se forma en la bobina cuando esta es energizada, de forma que ejerza una fuerte atracción sobre la armadura. La bobina se monta en el núcleo precisamente

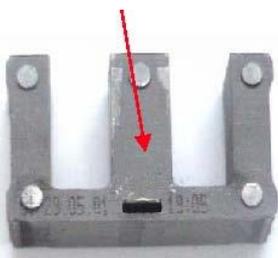




Figura 13 Núcleo, Ubicación del núcleo del contactor, Ubicación del núcleo del contacto

Forma física del núcleo y ubicación dentro del contactor. La armadura es una parte móvil del contactor y está construida del mismo material que el núcleo, se mantiene separada del núcleo por medio de la fuerza de un resorte, el cual, es vencido solamente cuando la bobina es energizada.

Para contactores de corriente alterna el núcleo contiene dos bobinas que estabilizan el cruce por cero de la corriente alterna y evitan la vibración del mismo. Estas bobinas se encuentran colocadas en dos de los extremos de la armadura.

En la figura 14, se puede observar con varias fotografías la forma física de la armadura, su ubicación en la carcasa del contactor, el resorte que lo mantiene fijo y la bobina de sombra para los contactores de c.a.

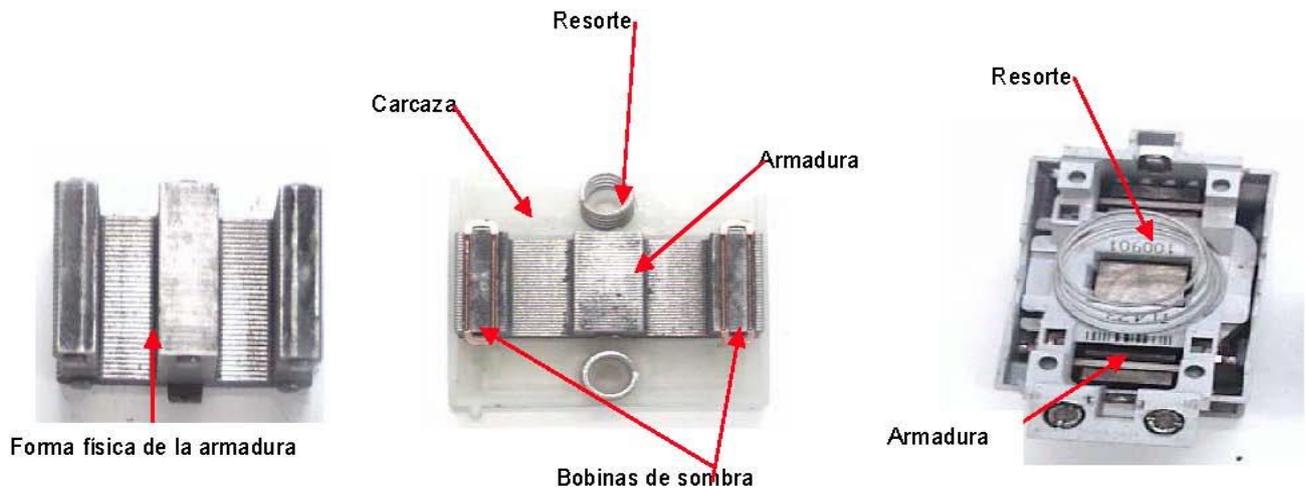


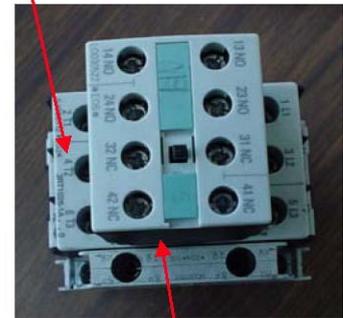
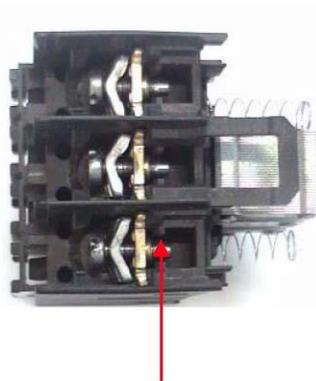
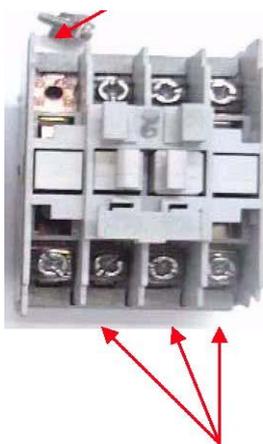
Figura 14 Forma física de la armadura, resorte y bobina de sombra

Contatos: En un contactor podemos encontrar dos tipos de contactos: los *contactos principales* y los *contactos auxiliares*. Los *principales* son de construcción robusta y están diseñados para soportar elevadas corrientes de encendido y apagado, permitiendo el paso de la corriente eléctrica a la carga sin deteriorarse. Comúnmente estos están *fabricados de bronce fosforado* para que sean buenos conductores y mecánicamente más resistentes. Se encuentran colocados en una cámara construida de fibra de vidrio y poliéster que soporta elevadas temperaturas y evita que se propague la chispa. Para manejo de cargas muy grandes estos pueden estar protegidos por una bobina extintora del arco eléctrico, que ayuda a prolongar la vida útil de estos.

Los *contactos auxiliares* a diferencia de los de fuerza son de construcción sencilla y están diseñados para soportar pequeñas corrientes de conmutación de los circuitos de control, comúnmente para realizar el enclavamiento del contactor o para dar continuidad a la secuencia de la lógica de control, por consiguiente, la corriente que pasa por ellos es la misma que circula por la bobina donde se encuentra colocado. En la figura 15, podemos ver físicamente como se encuentran los contactos auxiliares y los contactos principales. Los contactos auxiliares pueden ensamblarse en el costado o en la parte superior del contactor.

Contactos principales

Contactos principales



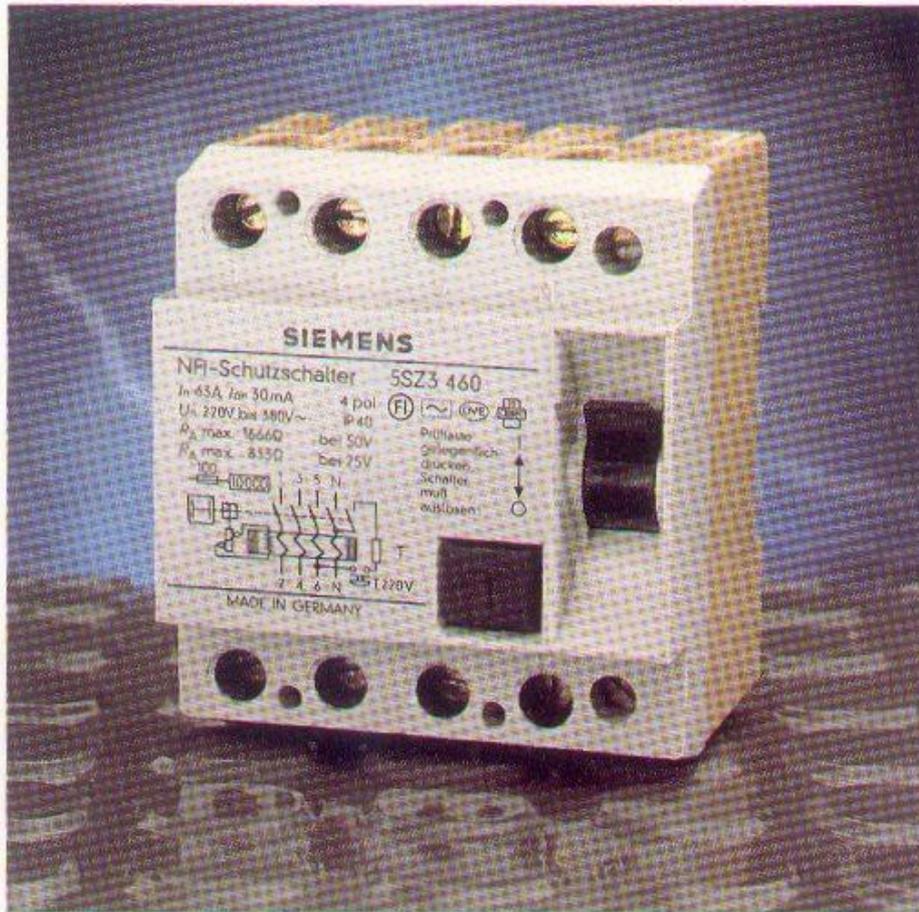
Contactos principales

Contactos principales

Contactos auxiliares

Figura 15 Forma física de los contactos principales y auxiliares

INTERRUPTOR DIFERENCIAL



Accidentes contra las personas – Accidentes eléctricos:

El accidente eléctrico es de baja frecuencia pero de gravísimas consecuencias cada vez que se produce, tanto por mortalidad como por lesiones orgánicas. Es ocasionado por el pasaje de la corriente eléctrica a través del cuerpo humano; provoca las lesiones y accidentes.

Existe una clasificación que relaciona el valor de la corriente y los efectos provocados.

Mili Amper	Efectos sobre el organismo
0,5 Hasta 10	. se percibe sin reacción. . sin efectos peligrosos, puede desprenderse la persona del contacto.
Mayor de 10 y hasta 20	. produce contracción de los músculos y no se desprende del contacto.
Mayor de 20 y hasta 30	. produce asfixia con tiempos mayores a 1 segundo.
Mayor de 50	. probabilidad de fibrilación en un 5% con un segundo.
Mayor de 70 y hasta 140	. probabilidad de fibrilación en un 50% con un segundo.
Mayor de 140 y hasta 300	. probabilidad de fibrilación en un 95 % en un segundo.
Mayor de 300	. probabilidad de fibrilación mayor del 95 % en un segundo.

Tabla 3

Nota: ya que el ciclo de bombeo de la sangre es de 0,75 segundos y en él hay una zona crítica donde puede causar fibrilación (aproximadamente 0,25 segundos), se definió para una protección diferencial un máximo de 0,2 segundos y una corriente máxima de 30 mA.

Resistencia del cuerpo humano:

Puesto que las instalaciones de inmuebles domiciliarias las tensiones nominales son normalmente de 220 V de corriente alterna o a lo sumo 440 V, las resistencias del cuerpo varían según la tensión que recibe. La siguiente tabla ilustra este fenómeno considerando la piel seca entre mano y pié y con una superficie de contacto de 50 a 100 cm².

Tensión de contacto en Volt.	Impedancia en OHM
25	3250
50	2625
75	2200
100	1875
220	1350
380	1250

Tabla 4

Notas:

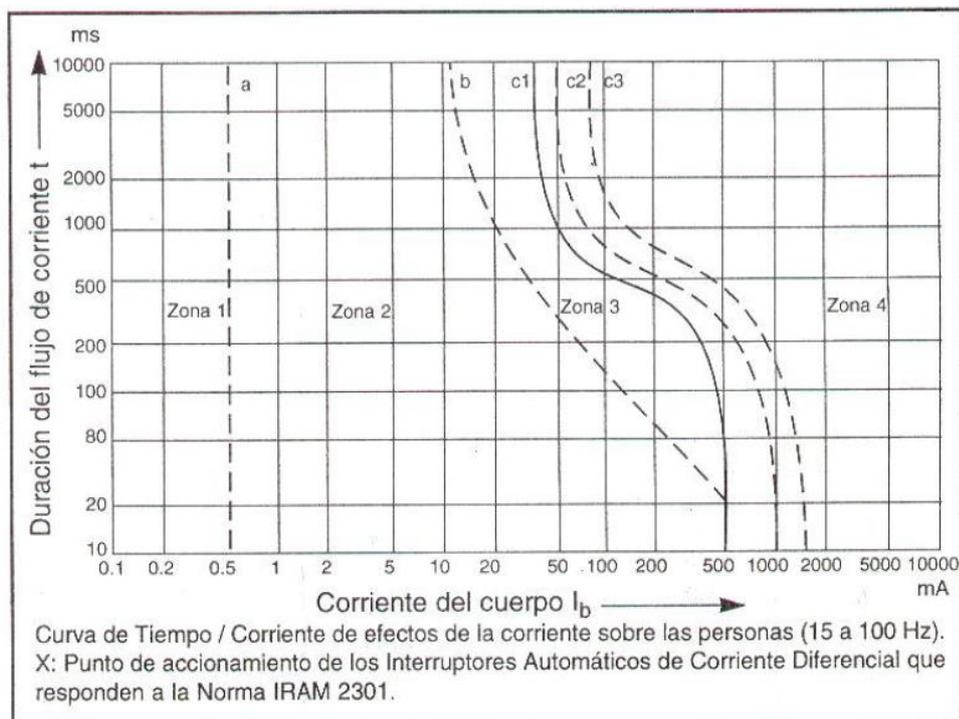
- 📖 Con la piel húmeda estos valores bajan en un 10 y 25 % hasta 50 V de contacto.
- 📖 Con la piel húmeda disoluciones conductivas, los valores bajan un 50%.
- 📖 Con tensiones de contacto de 150 V la resistencia depende poco de la humedad.

Parámetros que crean el riesgo eléctrico:

- 1) Corriente máxima a través del cuerpo, mayor a 10 mA y menor a 30 mA crean asfixia.
- 2) Tensión de contacto máxima (con piel seca) no mayor de 24 V de corriente alterna.
- 3) Corriente máxima sin riesgo cardíaco severo igual a 30 mA.
- 4) Tiempo de circulación de la corriente no mayor a 200 m segundos (0,2 seg.)
- 5) Tensión de contacto máxima (con cuerpo sumergido) no mayor a 12 V de corriente alterna.

TABLA	
Zonas	Efectos Fisiológicos.
Zona I	Normalmente sin reacción.
Zona II	Usualmente sin efectos fisiológicos.
Zona III	Usualmente no se esperan daños orgánicos. Aparecen contracciones musculares y dificultad en la respiración, disturbios reversibles de impulsos en el corazón. Paros cardíacos transitorios sin fibrilación ventricular se incrementan con la corriente y el tiempo.
Zona IV	En adición a los efectos de la Zona III, la probabilidad de fibrilación ventricular se incrementa hasta un 5% sobre (curva C2), y hasta un 50% (curva C3), y arriba de un 50%, por encima de la curva c3. los efectos de paros cardíacos, respiratorios y quemaduras pueden ocurrir con el incremento de la corriente y el tiempo.

Tabla 5



FUNCIONAMIENTO

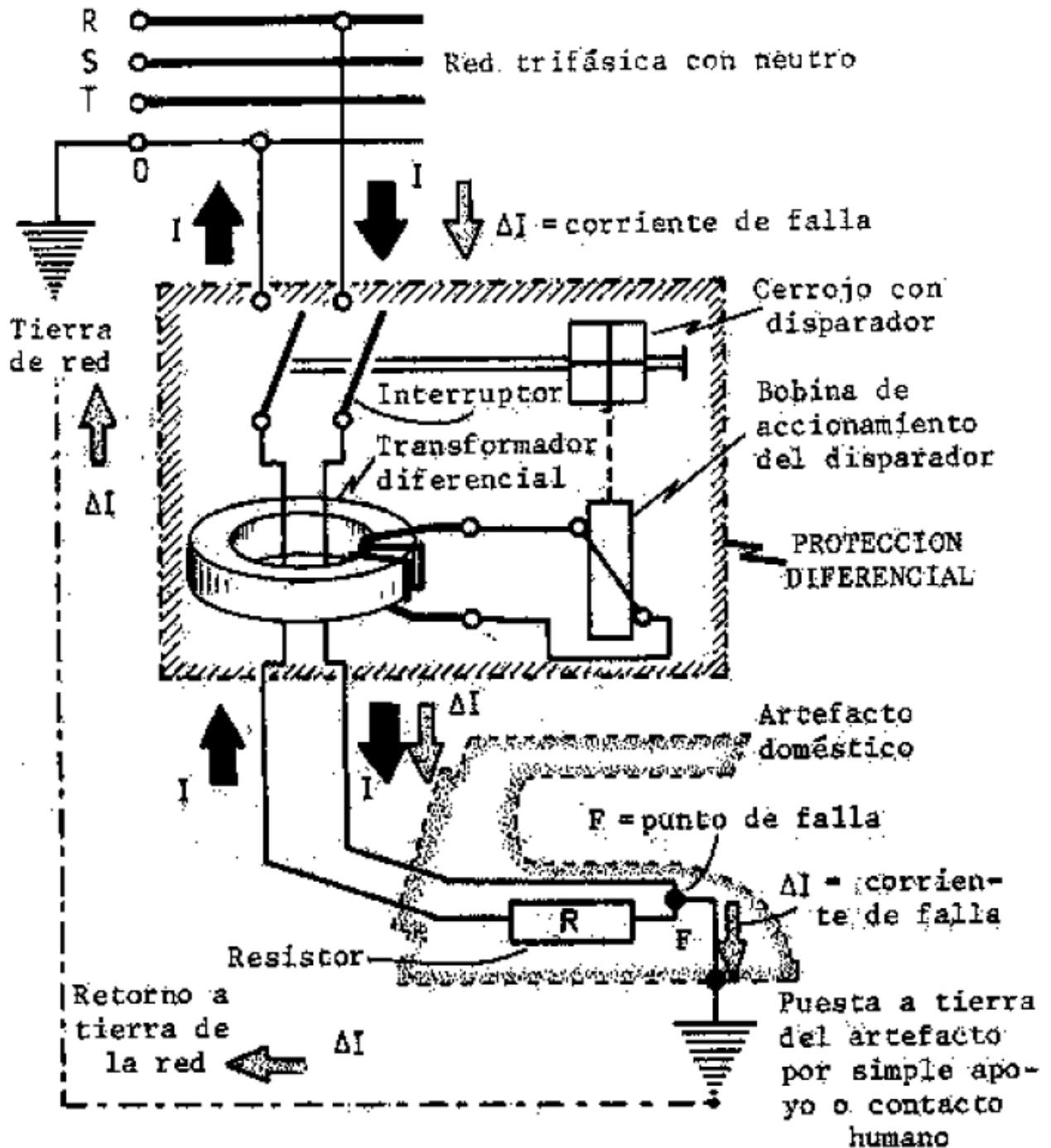


Figura 16

La ASOCIACIÓN ELECTRÓNICA, en su Reglamentación para la Ejecución de Instalaciones Eléctricas en Inmuebles, edición de agosto d 1984, insiste en el uso de las llamadas

En la figura 16, tenemos el esquema de estas protecciones y en ese dibujo se trata de explicar su acción aplicada a una plancha común de uso doméstico, que sufre una falla en su aislamiento. La resistencia de calefacción marcada con R, ocasiona el calor necesario para cumplir su función. Si por accidente falla el aislamiento del artefacto, por accidente falla la aislación del artefacto, por ejemplo en el punto F a la derecha, la corriente I que toma no regresa completa al neutro de la red por el conductor de la izquierda. Una parte que señalamos con ΔI pasa a las partes exteriores, de allí a tierra y de allí se cierra por el neutro a la red. El valor de I es la corriente normal del artefacto y ΔI la corriente de falla. Nótese muy particularmente que los dos conductores de alimentación atraviesan un núcleo magnético de forma anular o toroidal. Si la corriente de falla no existe, es decir $\Delta I = 0$, las dos corrientes principales I son exactamente iguales y de sentido contrario. Al atravesar juntas el núcleo, sus efectos magnéticos se contraponen, se anulan y el resultado no produce ningún efecto en la bobina que está arrollada sobre el núcleo anular. Pero si hay una falla, por uno de los conductores (el de la derecha del dibujo), pasa la corriente principal I y la de falla ΔI . Dicho de otra manera:

Por el conductor de la izquierda pasa I

Por el conductor de la derecha pasa I + ΔI

Al existir la falla, el desequilibrio señalado ocasiona una fuerza electromotriz alterna inducida en la bobina del núcleo, porque el flujo alterno abarcado por el núcleo no es nulo. Esa fuerza electromotriz da lugar a una corriente en la bobina exterior del mismo circuito, la que acciona su núcleo y destraba el mecanismo del cerrojo y hace abrir el interruptor, que había sido cerrado con anterioridad y de ese modo, tenía la energía acumulada en sus resortes como para hacer una apertura rápida.

La corriente de falla se puede producir, por simple pasaje a tierra a causa de estar apoyado o vinculado un artefacto con tierra o a través del cuerpo de una persona que tome el objeto y esté apoyada en tierra. En este último caso, la corriente atravesará el cuerpo de la persona. Por lo tanto, el interruptor de acción diferencial debe actuar bajo dos condiciones fundamentales:

- _ Con una corriente que no alcance a dañar a la persona.
- _ Con un tiempo muy breve, para que ese efecto no sea perjudicial.

Todos los interruptores diferenciales que ofrece el comercio actual cumplen esas condiciones y están correctamente dimensionados para sus fines específicos. Sólo resta que sean instalados bajo las condiciones que sus especificaciones ordenan. Deben cuidarse que el conductor neutro no esté conectado a tierra, después del interruptor. Para mayor seguridad, estos interruptores vienen provistos de un sistema que permite verificar su eficaz acción.

2.- TRANSFORMADORES DE INSTRUMENTO

GENERALIDADES SOBRE SISTEMAS ELECTRICOS DE POTENCIA

En un diagrama básico se representan cada uno de los elementos que integran un sistema de potencia con el fin de definir la función de cada uno de ellos, sin embargo debe tenerse en cuenta que el sistema tiene conectados generadores en diferentes puntos del sistema con sus respectivos transformadores elevadores, también tiene muchas subestaciones reductoras que van instaladas cerca de los diferentes centros de consumo y además una serie de líneas de transmisión que interconectan todo el sistema.

SISTEMA ELECTRICO DE POTENCIA

Elementos que integran el sistema eléctrico de potencia:

- 1.- Generador
- 2.- Transformador Elevador
- 3.- Barras Colectoras
- 4.- Líneas de Transmisión
- 5.- Transformador Reductor
- 6.- Alimentadores

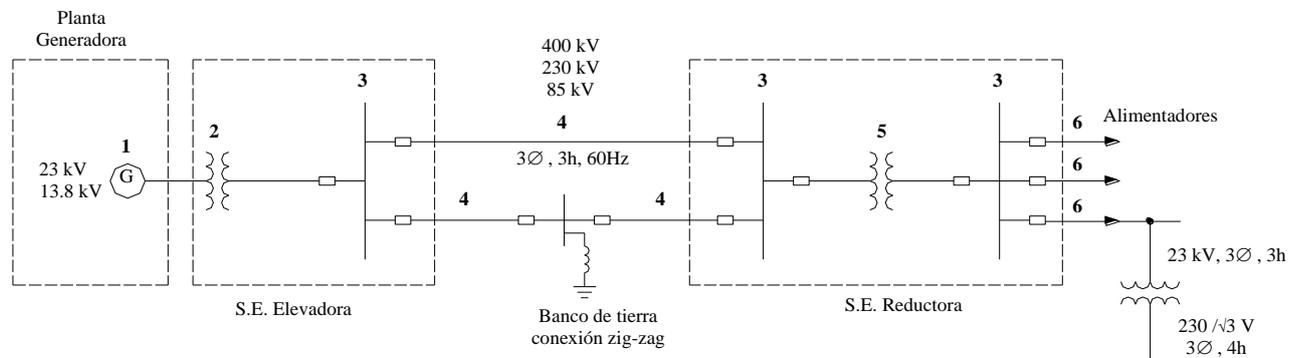


Diagrama elemental de un sistema eléctrico de potencia.

Sistema de Potencia: Sirve para generar, transformar, transmitir y distribuir la energía eléctrica.

Generador: Transforma la energía mecánica en energía eléctrica para alimentar al sistema.

Transformador Elevador: Su función es elevar el voltaje de generación a un voltaje de transmisión para obtener los beneficios en la línea de transmisión, las cuales son:

- Para una potencia dada, al elevarse el voltaje se reduce la magnitud de la corriente (I) de la carga y debido a esto se reducen las pérdidas por efecto Joule en la Línea de Transmisión las cuales son proporcionales a $J = R I^2$ [W]
- Al reducirse la magnitud de la corriente (I), se reduce también el calibre de los conductores.
- Al reducirse las pérdidas por efecto Joule en la Línea de Transmisión (L.T.) se mejora la regulación de voltaje de la línea.
- La capacidad de transmisión de potencia de la línea aumenta debido a que es directamente proporcional al cuadrado del voltaje.

$$P. \text{ transmitida en L.T.} = \frac{V^2}{X} \text{sen } \delta$$

Si la potencia máxima se presenta cuando el ángulo es de 90° :

$$P. \text{ max.} = \frac{V^2}{X}$$

Barras Colectoras: Su función es interconectar todos los elementos del sistema de potencia.

Línea de Transmisión: Tiene como función transportar la energía eléctrica de las plantas generadoras a los centros de consumo y sirven también para interconectar al sistema.

Subestación Reductora: Su función es reducir el voltaje de transmisión a un voltaje de utilización y se encuentra localizada cerca o dentro de los centros de consumo.

Alimentador: Su función es transportar la energía eléctrica de la Subestación Reductora al consumidor o cliente. Si el cliente es de tipo industrial o comercial se alimenta directamente a su subestación para reducir el voltaje de acuerdo a sus necesidades. Si el cliente o consumidor es tipo residencial se utilizan transformadores de distribución para reducir el voltaje a $220/\sqrt{3}$ V.

2.1 TRANSFORMADORES DE CORRIENTE Y DE POTENCIAL

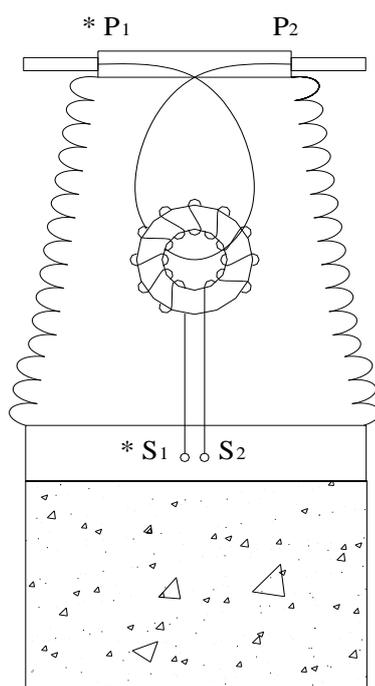
Los transformadores de corriente y los transformadores de potencial son los encargados de alimentar a los relevadores, por lo que es importante analizar su funcionamiento.

2.1.2 TRANSFORMADOR DE CORRIENTE (TC)

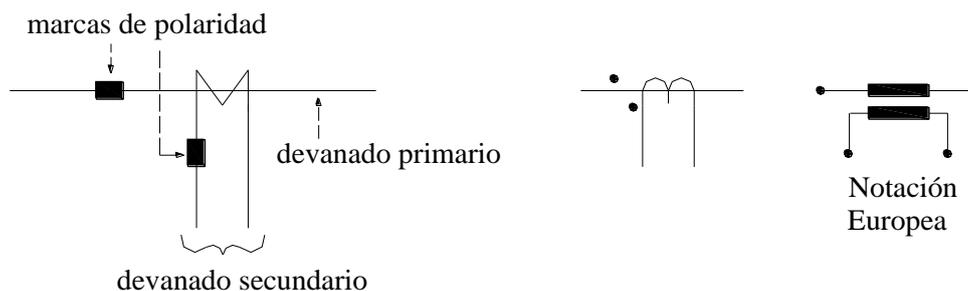
Función: Reducir la magnitud de la corriente en función de su relación de transformación sin alterar la frecuencia, la forma de onda ni el ángulo de fase. Y aislar de la alta tensión para poder alimentar a los relevadores en baja tensión y con baja corriente.

El aislamiento del TC depende de la tensión a la que se conecta.

Los bornes de los TC se representan como P_1 P_2 para el devanado primario, y como S_1 S_2 para el devanado secundario.



Símbolo del T. C.:

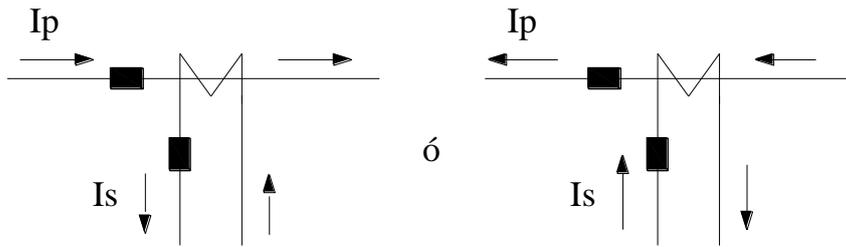


El

devanado primario se representa por medio de una línea recta, el devanado secundario se representa de forma parecida a una "M".

Marcas de polaridad: indican los sentidos relativos de las corrientes primaria y secundaria durante un medio ciclo.

Interpretación de las marcas de polaridad:



“Si la corriente primaria entra por marca de polaridad, la corriente inducida en el secundario sale por marca de polaridad. Si la corriente primaria sale por marca de polaridad, la corriente inducida en el secundario entra por marca de polaridad.”

Relación de transformación (K_{TC} ó R_{TC}): se da en función de la corriente nominal primaria y la corriente nominal secundaria. La corriente nominal secundaria está normalizada a 5 A.

$$k_{TC} = \frac{I_{NP}}{I_{NS}}$$

Donde: k_{TC} = Relación de transformación

I_{NP} = Corriente nominal del devanado primario.

i_{NS} = Corriente nominal del devanado secundario.

Ejemplo de relación de transformación: 600:5 , 400 : 5

Se tiene un transformador de corriente con relación de 600:5 y la corriente en el devanado primario es de 300 Amperes.

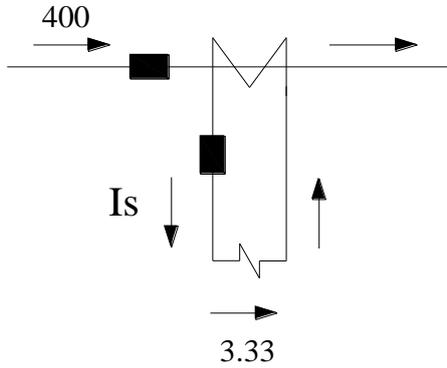
Si circulan en el primario I_p = 300 A y la relación es K_{tc}=600/5 = 120, la corriente secundaria es:

$$i_s = I_p / K_{tc} = 300 / 120 = 2.5 \text{ amp}$$

Este es el valor de la corriente que está circulando por el devanado secundario.

Ejemplos de cálculo de corrientes secundarias y determinación del sentido de las mismas:

600 / 5



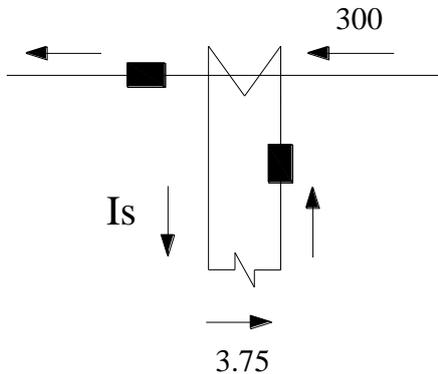
$$K_{TC} = \frac{I_{NP}}{i_{NS}} = \frac{600}{5} = 120$$

$$k_{TC} = \frac{I_P}{i_s}$$

$$i_s = \frac{I_P}{k_{TC}} = \frac{400}{120} = 3.33 \text{ A}$$

Si la corriente primaria está entrando al devanado primario del T.C. por marca de polaridad, la corriente inducida en el secundario debe estar saliendo del devanado por marca de polaridad.

400 / 5

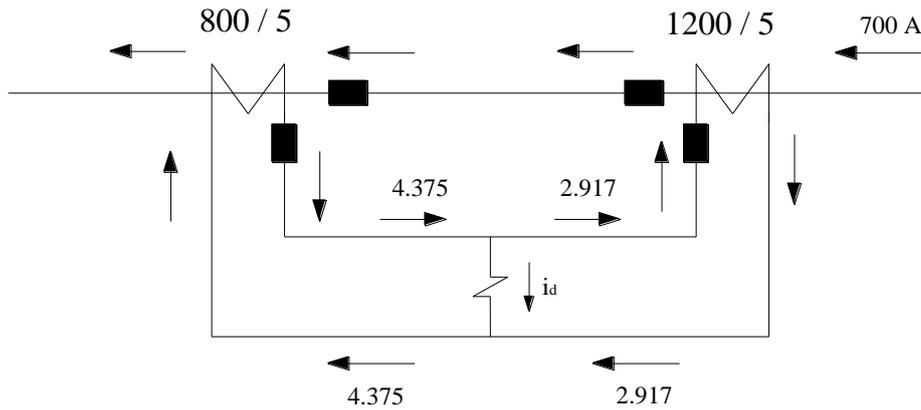


$$K_{TC} = \frac{I_{NP}}{i_{NS}} = \frac{400}{5} = 80$$

$$k_{TC} = \frac{I_P}{i_s}$$

$$i_s = \frac{I_P}{k_{TC}} = \frac{300}{80} = 3.75 \text{ A}$$

Dadas las relaciones de los T:C: y la magnitud y el sentido de la corriente primaria , determinar las magnitudes y sentidos de las corrientes secundarias y la corriente en le relevador diferencial .



$$k_{TC} = \frac{I_{NP}}{i_{NS}} = \frac{800}{5} = 160$$

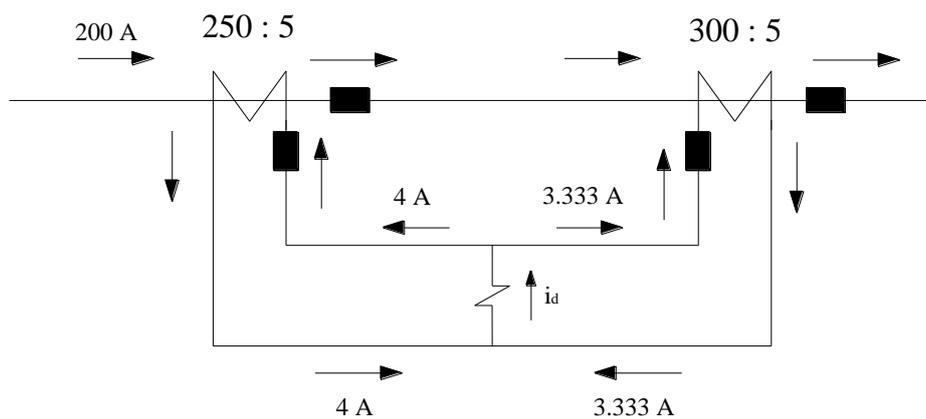
$$k_{TC} = \frac{I_{NP}}{i_{NS}} = \frac{1200}{5} = 240$$

$$k_{TC} = \frac{I_P}{i_s} \therefore i_{s1} = \frac{I_P}{k_{TC}} = \frac{700}{160} = 4.375 \text{ A}$$

$$k_{TC} = \frac{I_P}{i_s} \therefore i_{s2} = \frac{I_P}{k_{TC}} = \frac{700}{240} = 2.917 \text{ A}$$

$$i_d = i_{s1} - i_{s2}$$

$$i_d = 4.375 - 2.917 = 1.458 \text{ A}$$



$$k_{TC} = \frac{I_{NP}}{i_{NS}} = \frac{250}{5} = 50$$

$$k_{TC} = \frac{I_{NP}}{I_{NS}} = \frac{300}{5} = 60$$

$$k_{TC} = \frac{I_p}{i_s} \therefore i_{s1} = \frac{I_p}{k_{TC}} = \frac{200}{50} = 4 \text{ A}$$

$$k_{TC} = \frac{I_p}{i_s} \therefore i_s = \frac{I_p}{k_{TC}} = \frac{200}{60} = 3.333 \text{ A}$$

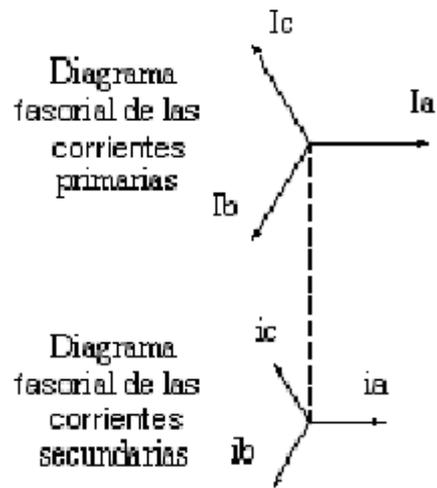
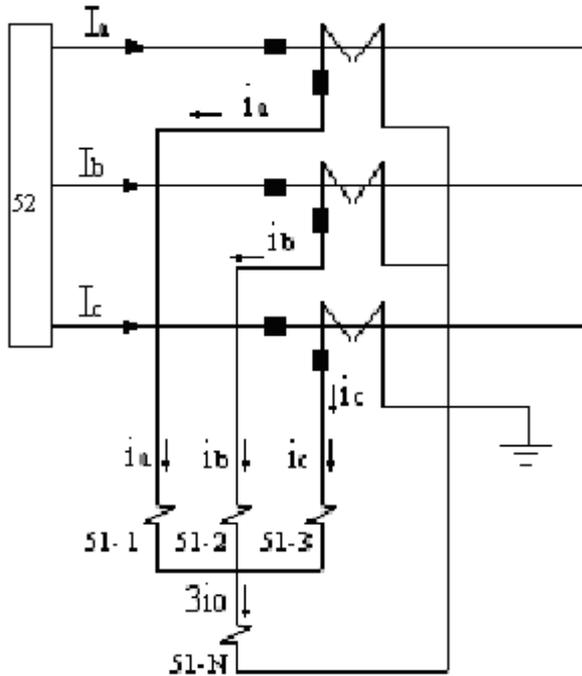
RELACIONES DE TRANSFORMACIÓN NORMALIZADAS PARA T. C.

RELACIONES DE TRANSFORMACIÓN		
5: 5	150: 5	1500: 5
10: 5	200: 5	1600: 5
15: 5	250: 5	2000: 5
20: 5	300: 5	3000: 5
25: 5	400: 5	4000: 5
30: 5	500: 5	5000: 5
40: 5	600: 5	6000: 5
50: 5	800: 5	8000: 5
75: 5	1000: 5	12000: 5
100: 5	1200: 5	

2.1.3 CONEXIONES DE TRANSFORMADORES DE CORRIENTE

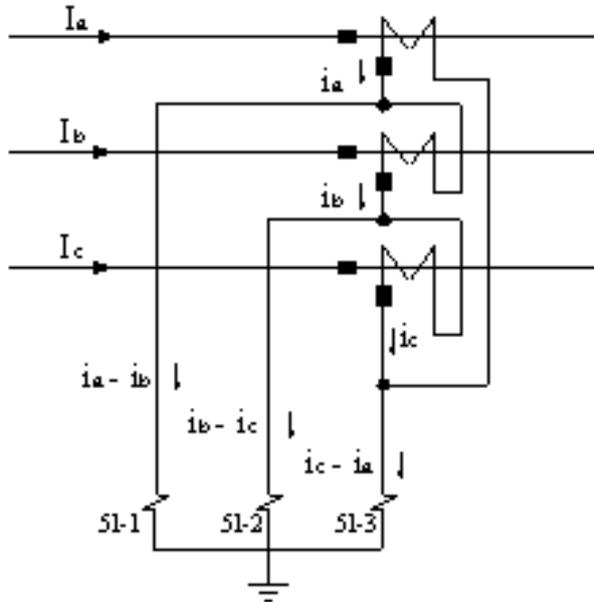
En los sistemas de potencia trifásicos se conectan los primarios de los TC en serie con el circuito de AT y los devanados secundarios se conectan generalmente en estrella (Y) para poder suministrar a los relevadores las corrientes de fase i_a , i_b , i_c y $3i_0$.

En algunos casos es necesario conectarles en delta (Δ) como en el caso de protecciones diferenciales de transformador, si el devanado del transformador de potencia esta en Δ los TC se conectan en Y y si el devanado del transformador está conectado en Y los TC se conectan en Δ con el fin de compensar el defasamiento angular.

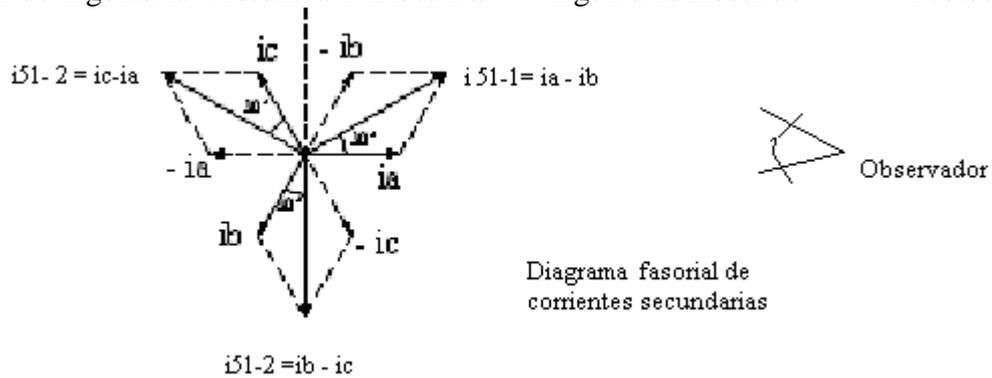


Conexión de TC en estrella

Conexión de TC en Delta 30° Adelantado



En una falla monofásica la i_0 es una sola en el secundario y circula dentro de la delta. Por regularidad se aterriza la conexión de los relevadores para estar al mismo potencial.



Determinación de las corrientes que circulan por los relevadores 51-1, 51-2 y 51-3

Los fasores de las corrientes secundarias, considerando una magnitud k y un sistema trifásico balanceado son:

$$i_a = k \angle 0^\circ = k [1 + j0]$$

$$i_b = k \angle 240^\circ = k \angle -120^\circ = k \left[-\frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2} \right]$$

$$i_c = k \angle 120^\circ = k \left[-\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2} \right]$$

La magnitud de la corriente que entra o circula por el relevador 51-1 es:

$$i_{51-1} = i_a - i_b = k \left[(1 + j0) - \left(-\frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2} \right) \right] = k \left(\frac{3}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2} \right)$$

$$i_a - i_b = k \sqrt{\left(\frac{3}{2}\right)^2 + \left(\frac{\sqrt{3}}{2}\right)^2} = k \sqrt{\frac{9}{4} + \frac{3}{4}} = k \sqrt{\frac{12}{4}} = k \sqrt{3}$$

$$\theta = \tan^{-1} \frac{\frac{\sqrt{3}}{2}}{\frac{3}{2}} = \tan^{-1} \frac{\sqrt{3}}{3} = \tan^{-1} \frac{\sqrt{3}\sqrt{3}}{3\sqrt{3}} = \tan^{-1} \frac{3}{3\sqrt{3}} = \tan^{-1} \frac{1}{\sqrt{3}}$$

$$\theta = 30^\circ$$

$$i_a - i_b = \sqrt{3} k \angle 30^\circ$$

La magnitud de la corriente que entra o circula por el relevador 51-2 es:

$$i_{51-2} = i_b - i_c$$

$$i_b - i_c = k \left[\left(-\frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2} \right) - \left(-\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2} \right) \right]$$

$$i_b - i_c = k (-j\sqrt{3})$$

$$i_b - i_c = k \sqrt{(0)^2 - (\sqrt{3})^2} = k \sqrt{3}$$

$$\theta = \operatorname{tg}^{-1} \frac{\sqrt{3}}{0} = \operatorname{tg}^{-1} \infty = -90^\circ$$

$$i_b - i_c = \sqrt{3} k \angle -90^\circ$$

La magnitud de la corriente que entra o circula por el relevador 51-3 es:

$$i_{51-3} = i_c - i_a$$

$$i_c - i_a = k \left[\left(-\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2} \right) - (1 + j0) \right]$$

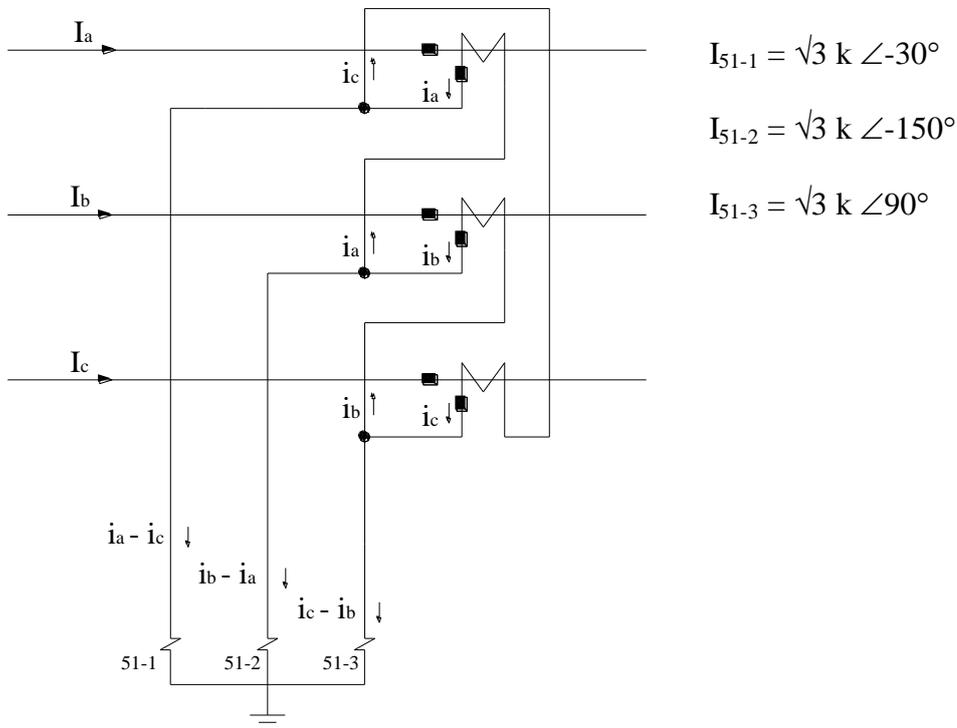
$$i_c - i_a = k \left(-\frac{3}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2} \right)$$

$$i_c - i_a = k \sqrt{\left(-\frac{3}{2} \right)^2 + \left(\frac{\sqrt{3}}{2} \right)^2} = k \sqrt{\frac{9}{4} + \frac{3}{4}} = k \sqrt{\frac{12}{4}} = \sqrt{3} k$$

$$\theta = \operatorname{tg}^{-1} \frac{\frac{\sqrt{3}}{2}}{-\frac{3}{2}} = \operatorname{tg}^{-1} -\frac{2\sqrt{3}}{6} = \operatorname{tg}^{-1} -\frac{1}{2}\sqrt{3} = \operatorname{tg}^{-1} -\frac{\sqrt{3}\sqrt{3}}{3\sqrt{3}} = \operatorname{tg}^{-1} -\frac{3}{3\sqrt{3}} = \operatorname{tg}^{-1} -\frac{1}{\sqrt{3}}$$

$$i_c - i_a = \sqrt{3} k \angle -30^\circ = \sqrt{3} k \angle 150^\circ$$

Conexión de TC en Delta 30° Atrasado



2.1.4 CLASIFICACION DE LOS TC

- Los TC por su utilización.

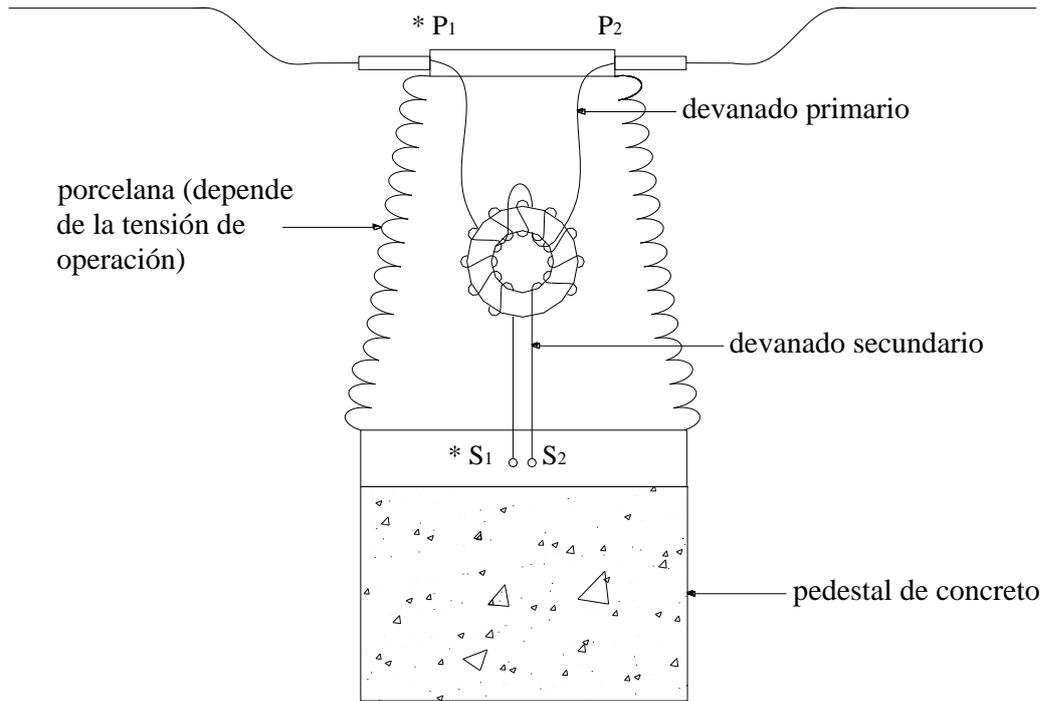
1.-T. C. PARA MEDICIÓN: Se saturan con 2 veces su corriente nominal.

2.-T. C. PARA PROTECCIÓN: Se saturan con 20 veces su corriente nominal.

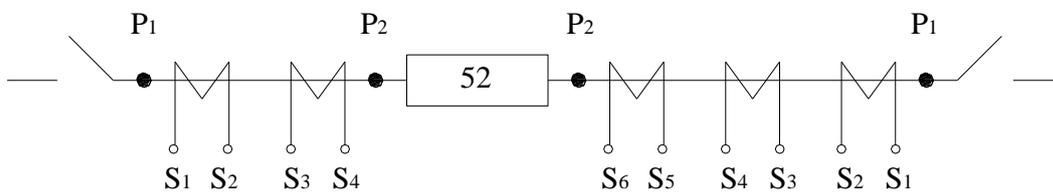
Cuando hay fallas la I_N se incrementa a varias veces por eso los TC de protección se saturan con 20 veces la I_N y pueda actuar la protección. Los TC de medición se deben saturara con baja corriente para que en caso de falla la corriente de cortocircuito no llegue a los instrumentos de medición. La característica de saturación depende del material del núcleo.

- Los TC por su construcción.

1.- TIPO DEVANADO: Es una unidad independiente. Su error es de 5% ó menor

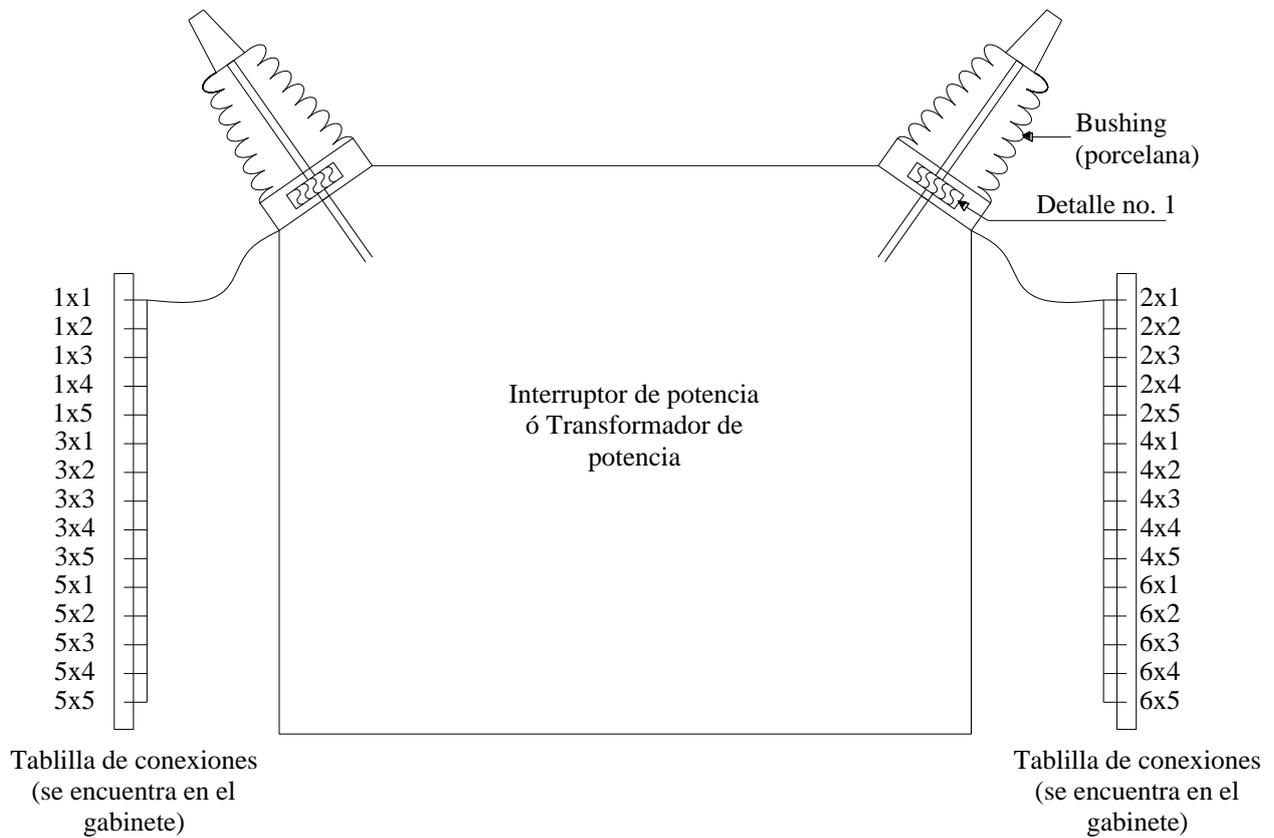


En un diagrama eléctrico se representa de la siguiente forma::



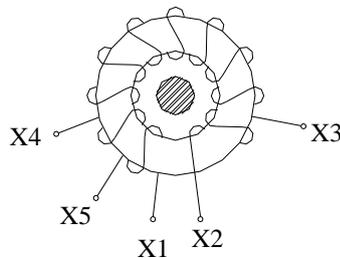
la polaridad va alejada del interruptor

2.- TIPO BOQUILLA (BUSHING): En este caso los devanados primarios de estos T. C son las mismas terminales del transformador de potencia o del interruptor de potencia. Se acepta un error de hasta 10% en este tipo de T. C.



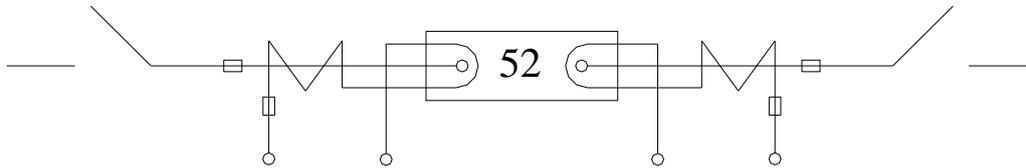
el primario es la terminal de AT que equivale a una vuelta que atraviesa el núcleo

Se está considerando un TC con relación múltiple (5 relaciones).



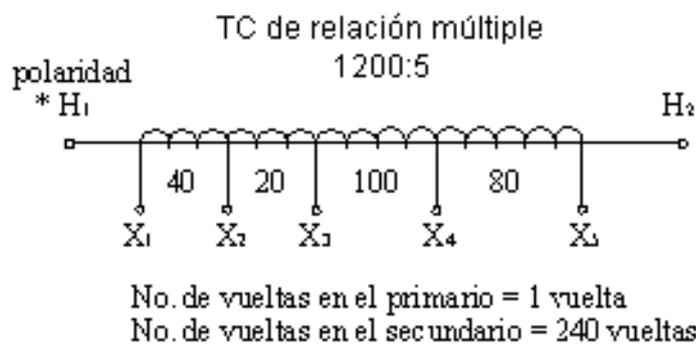
Núcleo del TC.
Detalle no. 1

En un diagrama eléctrico se representa de la siguiente forma:



la polaridad va alejada del interruptor

Ejemplo de análisis de un TC de relación múltiple:



En el devanado de Baja Tensión, la terminal de índice menor será el de polaridad.

Relación de vueltas: $\frac{N_p}{N_s} = \frac{1}{240}$

Se sabe que:

Para un TP:

$$\frac{V_p}{N_p} = \frac{V_s}{N_s}$$

$$\frac{V_p}{V_s} = \frac{N_p}{N_s}$$

Para un TC:

$$N_p I_p = N_s I_s$$

$$\frac{I_p}{I_s} = \frac{N_s}{N_p}$$

Por lo tanto, para el T. C. de relación múltiple mostrado en la figura anterior y considerando el devanado secundario completo (terminales X1 y X5):

$$K_{TC} = \frac{I_p}{I_s} = \frac{N_s}{N_p} = \frac{240}{1} = 1200 : 5 \text{ A}$$

Ahora, si se toman las terminales X_4 y X_5 se tiene:

$$I_p = i_s k_{TC} = (5) (80) = 400 \text{ A}$$

$$\therefore k_{TC} (X_4 X_5) = 400:5 \text{ A}$$

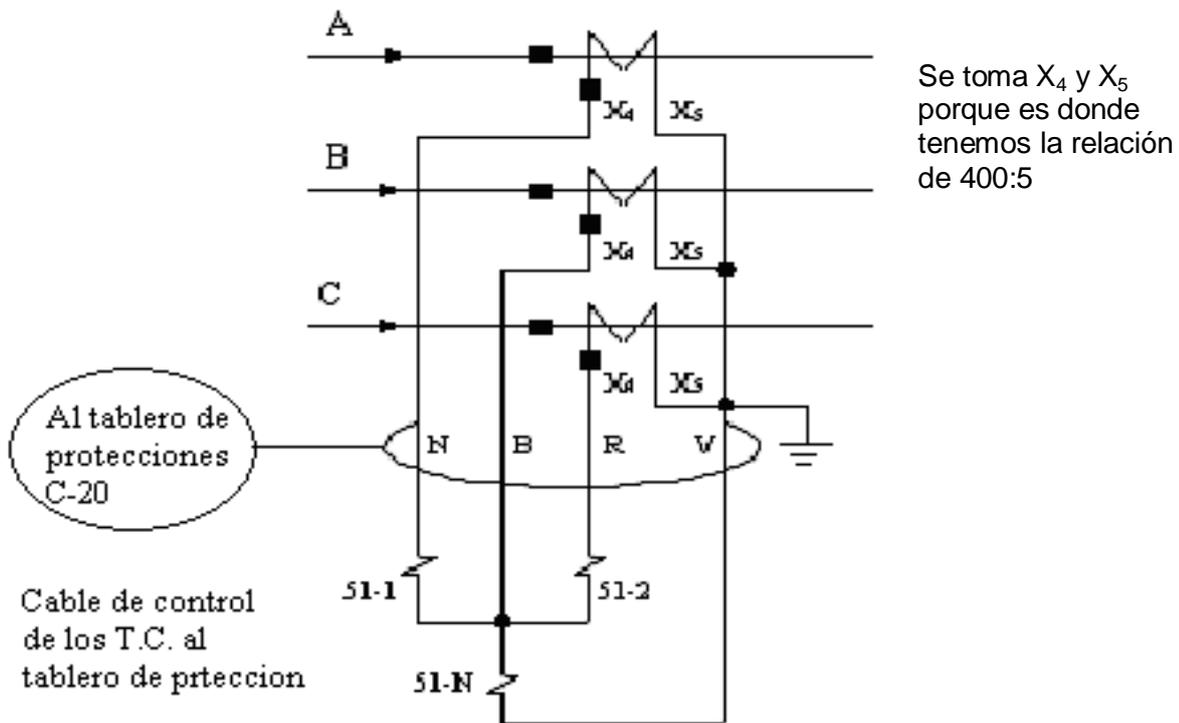
Ahora, si se toman las terminales X_3 y X_4 se tiene:

$$I_p = i_s k_{TC} = (5) (100) = 500 \text{ A}$$

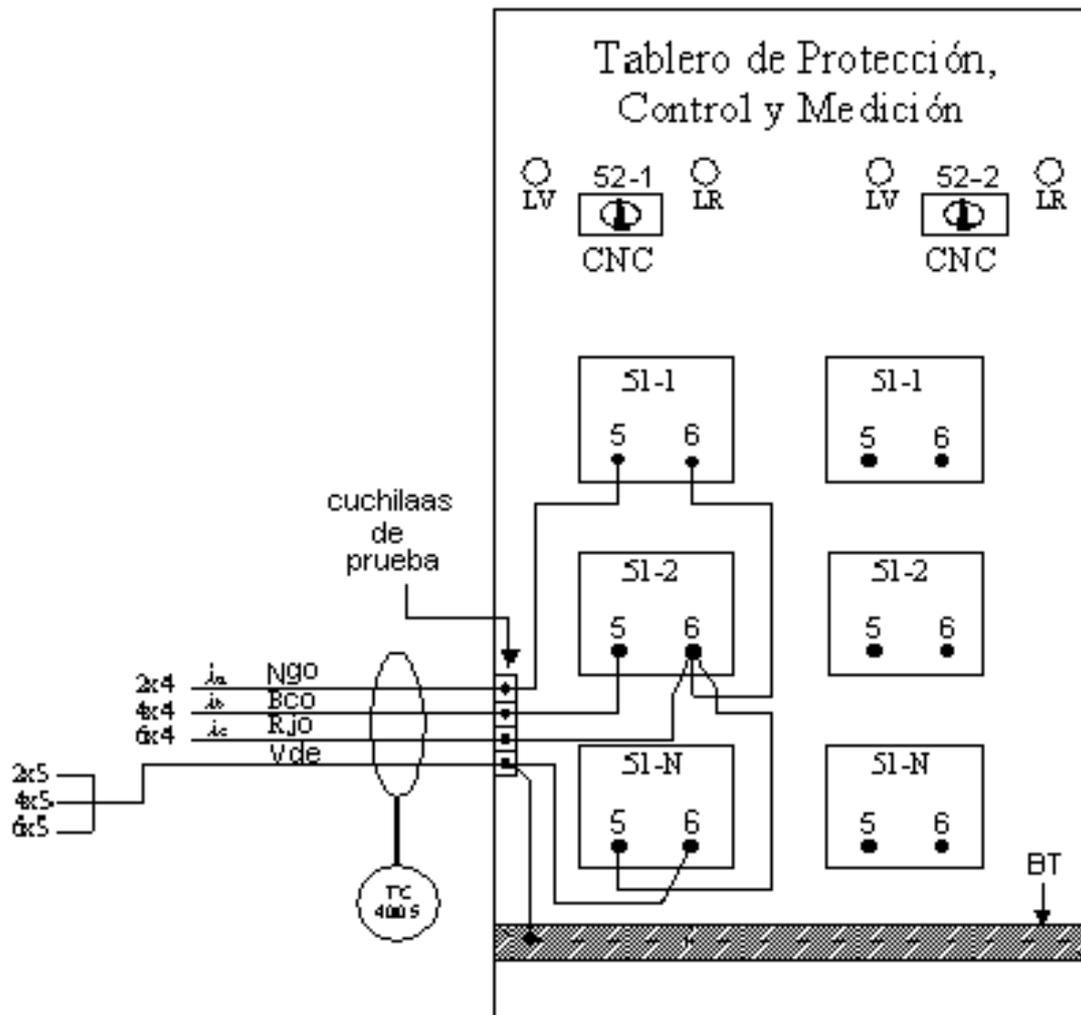
$$\therefore k_{TC} (X_3 X_4) = 500:5 \text{ A}$$

Ejemplo de conexión en estrella para TC TIPO BUSHING usando la relación 400:5

El diagrama sería:

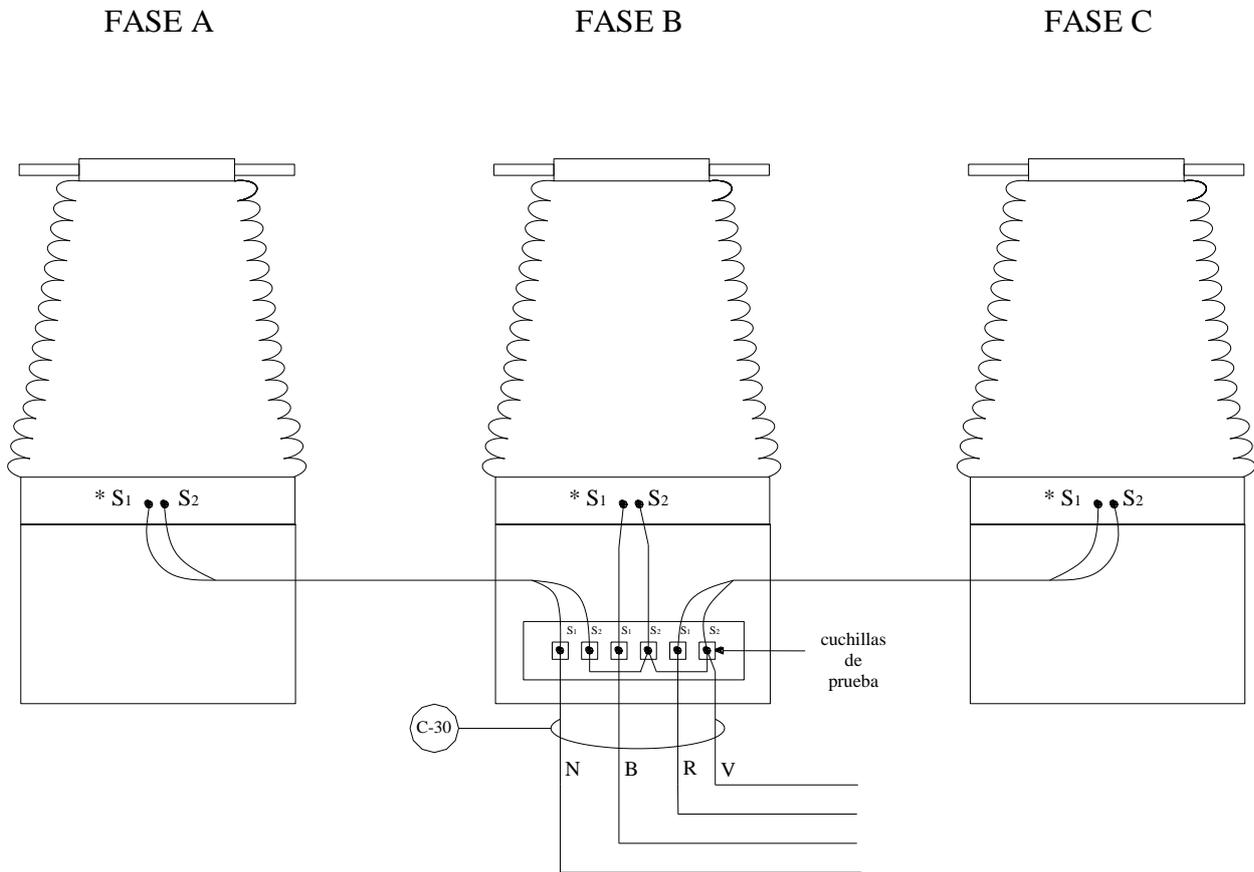


La conexión en el tablero sería:



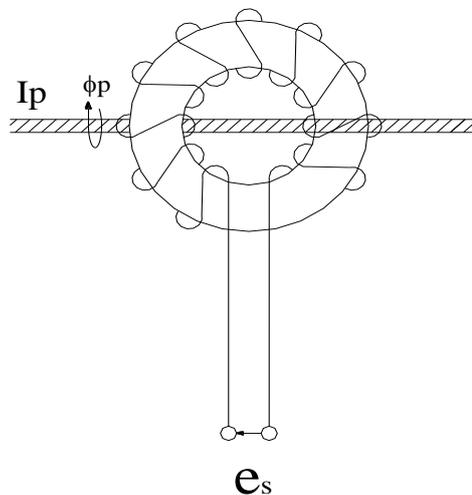
BT = Barra de conexión a tierra (solera de cobre)

Conexión de los secundarios de TC tipo devanado en estrella:



NOTA:

Los devanados secundarios de los TC nunca deben permanecer abiertos, los secundarios que no se utilicen deben dejarse en cortocircuito.



Si se deja abierto el secundario, solo actúa el flujo primario (ϕ_p), no hay un flujo secundario que se oponga o contrarreste al flujo primario y por lo tanto el voltaje inducido en el devanado secundario será alto y peligroso.

2.1.5 DESIGNACION Y CLASE DE PRECISIÓN DEL TC

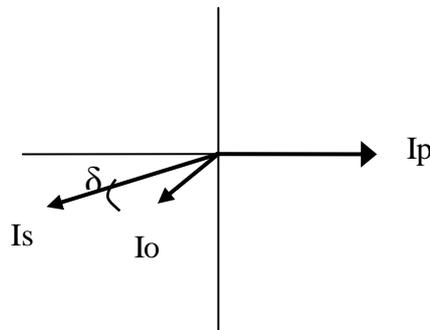
Los TC's operan bajo el principio de inducción electromagnética y dependiendo de su diseño: tipo dona, barra o columna, tienen distintos tipos de núcleos con diferentes valores de flujo disperso, de manera que existe un pequeño error en la relación por mínimas variaciones de diseño en el primario de espiras, o bien por el flujo disperso, que se manifiesta en la corriente de vacío, es decir un TC tiene básicamente dos tipos de errores:

- Error de relación (ϵ_r)
- Error de ángulo (ϵ_A)

Estos dos tipos de errores determinan la clase de precisión.

El error de relación, se debe básicamente a pequeñas variaciones en el número de espiras y al flujo disperso.

El error de ángulo se debe básicamente al desplazamiento que existe en las corrientes primaria y secundaria, debido a la corriente de vacío o excitación. En forma vectorial se tiene:



I_o = Corriente de vacío o excitación

δ = Angulo de desfase entre la corriente I_o inicio del secundario y la corriente real en el secundario

$$\epsilon = \epsilon_A \cdot \epsilon_r$$

Este ϵ se expresa como un porcentaje o en por unidad con respecto al valor exacto y determina las clases de precisión dadas en la siguiente tabla

CLASE DE PRECISION	
PARA MEDICION PRECISA	0.3
PARA MEDICION ESTANDAR	0.6
PARA PROTECCION	1.2

La designación de los TC´s sirve para indicar su aplicación y es una letra que puede ser:

- B Si se utiliza para medición
- C Si se utiliza para protección
- T Si se utiliza para protección con valores controlados

Los TC para protección se clasifican mediante dos símbolos: una letra y el voltaje de clase, los cuales definen las características del TC. Las letras de designación pueden ser "C" ó "T" :

La letra "C" indica que la relación de transformación puede ser calculada.
La letra "T" indica que la relación debe ser determinada mediante pruebas.

La clasificación "C" cubre los TC tipo dona o boquilla con el devanado secundario uniformemente distribuido o cualquier otro transformador en el cual el flujo de dispersión en el núcleo tiene un efecto despreciable sobre el error de relación, dentro de los límites de corriente y carga establecidos por la Norma.

Los clasificados "T" cubren la mayoría de los "TC" tipo devanado y cualquier otro transformador en los cuales el flujo de dispersión afecta la relación de transformación en forma apreciable.

Voltaje de clase

El voltaje en las terminales del secundario o voltaje de clase es el voltaje que el transformador entregara a una carga normalizada con 20 veces la corriente nominal secundaria sin exceder el 10% de error de relación.

CLASIFICACION DE TC DE PROTECCION		
Clasificación de la precisión	Voltaje secundario (V)	Carga normalizada (Ω)
C10 T10	10	B 0.1
C20 T20	20	B 0.2
C50 T50	50	B 0.5
C100 T100	100	B 1.0
C200 T200	200	B 2.0
C400 T400	400	B 4.0
	800	B 8.0

C800	T800		
------	------	--	--

La carga normalizada es la carga máxima sin rebasar el % de error admisible.
Características del Burden (carga)

Designación	Carga Nominal VA	Características de cargas nominales			
		FP	R (Ω)	L (Ω)	Z (Ω)
B 0.1	2.5	0.9	0.09	0.116	0.1
B 0.2	5	0.9	0.18	0.232	0.2
B 0.5	12.5	0.9	0.45	0.580	0.5
B 1.0	25	0.5	0.5	2.3	1.0
B 2.0	50	0.5	1.0	4.6	2.0
B 4.0	100	0.5	2.0	9.2	4.0
B8.0	200	0.5	4.2	18.4	8.0

$$Z = R + jX_L \quad X_L = 2 \pi f L$$

Ejemplo:

Teniendo un TC C200

Si la tensión secundaria del TC es: $V_{\text{sec. del TC}} = Z i$

Si $Z = 2.0 \Omega$

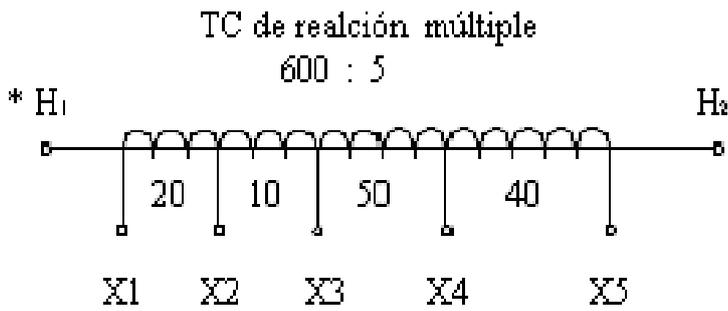
$i = 20 i_s = 20 \times 5$ (20 veces la corriente nominal de 5 amp.)

$$V_{\text{SEC}} = Z i = 2.0 \times 20 \times 5 = 200 \text{ V}$$

NOTA: El TC tipo boquilla es multirrelaciones.

El TC tipo devanado tiene generalmente una sola relación.

Ejercicio: Se tiene un TC multirrelación 600:5, determinar la relación que se está utilizando cuando se conectan las terminales secundarias X1 X3 y en otro caso X4 X5.



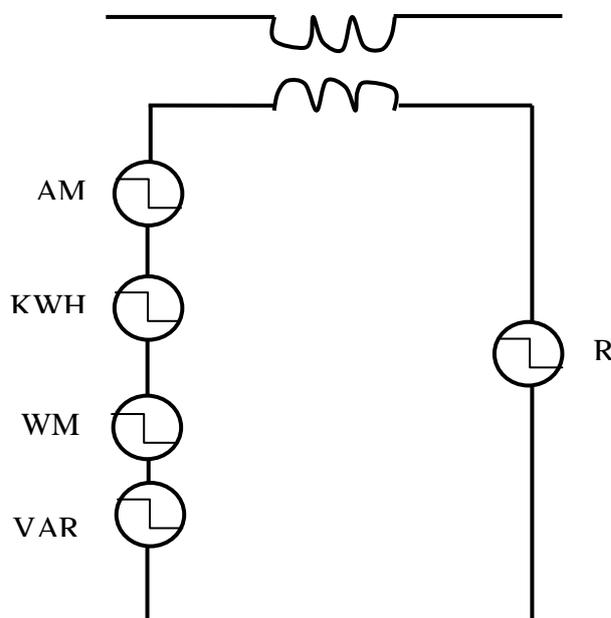
$$K_{TC_{X1-X3}} = \frac{30}{1} = 150 : 5$$

$$K_{TC_{X4-X5}} = \frac{40}{1} = 200 : 5$$

2.1.6 CARGA O BURDEN EN LOS TC'S

Los TC's alimentan instrumentos que requieren señal de corriente para su operación en baja tensión, ya sea con 5 ó 1 ampers. Estos instrumentos pueden ser de medición, por ejemplo: los ampermetros (AM), los wattmetros (WM), varmetros (VAR) o de protección como son los relevadores que llevan señal de corriente, por ejemplo: el de sobre corriente (51), de distancia (21), todos estos instrumentos tienen un cierto consumo de potencia, un valor pequeño, entonces se miden en volts-ampers (VA), y que en el caso de los instrumentos analógicos o relevadores electromecánicos pueden ser del orden de 1 a 15 VA, en el caso de los instrumentos que tienen consumo muy pequeños, son menores de 1VA.

En todos los casos, estos instrumentos son alimentados por cables de control, que en el caso más simple son conductores eléctricos, estos conductores tienen perdidas I^2R que se convierten en una carga para el TC. Es decir las cargas que debe alimentar un TC que se conocen como burden son las potencias que demandan los instrumentos y las perdidas I^2R de los cables de control.



R = Resistencia total de cable de control (Ω)

AM = Ampermetro

KMH = Kilowattmetro-hora

WM = Wattmetro

VAR = Varmetro

Impedancia total de la carga o Burden

$$Z_T = \sum R + \sum X$$

Potencia Activa = $VA \times F.P. = VA \times \cos \phi$

Watts = $I^2 R$

Potencia Reactiva = $VA \times \sqrt{1 - f.p^2} = XI^2$

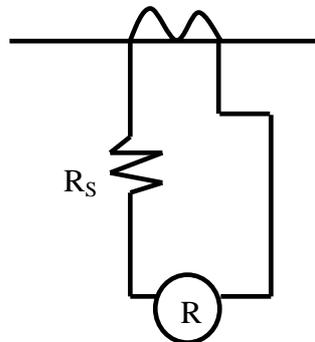
Reactancia, $X = 2\pi fL$; L = Inductancia en Henry

$$VA_{TOTALES} = \sqrt{(WATTS\ TOTALES)^2 + (VARSTOTALES)^2}$$

Factor de Potencia de las cargas combinadas = $\frac{Watts\ totales}{VA\ totales}$

Ejemplo:

Para el circuito mostrado en la figura:



Calcular el Burden de un TC, que tiene una RTC de 150/5 y una resistencia en su devanado secundario de 0.15 Ω . A las terminales del secundario se conecta un relevador de sobre corriente como carga, con un consumo de potencia de 5 VA, se alimenta a través de un cable de control de

Escuela Superior de Ingeniería Mecánica Y Eléctrica -- Ingeniería Eléctrica --- Protecciones uno
cobre con 10 mm^2 de sección transversal y 50 m de longitud. La resistividad del cable es de $0.0175 \text{ } \Omega\text{-mm}^2/\text{m}$.

Solución:

La resistencia del devanado secundario del TC (R_s) se convierte también en una carga para el mismo y su consumo se refiere a valor nominal de la corriente en el secundario, entonces:

$$V_{As} = R_s I_s^2 = (0.15)(5)^2 = 3.75 \text{ VA}$$

El cable de control consume también una potencia que representa su carga, su valor es:

$$V_{Ac} = 2R_c \times I_s^2 = 2 \frac{\rho l}{A} \times I_s^2$$
$$V_{Ac} = \left[\frac{(2)(0.0175)(50)}{10} \right] [5]^2 = 4.4 \text{ VA}$$

Con la carga del relevador que es de 5 VA, la carga total que alimenta el TC es:

$$V_{AT} = V_{As} + V_{Ac} + V_{Arelevador} = 3.75 + 4.4 + 5 = 13.15 \text{ VA}$$

Teniendo un TC DESIGNACION B, B -1.0, CON UNA CARGA NOMINA 50

Ejercicios:

2.2 TRANSFORMADORES DE POTENCIAL (TP)

Así como es necesario el uso de TC, también es necesario emplear TP para ciertos relevadores que operan con magnitudes de voltaje. El devanado primario del TP se conecta a las terminales del circuito donde el voltaje va a ser medido y el devanado secundario suministra un voltaje proporcional al voltaje primario en función de su relación de transformación con un ángulo de fase entre ellos cercano a cero.

La Norma Nacional define al TP como el transformador diseñado para suministrar la tensión adecuada a los instrumentos de medición y/o aparatos de protección, en el cual la tensión secundaria en las condiciones normales de uso es proporcional a la tensión primaria desfasada respecto a ella un ángulo cercano a cero.

Existen dos tipos de transformadores de potencial

Los de tipo Inductivo, operan como los TC's bajo el principio de inducción electromagnética.

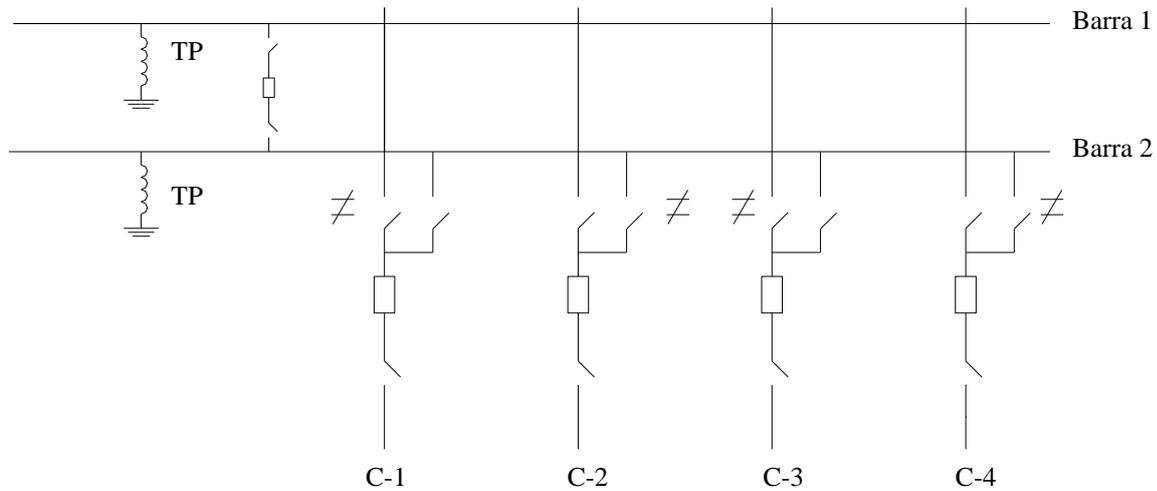
Los de tipo Capacitivo, se conocen también como dispositivos de potencial y que operan como divisores de tensión tipo capacitivo.

Relación de transformación: Está en función del voltaje nominal primario y el voltaje nominal secundario, este último es normalmente de $120/\sqrt{3}$ V para protección y $200/\sqrt{3}$ V para medición.

Relación de transformación:

$$K_{TP} = \frac{V_{NP}}{V_{NS}} \quad \text{ó} \quad a = \frac{V_{NP}}{V_{NS}}$$

En el arreglo de doble barra con amarre utilizado para 230 kV ó 85 kV, normalmente se utiliza un juego de TP por barra.



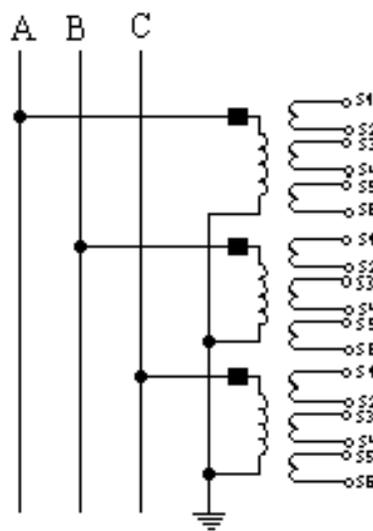
Aquí se muestra este tipo de arreglo, donde el circuito no. 1 está conectado a la barra 1, el circuito no. 2 está a la barra 2, el circuito no. 3 está a la barra 1 y el circuito no. 4 está a la barra 2, esto en condiciones normales de operación.

En 400 kV se usa generalmente un juego de TP por circuito.

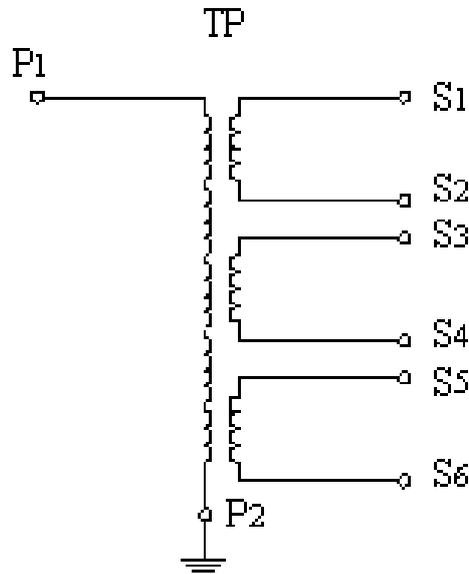
Conexión en Estrella de T. P.

El devanado primario se conecta en estrella para poder tener voltaje de fase a neutro y de esta manera en el secundario se puedan reflejar los voltajes de secuencia cero.

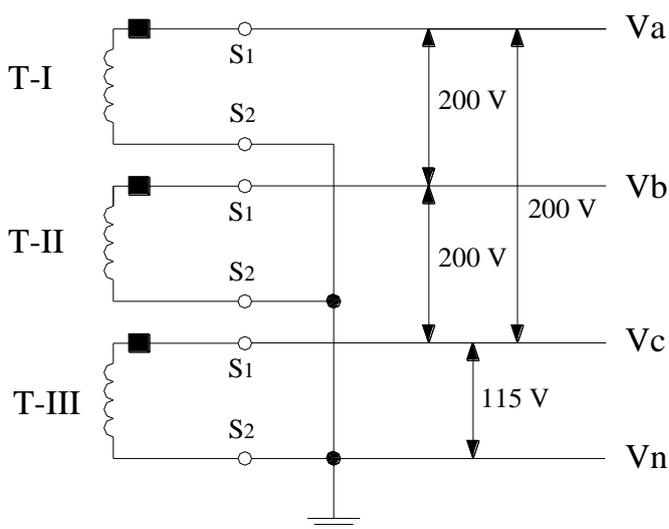
Conexión de TP en un sistema trifásico



Cada TP tiene 3 devanados secundarios:



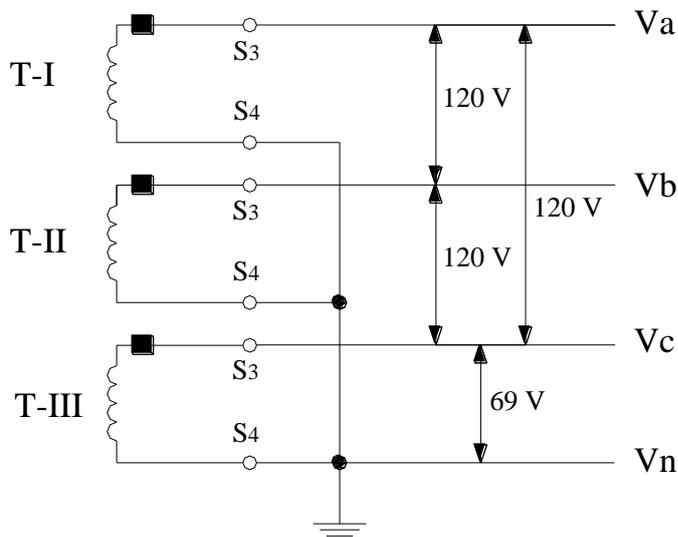
Conexión de los devanados secundarios:



Primer secundario:

Secundario en estrella para polarizar las bobinas de potencial de los instrumentos de medición.

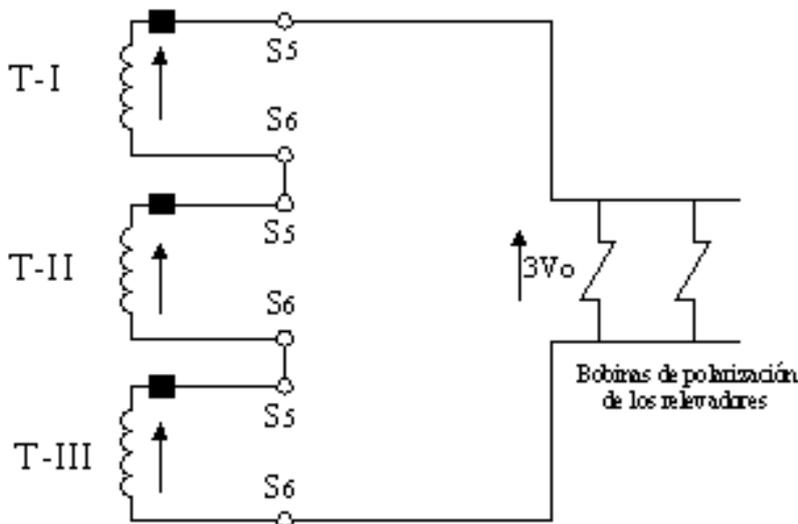
$$V_s = 200 / \sqrt{3} \text{ Volts}$$



Segundo secundario:

Secundario en estrella para polarizar las bobinas de potencial de los relevadores de protección.

$$V_s = 120 / \sqrt{3} \text{ Volts}$$



Tercer secundario:

Conexión en Delta quebrada o Delta rota.

Secundario en delta quebrada para polarizar las bobinas de potencial de los relevadores que detectan fallas a tierra con $3V_o$.

Clases de Precisión

Las clases de precisión normalizadas para TP son: 0.3, 0.6 y 1.2 La designación corresponde al máximo error admisible expresado en % que el transformador puede introducir en la medición de potencial operando con su tensión nominal primaria y a su frecuencia nominal.

CLASE DE PRECISION	APLICACION
MENOR QUE 0.3	<ul style="list-style-type: none"> ✎ TP Patrón ✎ Mediciones en el Laboratorio ✎ Mediciones especiales
0.3	<ul style="list-style-type: none"> ✎ Medición de energía eléctrica para facturación al consumidor
0.6 ó 1.2	<ul style="list-style-type: none"> ✎ Medición de energía eléctrica sin facturación ✎ Alimentación de instrumentos de medición ✎ Alimentación de relevadores de protección

La clase de precisión especificada debe asociarse con una o varias cargas nominales de precisión.

Cargas nominales de precisión para TP

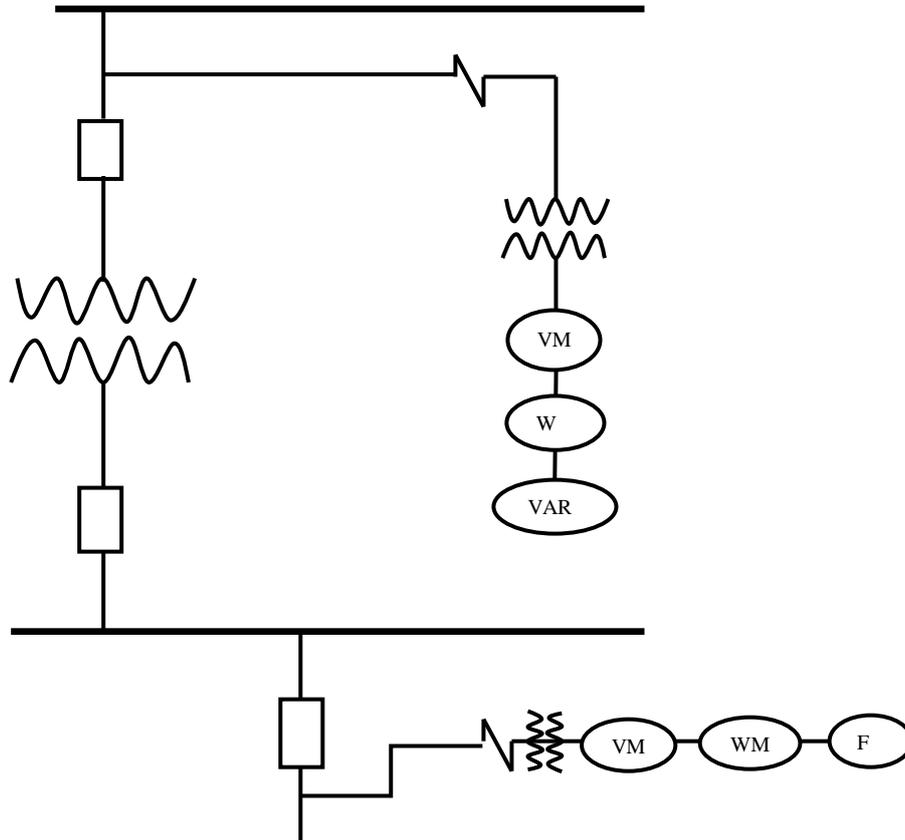
Carga nominal de precisión VA	Designación equivalente BURDEN	FP	Características de la carga					
			Secundario 115 V			Secundario 69 V		
			R (Ω)	X (Ω)	I (A)	R (Ω)	X (Ω)	I (A)
12.5	W	0.1	115.2	1146.20	0.104	38.4	38.2	0.18
2.5	X	0.7	403.2	411.26	0.208	134.4	137.08	0.36
75	Y	0.85	163.2	100.99	0.425	54.4	13.66	1.082
200	Z	0.85	61.2	37.87	1.67	20.4	12.62	2.856
400	ZZ	0.85	30.6	18.94	3.33	10.2	6.31	5.362

NOTA: En un TP el dato de placa puede decir: Precisión: 0.6Y, 1.2Z

Ejemplo:

Si se tiene por ejemplo un TP con una precisión 0.6Y, 1.2Z significa que para una carga "Y" tendrá un error de relación y ángulo no mayor de 0.6 %, y si la carga es "Z" su error será de 1.2 %.

Ejemplo:



DATOS DE LA CARGA
 VM = 3 VA, $\cos \phi = 1.0$
 FRECUENCIMETRO = 3 VA, $\cos \phi = 0.1$
 WM = 5 VA, $\cos \phi = 0.6$
 VAR = 5 VA, $\cos \phi = 0.3$

SOLUCION:

Para el lado de 230 kV se tiene:
$$RTP = \frac{230 \text{ kV}}{120 \text{ V}} = \frac{230000 / \sqrt{3}}{120 / \sqrt{3}} = 1916.66$$

Para determinar la carga o Burden, todas las cargas se deben expresar en sus valores equivalentes de Watts y VAR's.

$$\begin{aligned} \text{Watts} &= VA \cos \phi & \therefore \cos \phi &= \text{F.P. de cada instrumento} \\ \text{VAR's} &= VA \sin \phi \end{aligned}$$

Vóltmetro
$$\begin{aligned} W &= (3 \text{ VA})(1.0) = 3 \text{ Watts} \\ \text{VAR'S} &= (3 \text{ VA})(0) = 0 \text{ VAR's} \end{aligned}$$

Wattmetro
$$\begin{aligned} W &= (5 \text{ VA})(0.6) = 3 \text{ Watts} \\ \text{VAR'S} &= (5 \text{ VA})(\text{sen } 53.13) = 4 \text{ VAR's} \end{aligned}$$

Vámetro
$$W = (5 VA)(0.3) = 1.5 \text{ Watts}$$
$$VAR'S = (5 VA)(\text{sen } 72.54) = 4.76 \text{ VAR's}$$

Frecuencímetro
$$W = (3 VA)(0.1) = 0.3 \text{ Watts}$$
$$VAR'S = (3 VA)(\text{sen } 84) = 2.98 \text{ VAR's}$$

$$\begin{aligned} \cos \emptyset = 1 \quad \therefore \emptyset &= \cos^{-1} 1 = 0^\circ \quad \therefore \text{sen } 0^\circ = 0 \\ \emptyset &= \cos^{-1} 0.6 = 53.13^\circ \\ \emptyset &= \cos^{-1} 0.3 = 72.54^\circ \\ \emptyset &= \cos^{-1} 0.1 = 84^\circ \end{aligned}$$

Los Watts y VAR'S totales en el lado de 230 kV son:

$$\begin{aligned} W_T &= 3 + 3 + 1.5 = 7.5 \text{ Watts} \\ VAR'S_T &= 0 + 4 + 4.76 = 8.76 \text{ Var's} \end{aligned}$$

$$VA_T = \sqrt{(W_T)^2 + (VAR_T)^2} = \sqrt{(7.5)^2 + (8.76)^2} = 11.53 \text{ VA}$$

El factor de potencia de la carga es:

$$F.P. = \frac{W_T}{VA_T} = \frac{7.5}{11.53} = 0.65$$

Con estos valores, se entra a la tabla de datos de Burden normalizados y se deben cumplir los dos factores:

$$VA_T \text{ y } \cos \emptyset \text{ descarga}$$

Por lo tanto, la designación es X, clase de precisión 0.6

Para el lado de 69 kV:

$$W_T = 3 + 3 + 0.3 = 6.3 \text{ Watts}$$

$$VAR_T = 0 + 4 + 2.98 = 6.98 \text{ VAR's}$$

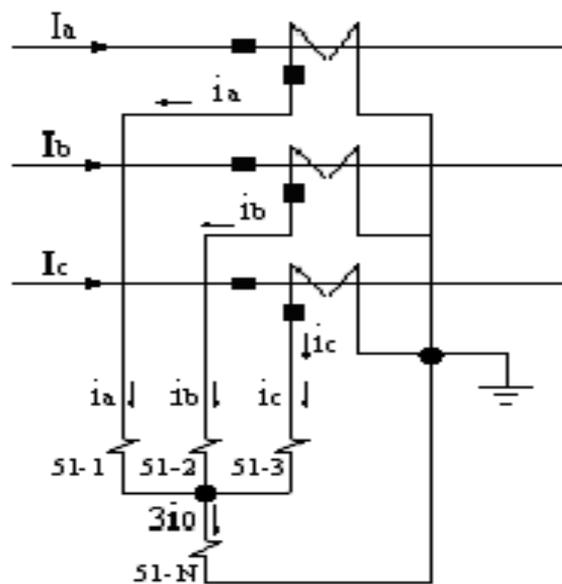
$$VA_T = \sqrt{(6.3)^2 + (6.98)^2} = 9.4 \text{ VA}$$

$$F.P. = \frac{W_T}{VA_T} = \frac{6.3}{9.4} = 0.67$$

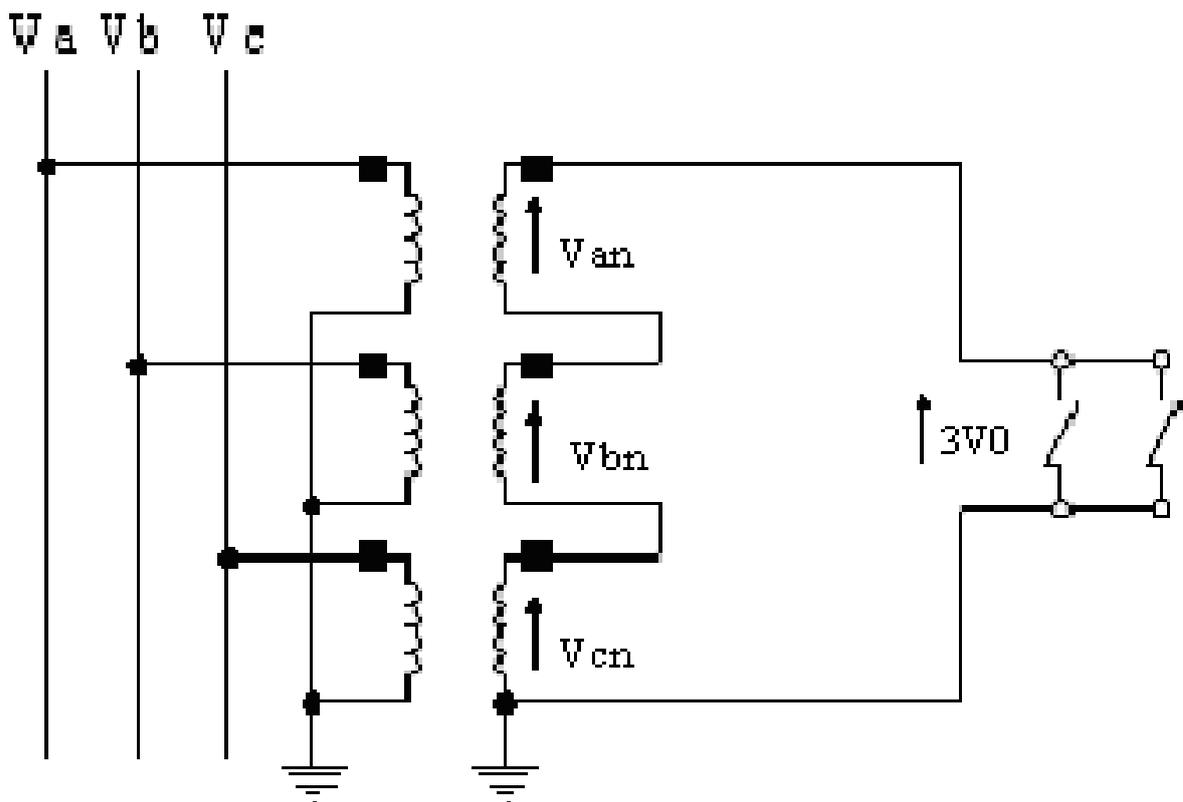
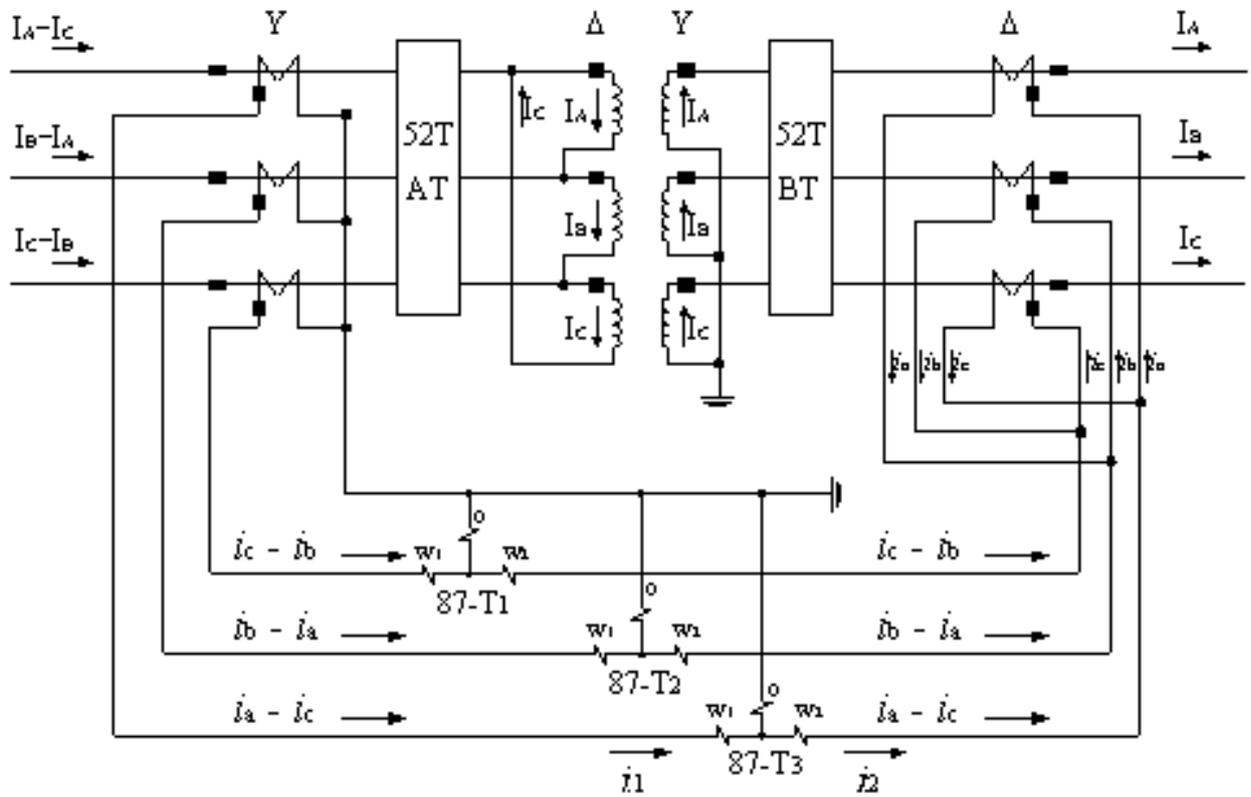
De acuerdo a la tabla se obtiene la designación y clase del TP. Designación es X, clase de precisión 0.6

Ejercicios

2.3 CONEXIÓN DE LOS TRANSFORMADORES DE INSTRUMENTO



Conexión de TC en estrella



3 INTRIDUCCION A LOS RELEVADORES

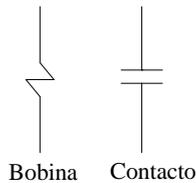
Que es un relevador; un mecanismo eléctrico que esta diseñado para interpretar condiciones específicas, se encuentra para responder a la operación de cierre a causa de un cambio abrupto o hechos similares asociados con circuitos de control.

Los relevadores de protección son el cerebro para sensor disturbios, y los interruptores de potencia son el musculo que puede aislar la falla.

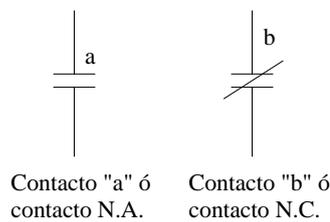
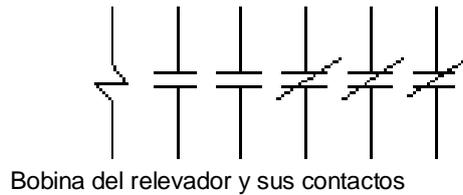
Componentes de un relevador

En su forma más sencilla un relevador se puede representar por una bobina y un contacto; la bobina recibe la señal de corriente o de potencial del sistema de potencia y el contacto en caso de falla, enviara la señal de disparo al interruptor correspondiente.

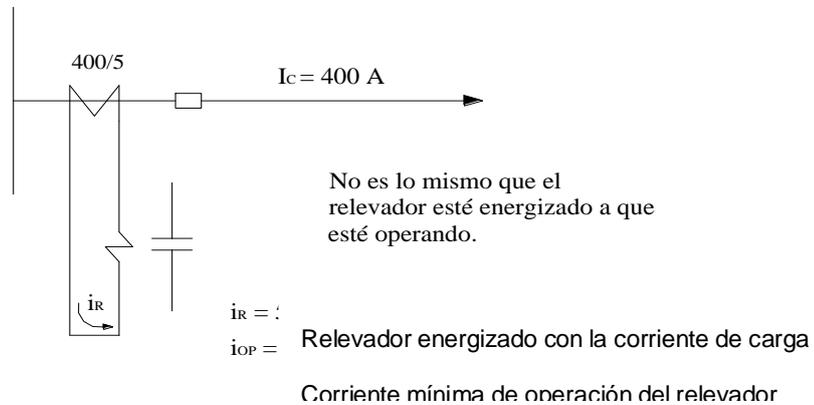
RELEVADOR



Un relevador puede tener uno o varios contactos "a" y uno o varios contactos "b".



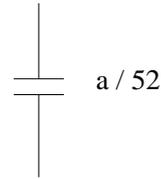
Se dice que un relevador opera cuando cierra sus contactos "a" y/ o abre sus contactos "b".



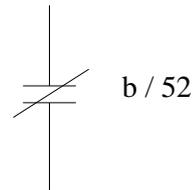
Contactos auxiliares "a" y "b" de un interruptor de potencia.

Son contactos acoplados al mecanismo de cierre y apertura del interruptor de potencia y se utilizan en los circuitos de control y señalización.

Contactos auxiliares "a".- Se encuentran en la misma posición que los contactos principales del interruptor, es decir, si el interruptor está cerrado los contactos auxiliares "a" se encuentran cerrados, y si el interruptor está abierto los contactos auxiliares "a" están abiertos.



Contactos auxiliares "b".- Se encuentran en la posición contraria, es decir, si el interruptor está cerrado los contactos auxiliares "b" están abiertos, si el interruptor está abierto los contactos auxiliares "b" están cerrados.



Los relevadores de protección para Sistemas Eléctricos de Potencia están formados por una o más unidades de decisión o detectores de falla, además de los circuitos lógicos y unidades auxiliares que necesitan. Debido a que varios de estos detectores de fallas se usan en diferentes relevadores, reciben el nombre de unidades básicas, los cuales se clasifican en tres categorías:

1. Unidades electromecánicas
2. Redes de secuencia
3. Unidades de estado sólido.

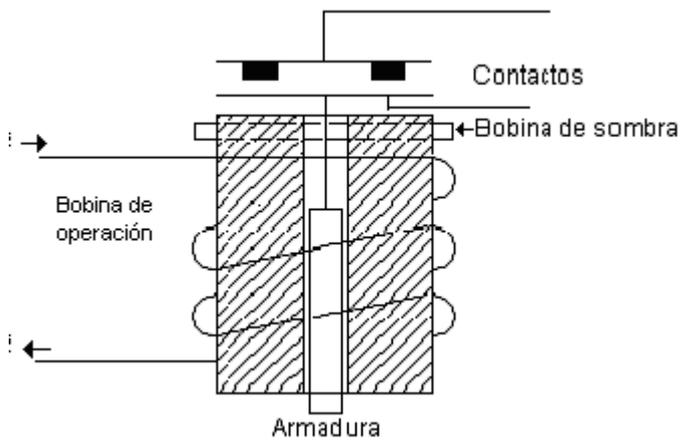
3.1.- UNIDADES ELECTROMECAÑICAS

Se dividen en dos grupos:

a).-Unidades de atracción electromagnética.

1.- Unidad tipo solenoide

Esta unidad se forma de un material magnético en forma cilíndrica y en el centro tiene una abertura donde está el núcleo, es un vástago que lo detiene un resorte por abajo y en la parte de arriba están los contactos. Este vástago se puede ajustar para seleccionar la corriente de operación.

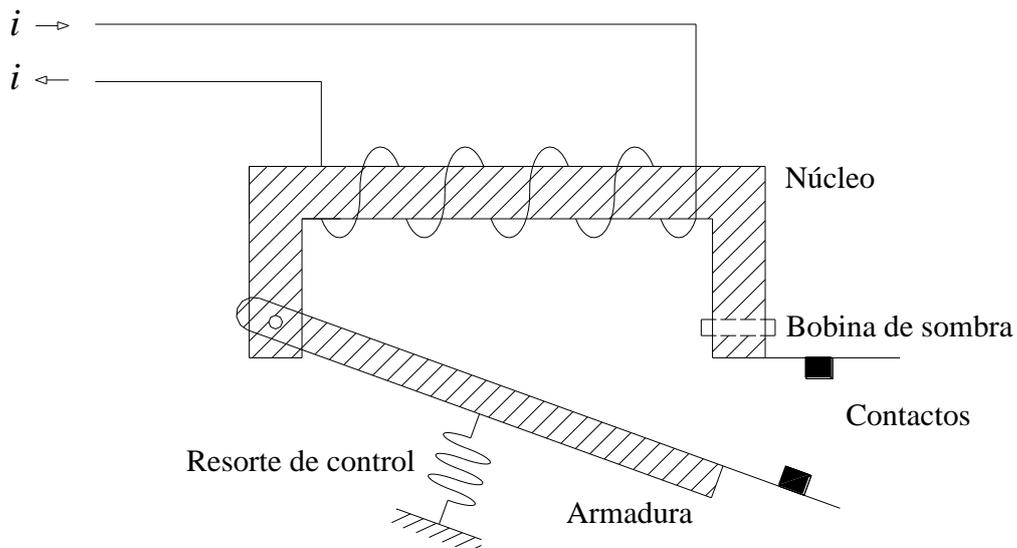


Cuando se rebase la corriente mínima de operación, la fuerza de atracción será suficiente para que la armadura suba y cierre los contactos.

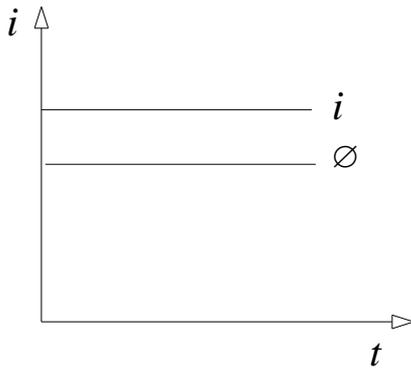
Tiempo de operación: instantáneo (de 3 a 6 ciclos).

2.- Unidad tipo atracción de armadura

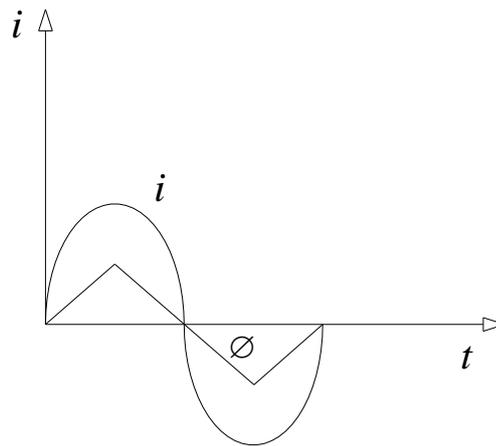
Funciona de la siguiente manera, si la i produce un flujo tal que se produzca un polo norte (N) y un polo (S) se atraerán los contactos venciendo al resorte.



Estos se alimentan con corriente directa (CD) porque el flujo y por lo tanto la fuerza de atracción son constantes. En corriente alterna (CA) hay vibración cuando el flujo pasa por cero, para evitar esto se usan los anillos de sombra (se usan solo cuando se alimentan con CA)



Funcionamiento en CD



Funcionamiento en CA

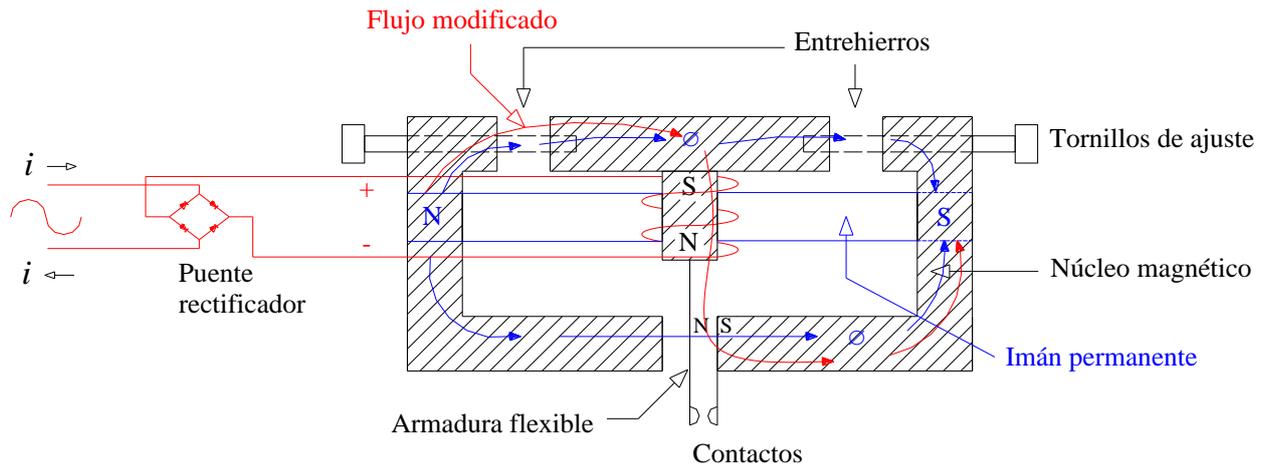
La bobina de sombra (que está en cortocircuito) produce también un flujo el cual está defasado con respecto al principal. Esta bobina hace que cuando el \emptyset principal pase por cero el flujo "auxiliar" evita la vibración.

- Si se quiere que opere con potencial la bobina será con cable fino y muchas vueltas para que se puede generar el flujo.
- Si se quiere que opere con corriente (a través de TC) la bobina será con cable grueso y pocas vueltas.

3.- Unidad Polar

Esta unidad opera con CD aplicada a una bobina devanada alrededor de una armadura que se encuentra en el centro de una estructura magnética. Un imán permanente que atraviesa la estructura polariza los polos de la armadura. Dos entrehierros localizados en la parte posterior de la estructura magnética se puentean con 2 tornillos magnéticos ajustables para modificar el flujo magnético y calibrar el extremo flexible de la armadura.

Estas unidades son muy sensibles, de alta velocidad y bajo consumo de energía.



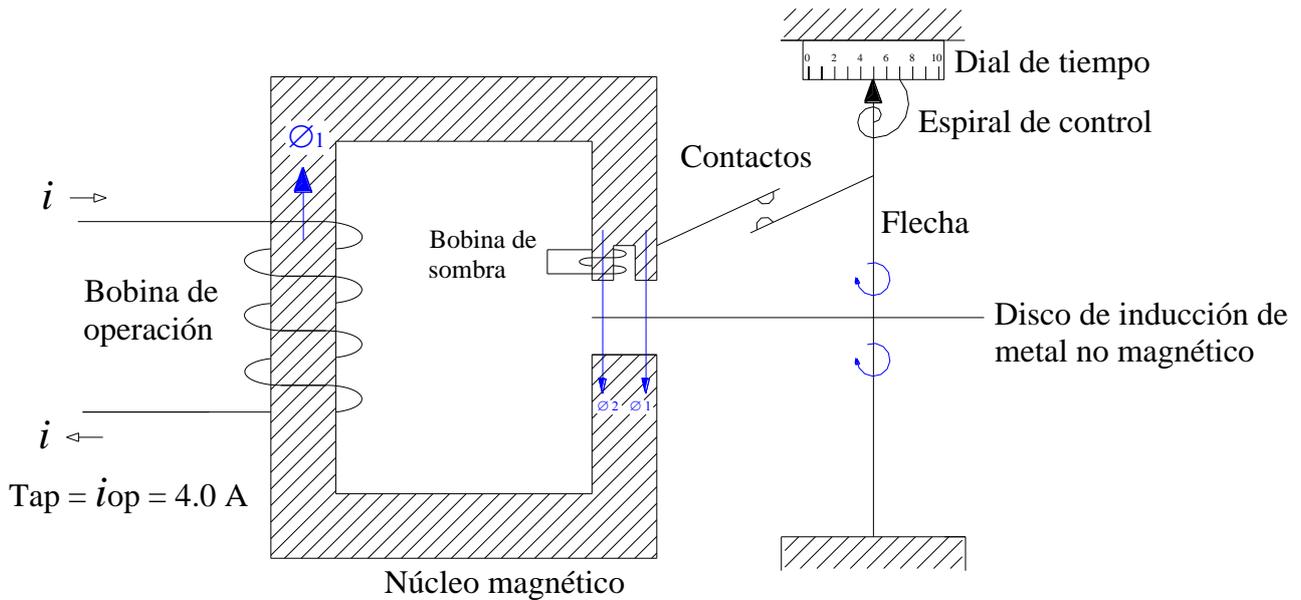
En condiciones normales la armadura está equilibrada, en condiciones de falla en la armadura se crea un polo norte (N) y polo sur (S) debido a la corriente de la bobina. La armadura flexible actúa como polo norte y es atraída por el polo sur cerrando los contactos, de esta forma actúa el relevador.

b).- Unidades de Inducción Electromagnética

Operan en base al principio de un motor de inducción.

1.- Unidad de disco de inducción.

Tiene retardo intencionado en la operación.



Si el dial = 0 está cerrado, y si el dial = 10 es la máxima abertura para el tiempo.

La bobina de sombra es una pequeña bobina en cortocircuito. En esta se induce una tensión pero como está en cortocircuito produce una corriente que genera un flujo ϕ_2 .

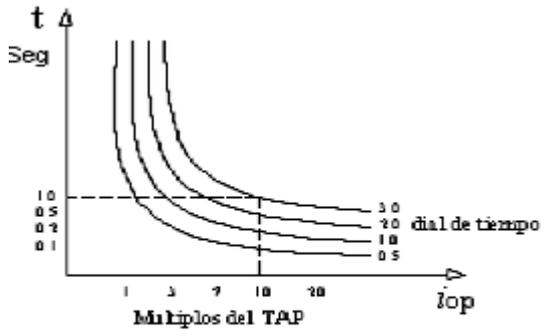
Para que exista el par motor se necesitan dos flujos variables

$$\text{Par motor} = T \propto \phi_{1\text{max}} \phi_{2\text{max}} \sin \theta$$

Por la acción de estos dos flujos se produce un par resultante que hace que gire el disco y cierre los contactos, siempre y cuando se rebase la corriente mínima de operación i_{op} .

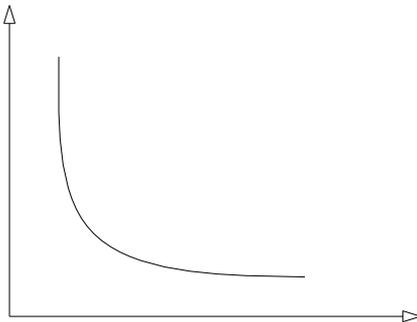
Habiendo operado el relevador, la espiral de control sirve para regresar al disco a su posición original una vez que ya no hay corriente de operación.

Característica de operación.

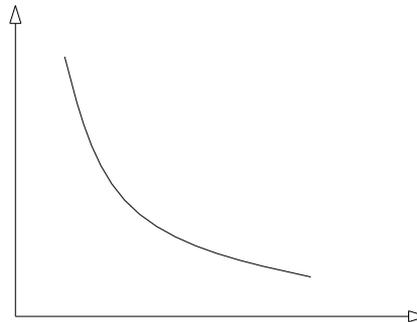


Característica de tiempo inverso

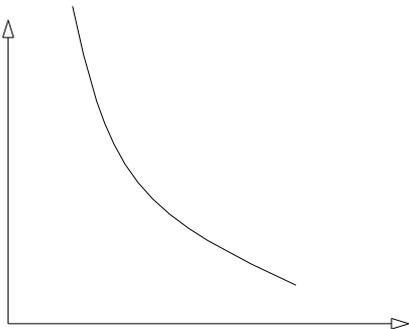
Mientras la i_{op} sea mas grande, el flujo será mayor y los contactos cerraran mas rápido.



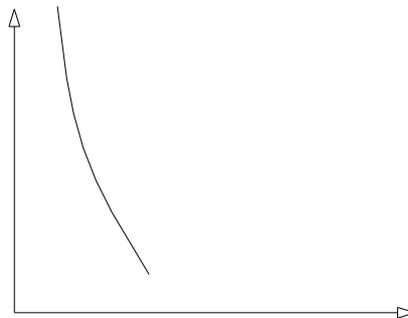
Tiempo definido, si la i_{op} aumenta el t es constante



Tiempo inverso, el t varia con respecto a la i_{op}



Tiempo muy inverso



Tiempo extremadamente inverso

Par de operación = T

$$T = k_1 I^2 - k_2$$

donde:

k_1 = Constante de conversión

I = Corriente de operación

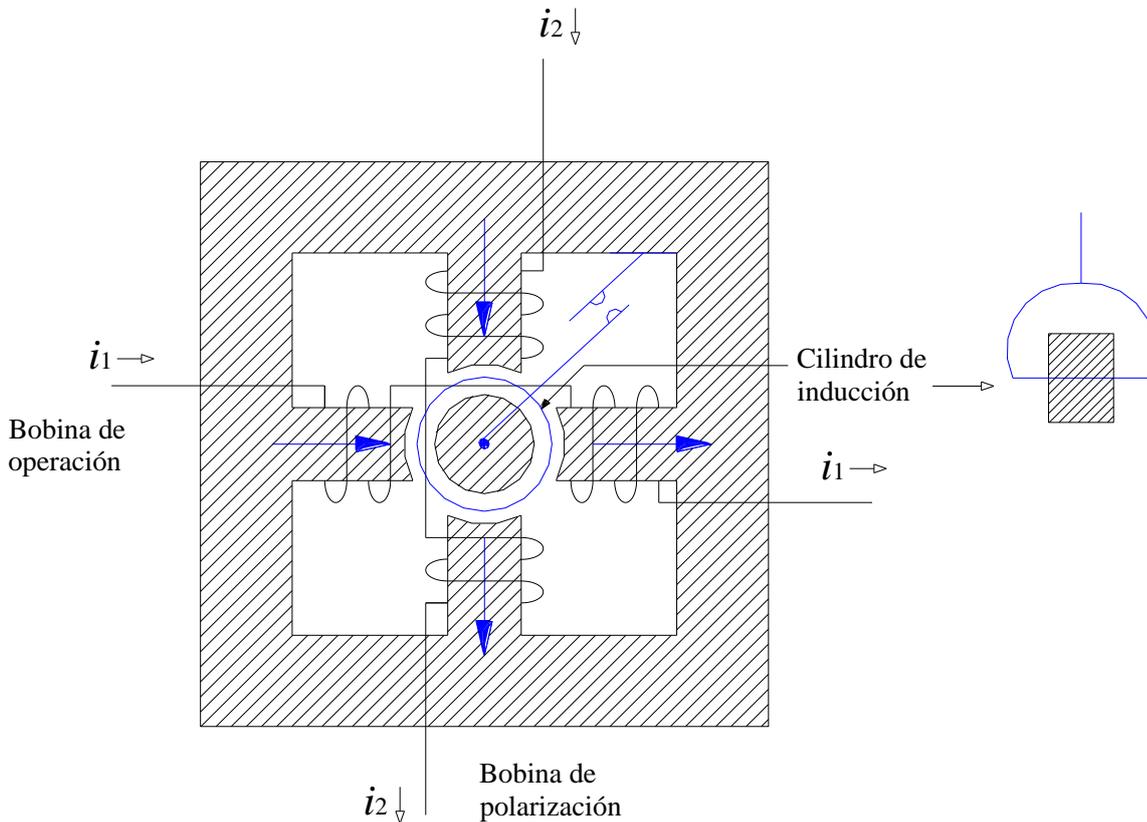
k_2 = Par de restricción debido a la espiral de control.

Bajo este principio de funcionamiento opera generalmente la protección 51, se alimenta con una magnitud de corriente únicamente.

2.- Unidad de cilindro de inducción

Estas unidades son de operación instantánea y no ven magnitud de sobrecorriente, trabajan con dirección de corriente.

Tienen un núcleo magnético cilíndrico y sobre éste va montado el cilindro de inducción.



Sobre el cilindro se generan los pares al interactuar los flujos. Al operar, el cilindro gira y cierra los contactos.

Esta unidad se utiliza en la protección 67 direccional. Donde este relevador de sobrecorriente direccional está formado por dos unidades: 67 + 51 y para el disparo deben cerrar los dos contactos.

El par está dado por:

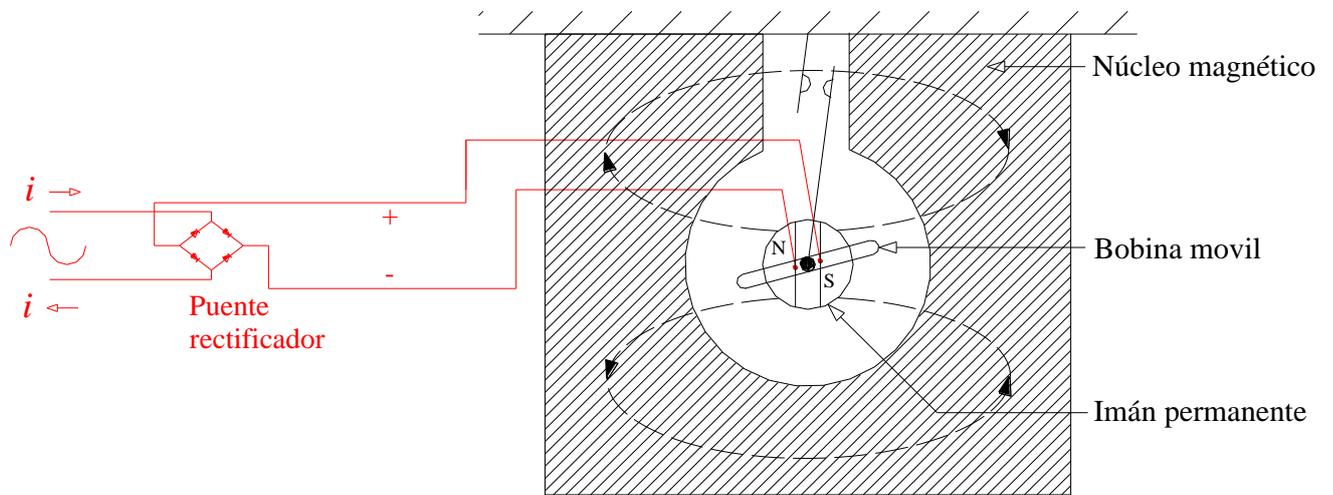
- Si se alimenta con una magnitud de tensión y una de corriente.

$$T = k_1 V i \sin \varnothing - k_2$$

- Si son dos magnitudes de corriente.

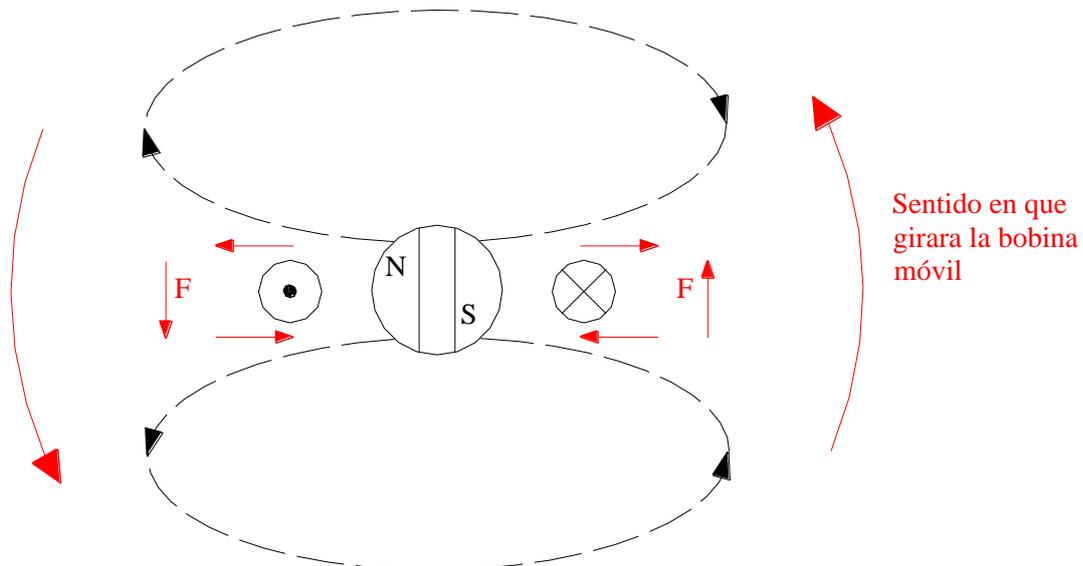
$$T = k_1 i_1 i_2 \sin \varnothing - k_2$$

3.- Unidad D'Arsonval



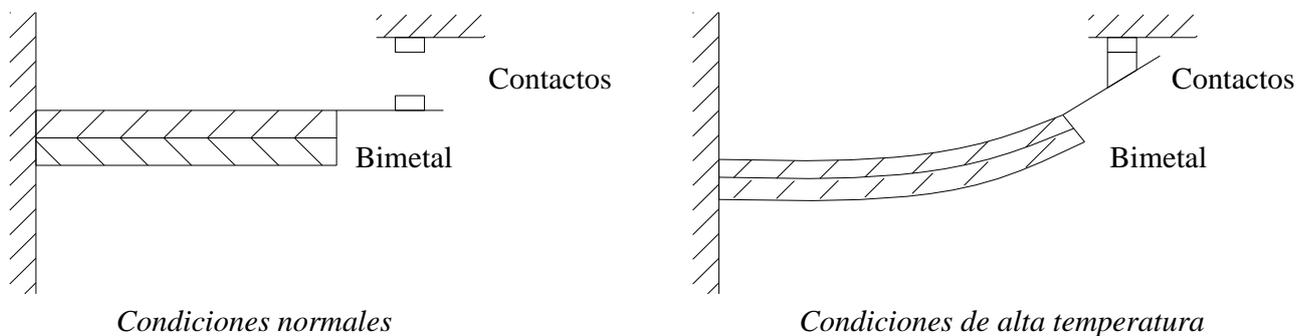
Cuenta con un imán permanente con un polo norte (N) y un polo sur (S) y tiene una bobina móvil montada sobre ella. En esta bobina móvil esta uno de los contactos y el otro contacto esta a la estructura.

Aplicando la regla de la mano derecha para el sentido del flujo y así determinar la fuerza que actúa y hace girar a la bobina móvil se obtiene la siguiente figura:



3.2 Unidades Térmicas

La unidad térmica consta de una tira bimetalica que tiene un extremo fijo y el otro libre. A medida que la temperatura aumenta, la diferencia de coeficientes de expansión térmica de los dos metales provoca el movimiento del extremo libre cerrando el contacto asociado.



RELEVADORES UTILIZADOS EN PROTECCIONES DE SISTEMAS DE POTENCIA

A continuación se muestra un lista de números normalizados que corresponden a relevadores y equipo relacionados con los esquemas de protección, se hará mención de algunos de ellos, en forma breve, con el fin de ir conociendo sus funciones y la forma en que se conectan. En capítulos posteriores se hablará mas específicamente sobre los mas importantes.

NUMEROS NORMALIZADOS USADOS EN DIAGRAMAS ELÉCTRICOS

2	Relevador de retardo de arranque o de cierre
21	Relevador de distancia
25	Verificador de sincronismo
27	Relevador de bajo voltaje
32	Relevador direccional de potencia
40	Relevador de campo
43	Dispositivo manual de transferencia
47	Relevador de voltaje de secuencia de fases
49	Relevador térmico de máquina
50	Relevador instantáneo de sobrecorriente
51	Relevador de sobrecorriente con retardo en la operación
52	Interruptor de potencia
59	Relevador de sobrevoltaje
62	Relevador de retardo de paro o apertura
63	Relevador que opera con presión de líquido o de gas
67	Relevador direccional de sobrecorriente
68	Relevador de bloqueo
74	Relevador de alarma
79	Relevador de recierre
81	Relevador de frecuencia
86	Relevador de bloqueo sostenido (operado en forma permanente)
87	Relevador de protección diferencial
89	Cuchilla desconectadora accionada eléctricamente

ELEMENTOS QUE INTEGRAN UN EQUIPO DE PROTECCIÓN

Un equipo de protección está integrado por tres elementos principales que son:

1.- TRANSFORMADORES DE INSTRUMENTO.

1.a) Transformador de corriente (T.C.)

Tiene como función aislar de la alta tensión y reducir la magnitud de la corriente en función de su relación de transformación.

1.b) Transformador de potencial (T.P.)

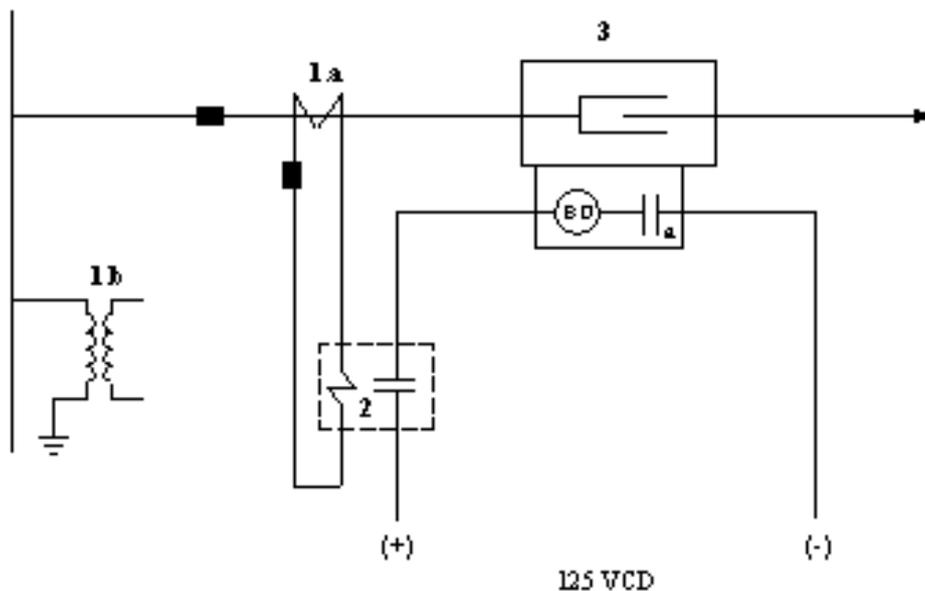
Tiene como función reducir la magnitud del voltaje de alta tensión en función de su relación de transformación a un voltaje generalmente de $120 / \sqrt{3}$ V.

2.- RELEVADOR

Es el elemento sensor. Es el que detecta la falla y envía señal de disparo al interruptor. Se alimenta a través de los T. C. y/o T. P.

3.- INTERRUPTOR DE POTENCIA.

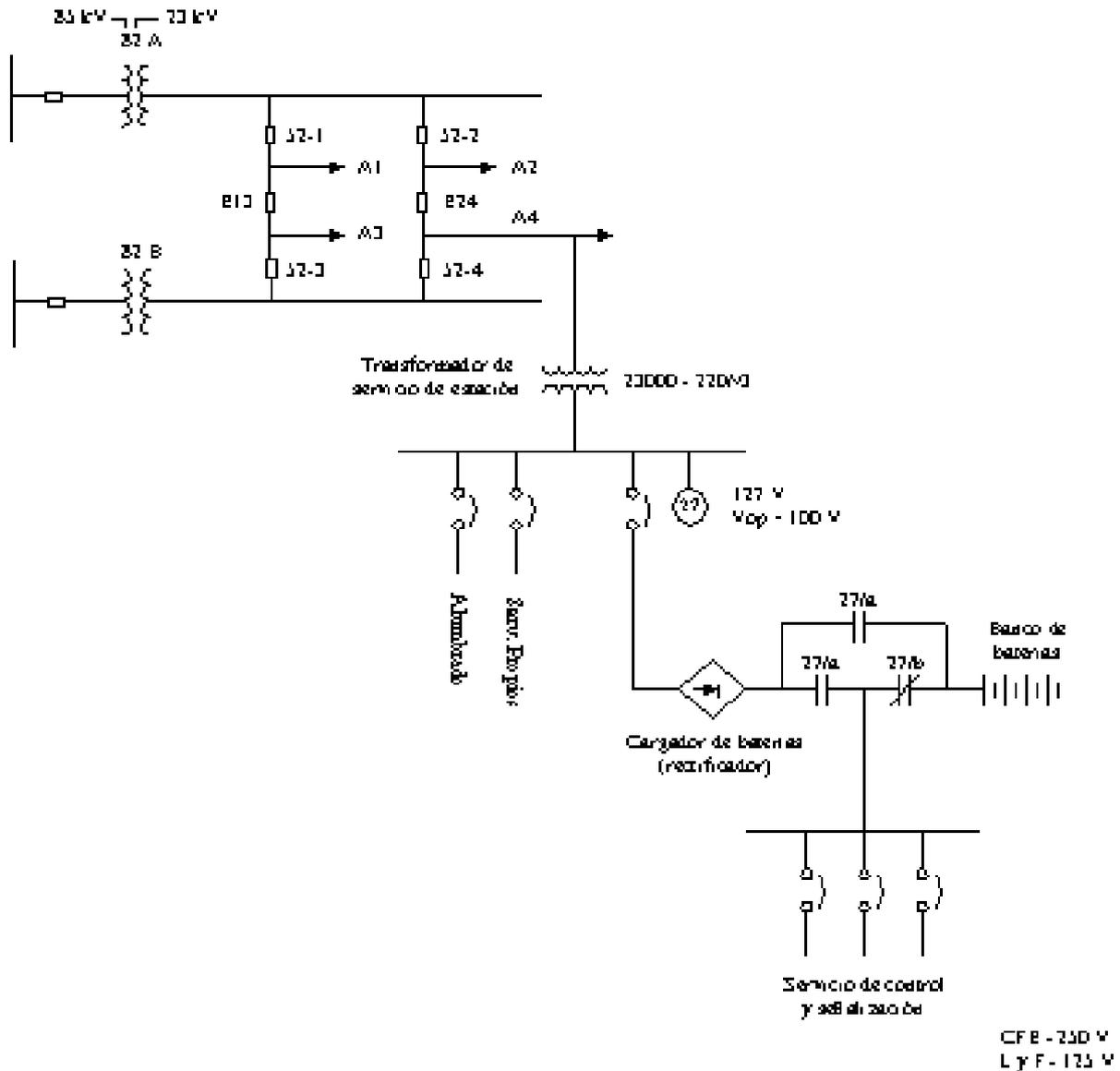
Tiene como función librar la falla abriendo sus contactos principales cuando recibe la señal de disparo del relevador.



Este diagrama muestra los elementos que integran el equipo de protección.

DIAGRAMA QUE MUESTRA COMO SE ALIMENTA EL CARGADOR DE BATERIAS Y EL BANCO DE BATERIAS DE UNA SUBESTACIÓN

CONFIGURACIÓN EN ANILLO DE ALIMENTADORES DE 23 kV



A1, A2, A3 Y A4 son alimentadores de 23 kV

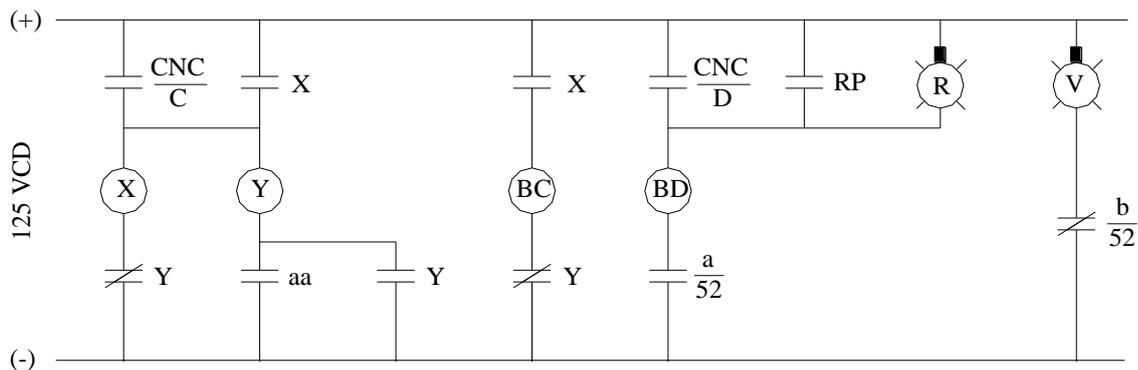
En esta configuración se muestran dos buses, los cuales por medio de sus respectivos transformadores suministran de energía a dos alimentadores cada uno. Estos alimentadores están unidos mediante interruptores de enlace. En uno de los alimentadores se conecta un transformador de servicio de estación mediante el cual se alimentan las cargas de alumbrado, servicios propios y el servicio de control y señalización.

El funcionamiento es el siguiente: a la salida del transformador de estación se conecta la bobina del relevador 27 (relevador de bajo voltaje), el cual se alimenta con una tensión nominal de 127 V y tiene una tensión de operación de 100 V. Es decir, el relevador estará normalmente operado, los contactos "a" estarán cerrados y el contacto "b" abierto.

En la operación normal del sistema, en donde se dispone de energía del sistema de alimentación, el cargador de batería (rectificador), alimenta tanto al banco de baterías como a los servicios de control y señalización ya que su operación es con CD.

En condiciones de emergencia, en caso un bajo voltaje o falta de potencial de la fuente, lo detecta el relevador 27 y cierra su contacto 27/b y abre los contactos 27/a. Con esta operación ahora el banco de baterías alimenta los servicios de control y señalización los cuales para CFE se alimentan con 250V y para LyF se alimentan con 125V. C. D. En estas condiciones, en el momento en que la energía se restablezca volverá a la operación en condiciones normales antes explicada

DIAGRAMA DE CONTROL DE UN INTERRUPTOR DE POTENCIA



Donde:

CNC Conmutador de control C = Cierre D = Disparo

(X) (Y) Relevadores auxiliares

(BC) Bobina de cierre

(BD) Bobina de disparo

(R) Lámpara roja (indica que el interruptor esta cerrado)

(V) Lámpara verde (indica que el interruptor está abierto)

aa Contacto auxiliar del interruptor de fin de carrera

Funcionamiento del circuito de control:

Para cerrar el interruptor: en las instalaciones de un sistema de potencia se tiene un tablero de control, este tablero dispone de un conmutador de control, si se acciona este conmutador a la posición de cierre, se cerrará el contacto CNC/C (cierre) energizándose el relevador auxiliar de cierre X y cerrando sus dos contactos respectivos en las siguientes dos ramas del circuito (los contactos X), quedando enclavado por el relevador de la segunda rama (de izq. a der.). El segundo contacto auxiliar X energiza la bobina de cierre BC, al terminar el ciclo de cierre (se cerraron los contactos "a" del interruptor de potencia, quedó cerrado el interruptor). El contacto auxiliar de fin de carrera del interruptor cierra solo por un instante y vuelve a abrir, este instante es suficiente para energizar la bobina del relevador auxiliar Y quedando enclavado cuando cierra su contacto Y normalmente abierto.

En la primer rama se abre el contacto auxiliar Y, desenergizando la bobina del relevador X, entonces se abren los contactos X, desenergizando tanto al relevador Y como a la bobina de cierre BC. De esta manera queda desenergizado todo el circuito de cierre. En el instante en que cerró el interruptor, también cerró el contacto a/52 con el cual se enciende la lámpara roja "R" que indica que el interruptor está cerrado y simultáneamente abre el contacto b/52 que apaga la lámpara verde.

La corriente que circula por la lámpara roja (de 12 volts) no es suficiente para energizar la bobina de disparo BD, para esto se le coloca en serie una resistencia en serie, como se indica en el diagrama.

Para abrir el interruptor: en el tablero de control se acciona el conmutador de control hacia la posición de disparo, en ese momento se cierra el contacto CNC/D con el cual se energiza la bobina de disparo BD ya que el contacto auxiliar a/52 se encontraba cerrado. Para lograr la apertura del interruptor también se hace por medio del contacto del relevador de protección RP el cual cerrará en el momento en que se produzca una falla, ya que al cerrar su contacto también se energiza la bobina de disparo BD. Cuando se abre el interruptor de potencia se cierra el contacto auxiliar b/52 con lo cual se enciende la lámpara verde que indica que el interruptor está abierto, simultáneamente se abre el contacto auxiliar a/52 con lo que se apaga la lámpara roja

PROTECCIÓN CON RELEVADORES

Es una de las diversas características del diseño de un Sistema Eléctrico de Potencia (SEP), relacionado con la disminución al daño del equipo y las interrupciones al servicio cuando ocurren fallas eléctricas.

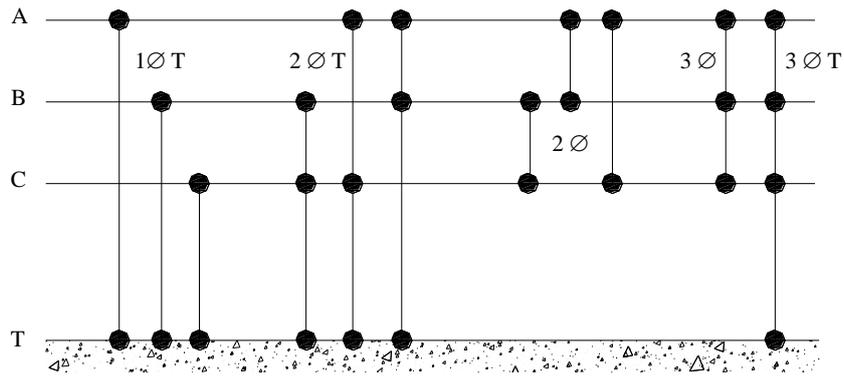
Fallas Eléctricas

Estas pueden ser, fundamentalmente:

- ✎ CORTOCIRCUITO
 - Monofásico: $\emptyset T$
 - Bifásico: $\emptyset\emptyset$ ó $2\emptyset T$
 - Trifásico: $3\emptyset$ ó $3\emptyset T$ → Cortocircuito balanceado

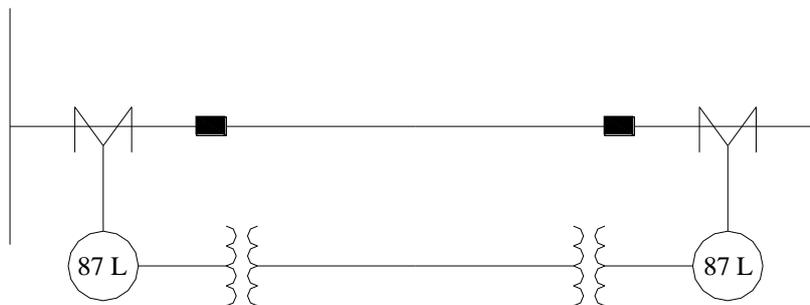
- ✎ SOBREVOLTAJE
BAJO VOLTAJE

- ✎ SOBREFRECUENCIA
BAJA FRECUENCIA
PERDIDA DE SINCRONISMO EN GENERADORES



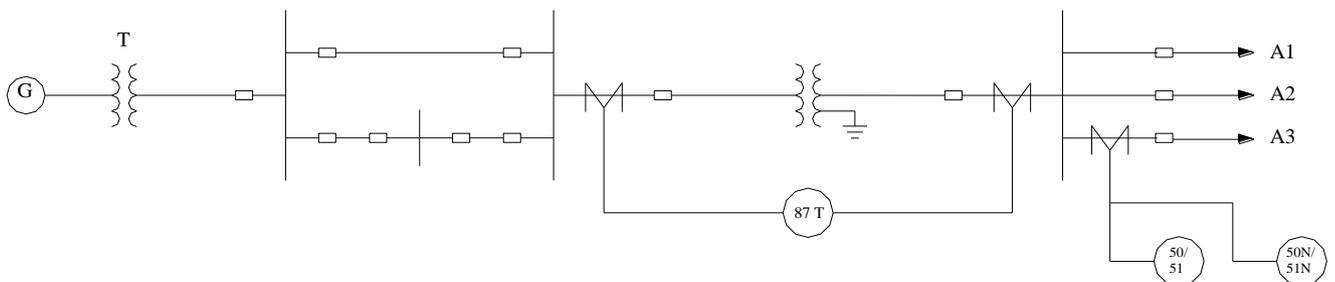
Fallas Eléctricas

Dentro de límites económicos, un SEP debe diseñarse de tal manera que pueda estar adecuadamente protegido. La función de la protección es originar el retiro rápido del servicio (dejar fuera de servicio) de cualquier elemento de un SEP cuando éste sufre un cortocircuito o empieza a funcionar en forma anormal originando daño o interfiriendo con el funcionamiento eficaz del resto del sistema.



Los relevadores actúan sobre interruptores, los cuales son los que desconectan el elemento defectuoso cuando reciben la señal de disparo de dichos relevadores, los interruptores están localizados de tal manera que cada uno de los elementos del sistema pueden desconectarse por completo del resto del sistema (87= relevador diferencial)

Los interruptores deben tener la capacidad suficiente para que puedan conducir momentáneamente e interrumpir la máxima corriente de cortocircuito que pueda fluir a través de ellos.



Los elementos del sistema de potencia generalmente tienen dos equipos de protección:

1.- PROTECCIÓN PRIMARIA (P.P.)

La protección primaria es la que debe operar siempre que ocurra una falla en el circuito que está protegiendo.

Tiempo de operación: se utilizan relevadores de alta velocidad (1/2 – 3 ciclos)

En el sistema de 60 hertz (60 ciclos por segundo), se tiene:

60 ciclos = 1000 ms(milisegundos)

6 ciclos = 100 ms

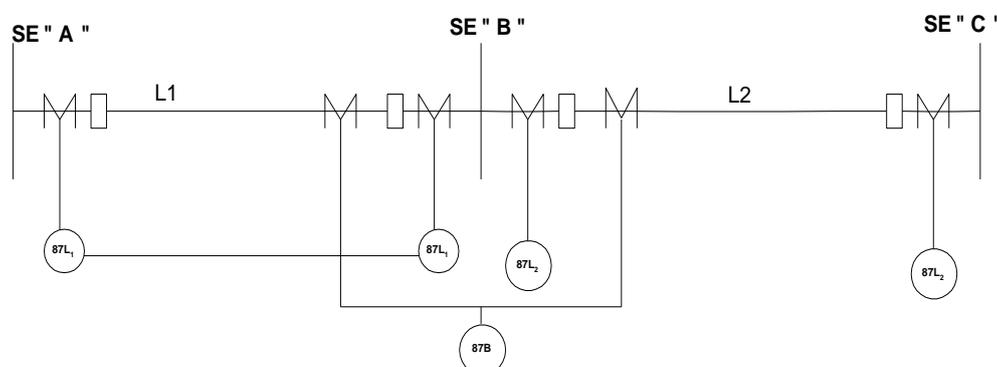
3 ciclos = 50 ms

1 ciclo = 16.6 ms

Los interruptores de 400kV abren en 2 ciclos

Traslape de Protecciones

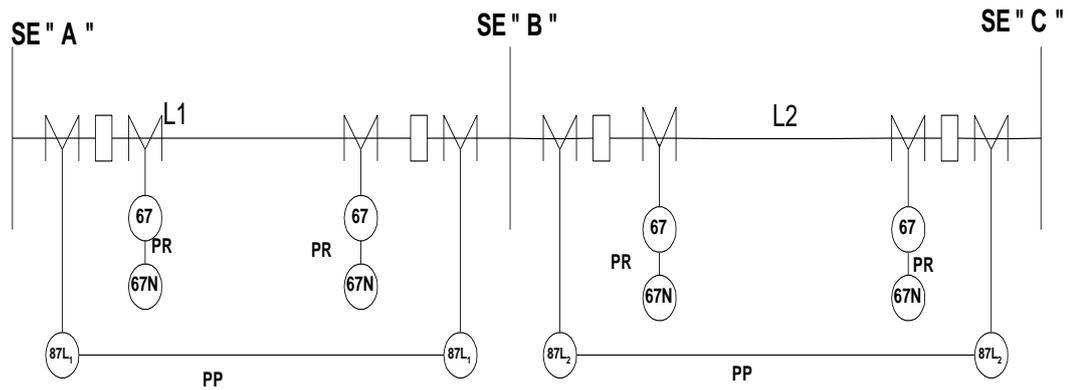
Las protecciones primarias deben conectarse de manera que queden traslapadas.



La protección primaria de Barras de la subestación " B " (87B), está traslapada con la protección primaria de la línea 1 (87L1) y también con la protección primaria de la línea 2 (87L2)

2.- PROTECCIÓN DE RESPALDO (P. R.)

Debe operar únicamente si la protección primaria falla o se encuentra fuera de servicio por mantenimiento. Se utilizan relevadores con retardo intencionado en la operación, con el fin de poder coordinar la operación de los interruptores relacionados con la falla.



PP - Protección Primaria , **PR** – Protección de respaldo

Si la protección primaria de la línea 2 no opera, deben operar las de protecciones de respaldo 67L2 en la subestación " B " y " C " y abrir los interruptores en dichas subestaciones .

CRITERIOS DE DISEÑO PARA LA PROTECCIÓN CON RELEVADORES

Son cinco los criterios que se aplican en el diseño de la protección:

1.- CONFIABILIDAD

Habilidad de la protección o conjunto de protecciones para operar correctamente cuando se requiere evitando operaciones incorrectas o indebidas.

2.- VELOCIDAD

Debe librar la falla en el tiempo mínimo requerido procurando el menor daño al equipo.

3.- SELECTIVIDAD

Lograr máxima continuidad con la mínima desconexión de circuitos.

4.- SIMPLICIDAD

Utilizar el mínimo equipo y el mínimo alambrado procurando tener un esquema no complicado.

5.- ECONOMIA

Procurar la máxima protección al mínimo costo manteniendo la confiabilidad del equipo.

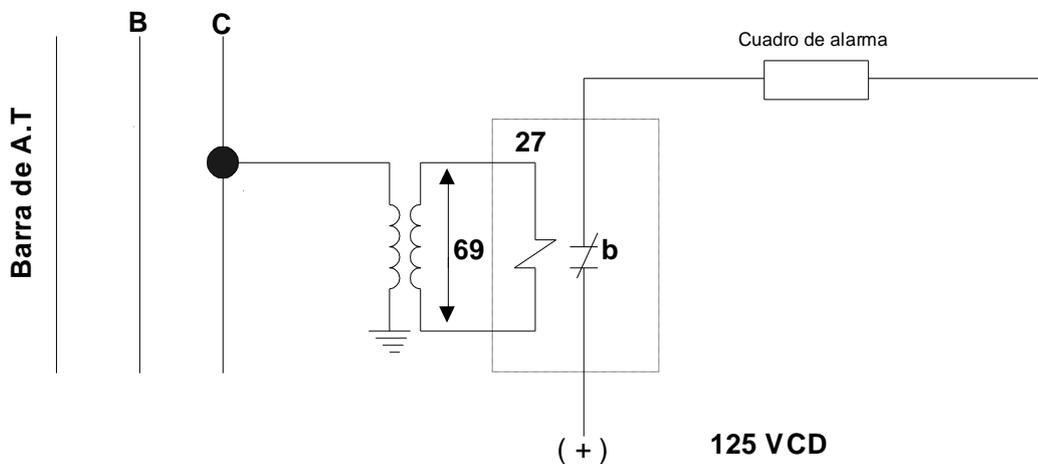
2 Relevador de retardo de arranque o de cierre
62 Relevador de retardo de paro o de apertura

El 2 y el 62 son temporizadores, antiguamente se utilizaban mecanismos de relojería para dar un cierto retardo en la operación de algunos relevadores. Actualmente se utilizan unidades en estado sólido.

27 Relevador de bajo voltaje
59 Relevador de sobrevoltaje

El 27 es un relevador de bajo voltaje y el 59 es un relevador de sobrevoltaje. El 27 se usa para enviar señales de alarma de bajo voltaje.

Conexión del relevador de bajo voltaje (27)



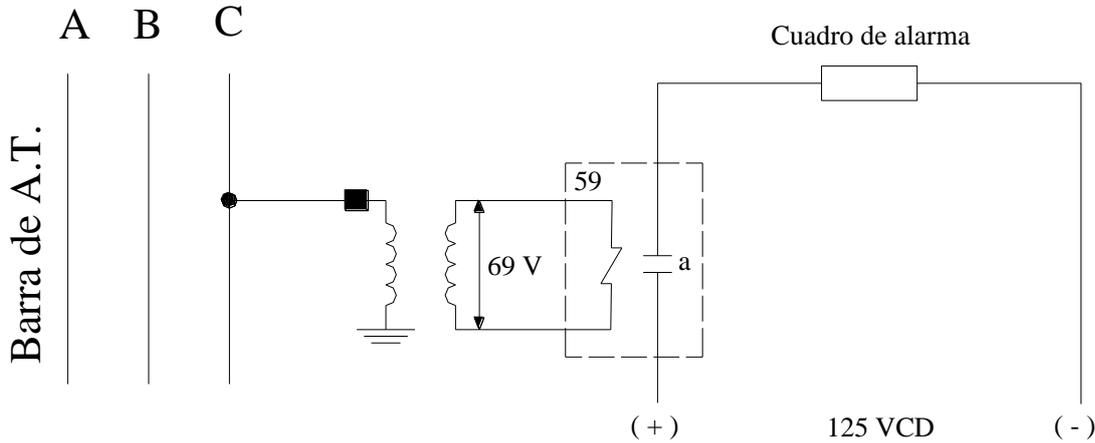
$$V_{\text{nominal}} = 69 \text{ V}$$

$$V_{\text{operación}} = 90\% V_n = 62.1 \text{ V} \leftarrow \text{debe enviar la alarma cuando el voltaje sea}$$

menor de este valor.

Conexión del relevador de sobrevoltaje(59)

El 59 se usa para enviar señales de alarma de sobrevoltaje.



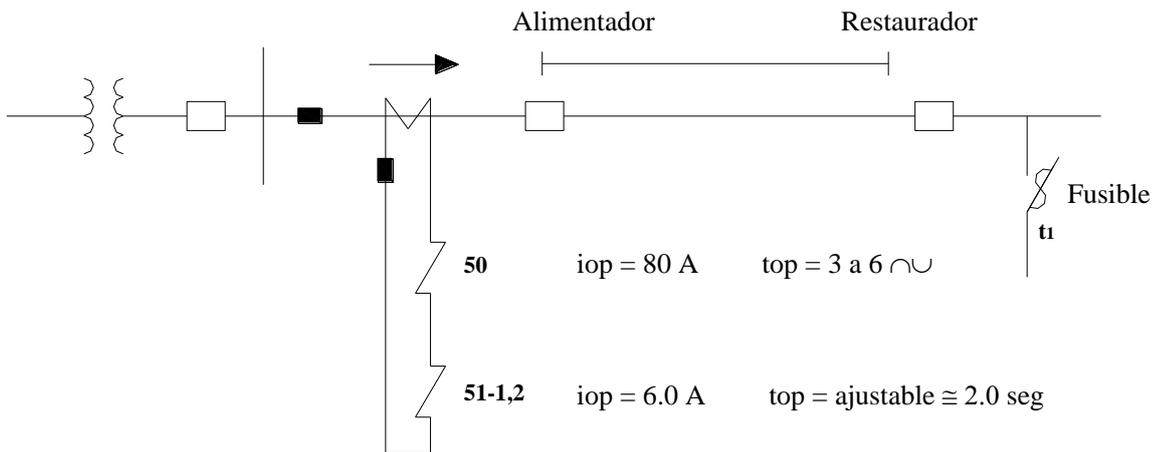
$$V_{\text{nominal}} = 69 \text{ V}$$

$$V_{\text{operación}} = 110\% V_n = 75.9 \text{ V} \leftarrow \text{debe operar y enviar señal de alarma cuando}$$

el voltaje sea mayor de este valor.

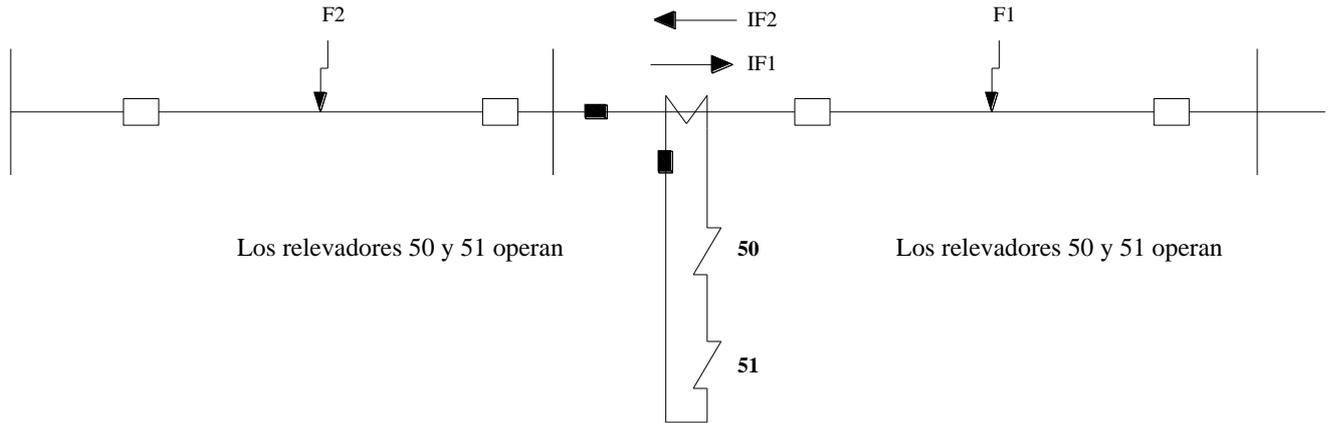
50 Relevador de sobrecorriente instantáneo

51 Relevador de sobrecorriente con retardo en la operación



Detectan únicamente la magnitud de la corriente.

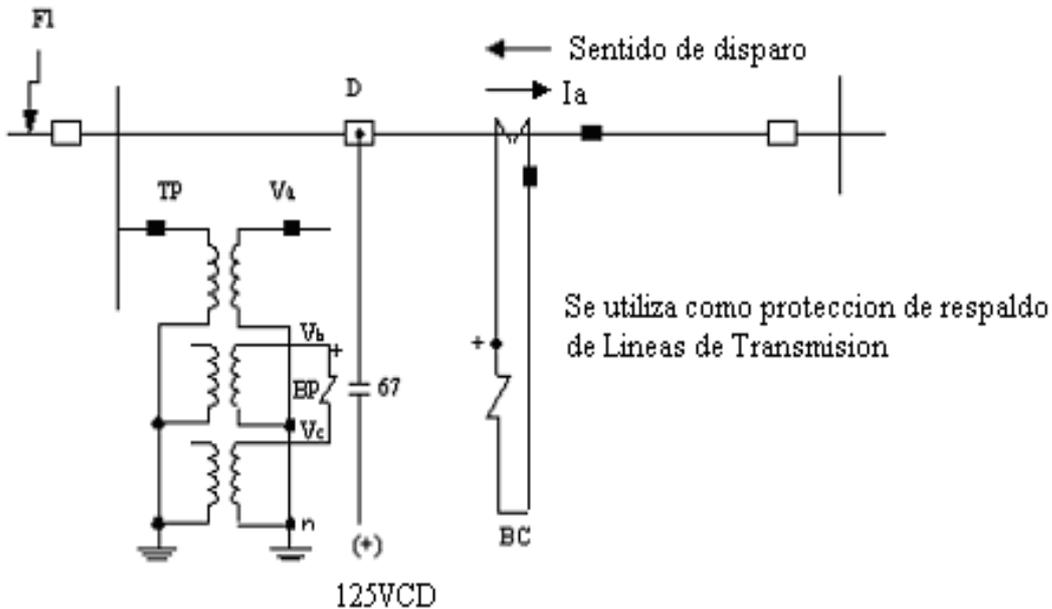
Se utilizan en circuitos radiales, la potencia se transmite en un solo sentido, no hay regreso.



No detectan el sentido en que fluye la potencia

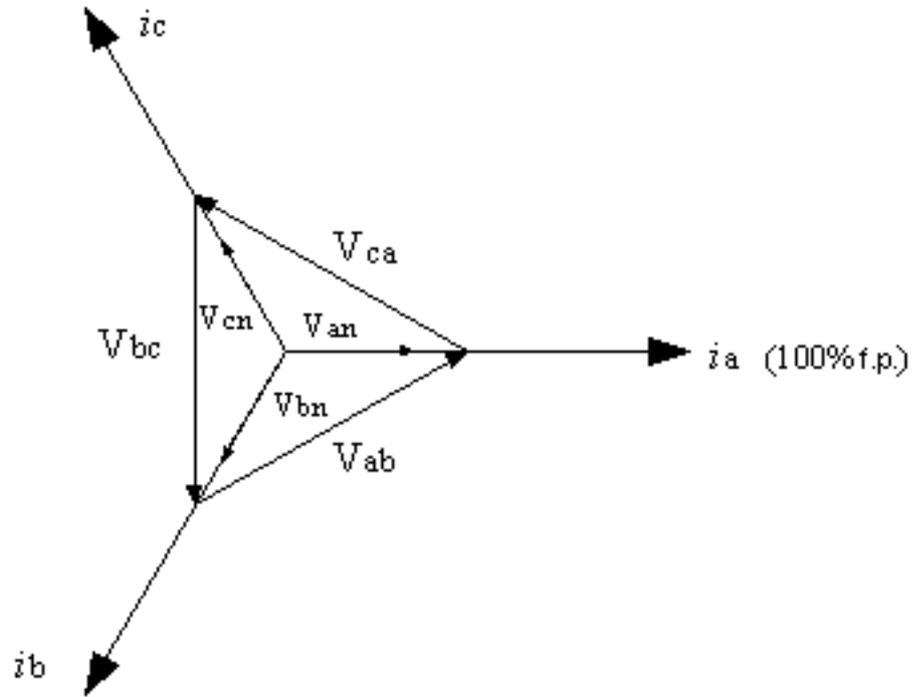
Estos relevadores operan con falla adelante o atrás de los puntos en que están instalados porque únicamente son sensibles a la magnitud; por lo que es conveniente utilizarlos únicamente en circuitos radiales.

67 Relevador direccional de sobrecorriente



Se utiliza como proteccion de respaldo de Lineas de Transmision

Para protección de sobrecorriente direccional de líneas se utiliza la conexión de 90°



Si el relevador 67 está recibiendo la corriente i_a , se le debe suministrar a su bobina de potencial el voltaje que se encuentra a 90° de dicha corriente, es decir, V_{bc}

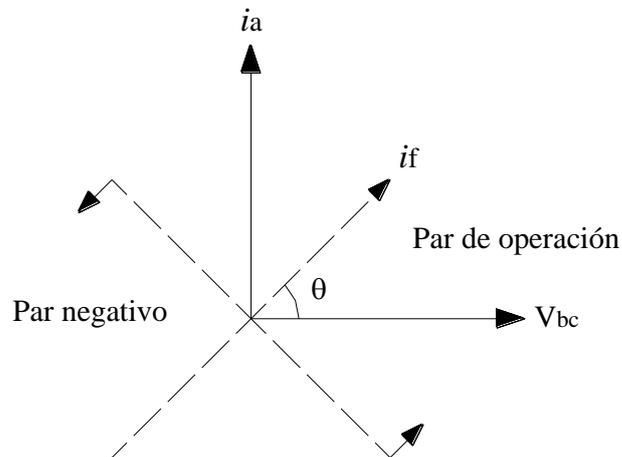
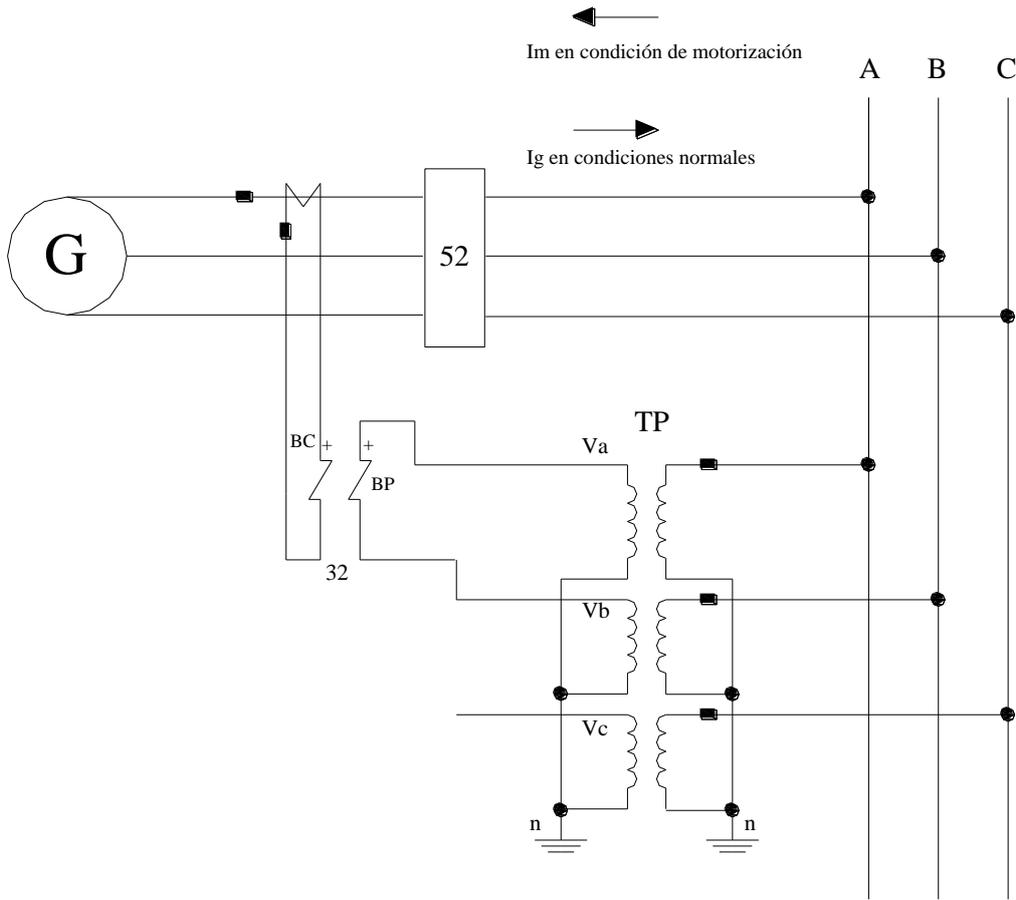


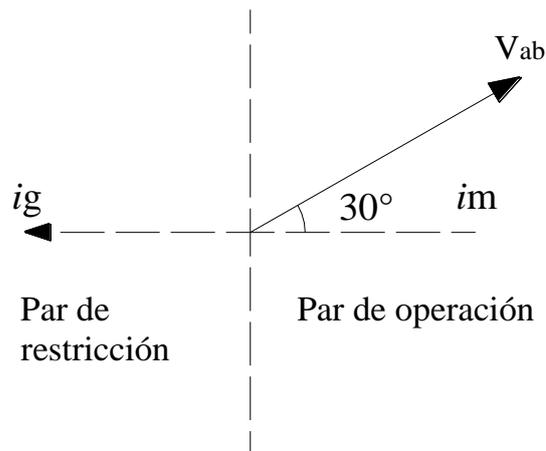
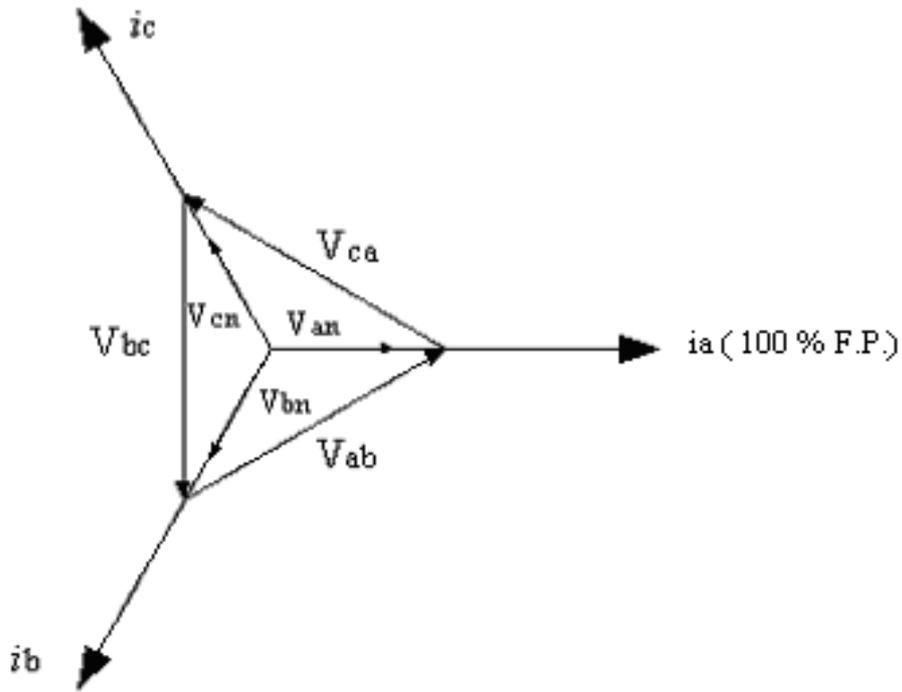
Diagrama fasorial que indica el voltaje y la corriente que alimentan al relevador 67

32 Relevador direccional de potencia



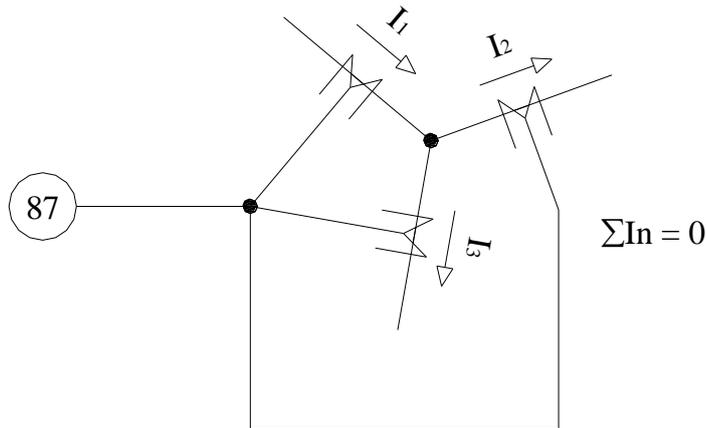
Este relevador utiliza la conexión 30° y se usa para proteger al generador contra la motorización.

BC Bobina de corriente
BP Bobina de potencial



Si el relevador está recibiendo la corriente de la fase A(i_a) , la bobina de potencial debe conectarse al voltaje V_{ab} que se encuentra a 30° de dicha corriente y este ángulo es el que debe ver el relevador en el momento de la motorización del generador, para que opere correctamente

87 Relevador de protección diferencial



Para que el relevador no opere se debe de cumplir la condición de que la corriente en el punto neutro sea cero, esto es en condiciones normales. En condiciones de falla esta condición no se cumple y el relevador detecta diferencia de corrientes y operara.

Protección diferencial de barras

A continuación se muestra el diagrama de conexiones para la protección diferencial de barras, este diagrama muestra las condiciones normales de operación (no hay falla). En donde a los circuitos no. 1 y no. 2 se les alimenta con una corriente de 600 A respectivamente, el circuito no. 3 alimenta una carga con 400 A y el circuito no. 4 con 800 A. Las relaciones de transformación de los TC deben de ser iguales en todos los circuitos, aquí se usan TC relación 1200:5

En base a esta relación de transformación se calculan las corrientes secundarias en los TC.

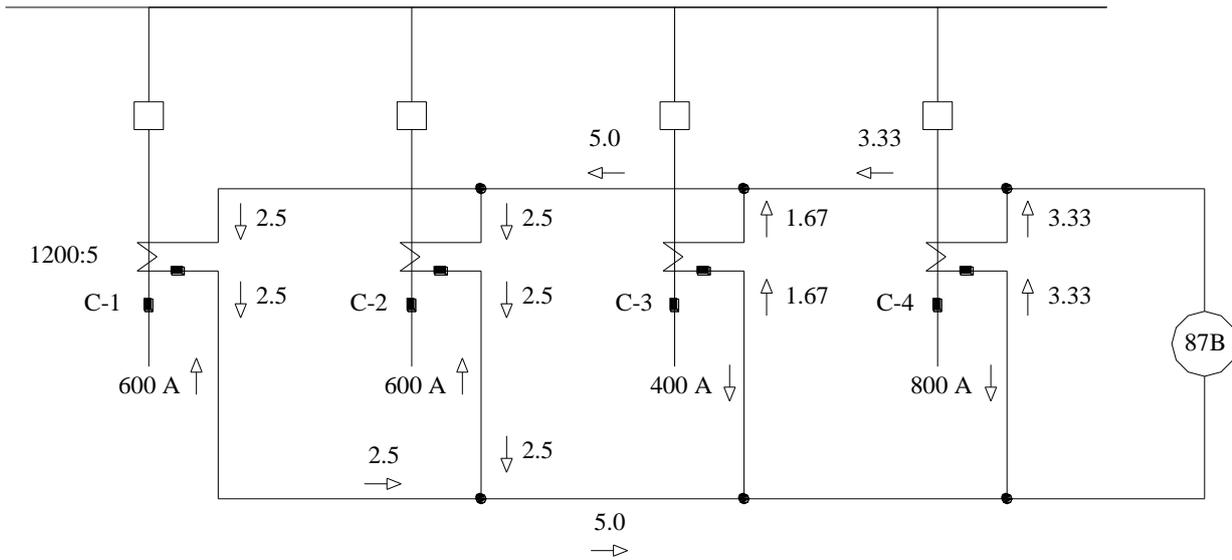
$$KTC_1 = KTC_2 = KTC_3 = KTC_4 = 1200:5 = 240:1$$

$$i_1 = i_2 = \frac{600}{240} = 2.5 \text{ A}$$

$$i_3 = \frac{400}{240} = 1.67 \text{ A}$$

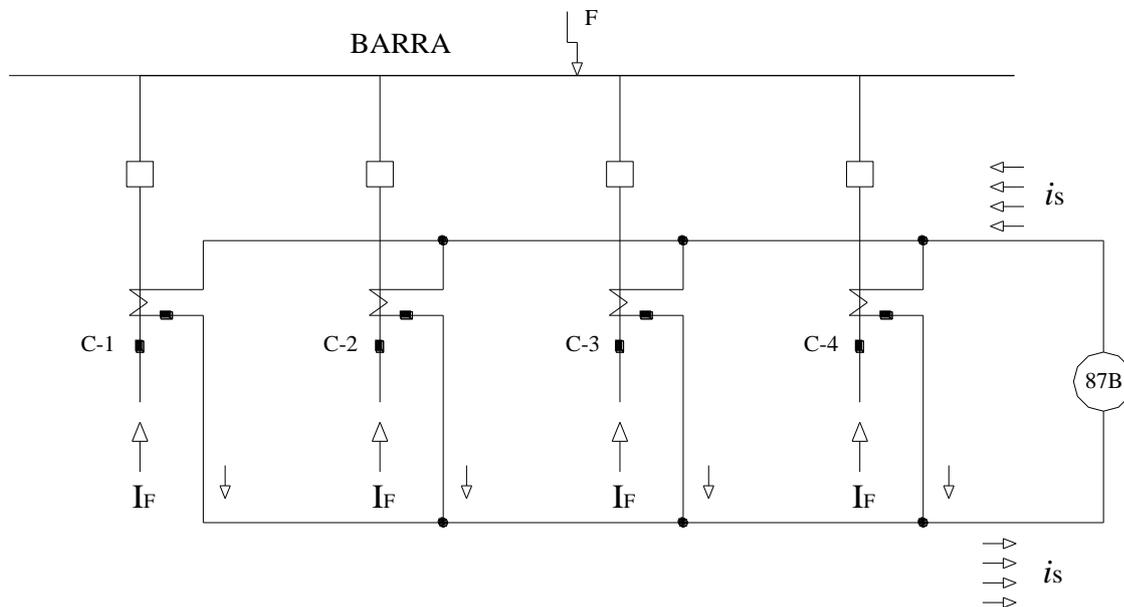
$$i_4 = \frac{800}{240} = 3.33 \text{ A}$$

BARRA



Condiciones normales de operación

Ahora se muestra el diagrama en condiciones de falla en la barra, en donde todas las corrientes de los circuitos adquieren el mismo sentido ya que alimentaran a la falla en la barra, por lo tanto las corrientes secundarias de los TC también adquieren un mismo sentido y hacen que al sumarse el relevador opere pues esta corriente es mayor a la establecida en condiciones normales.

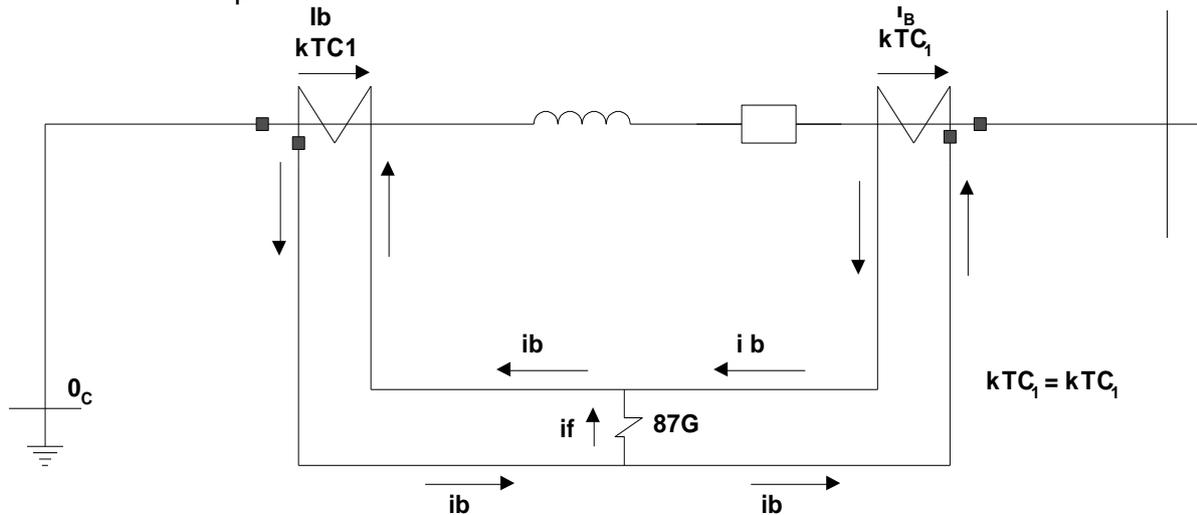


Condiciones de falla

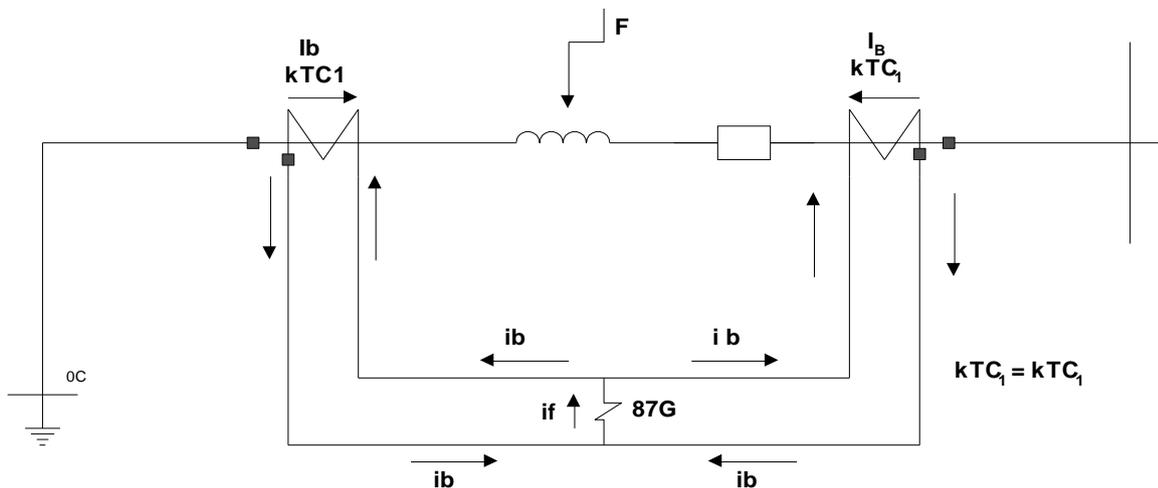
Protección Diferencial del generador

En el diagrama el circuito que se protege es una fase del inducido de un generador. En condiciones normales las corrientes de los secundarios de los dos TC circulan en el mismo sentido. No circula corriente por la bobina de operación 87G y el relevador no opera.

Se utilizan las mismas relaciones de transformación para los dos TC para que las corrientes secundarias se comparen adecuadamente.



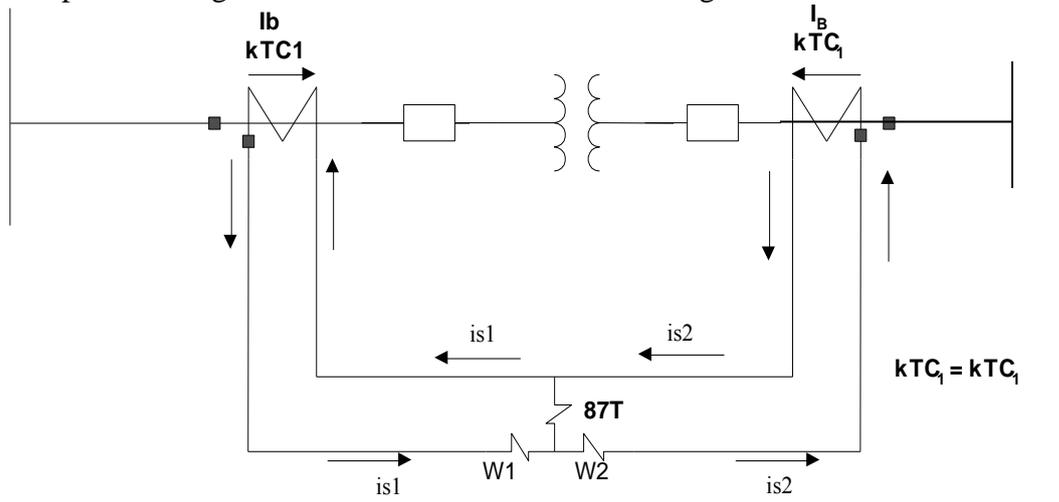
Ahora en condiciones de una falla, las corrientes tienen sentidos opuestos y el relevador opera. Se observa que aparece una corriente diferencial i_f que pasa por el relevador, esta es la suma de las corrientes que se inducen en los secundarios.



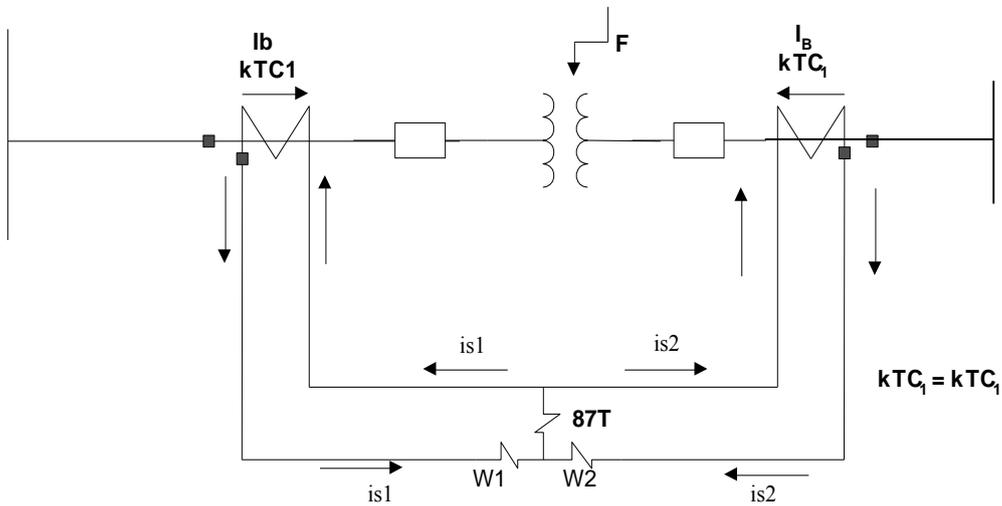
En la práctica, el relevador diferencial lleva además de la bobina de operación, bobinas de restricción, de esta manera la magnitud de operación no tiene que ajustarse a un valor fijo, sino que es un porcentaje de la corriente total que circula por las bobinas de restricción; para que no opere con fallas severas externas y si opere con fallas internas de baja magnitud. A este relevador se le llama relevador diferencial de porcentaje.

Protección diferencial del transformador

El principio de operación de esta protección es el mismo que la protección 87 del generador, pero las bobinas de restricción se conectan a través de T. C. auxiliares que tienen taps de ajuste los cuales sirven para compensar la diferencia de corrientes inducidas en los secundarios de los TC, ya que en esta protección se utilizan diferentes relaciones de transformación porque se tiene diferente corriente del lado primario con respecto al lado secundario en el transformador de potencia. Lleva además un filtro de segunda armónica que sirve para evitar una operación incorrecta cuando se excita el transformador, lo cual se verá mas a fondo en protección de transformadores.

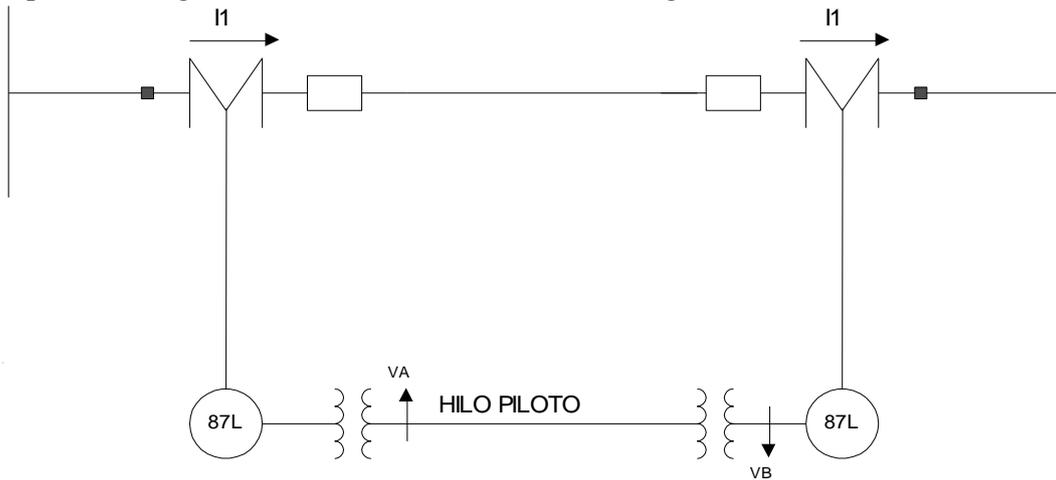


A continuación se presenta el diagrama en condiciones de falla, donde las corrientes inducidas en los TC cambian de dirección (TC_2) ya que en el lado primario se tiene un cambio en el sentido de la corriente por alimentar a la falla.

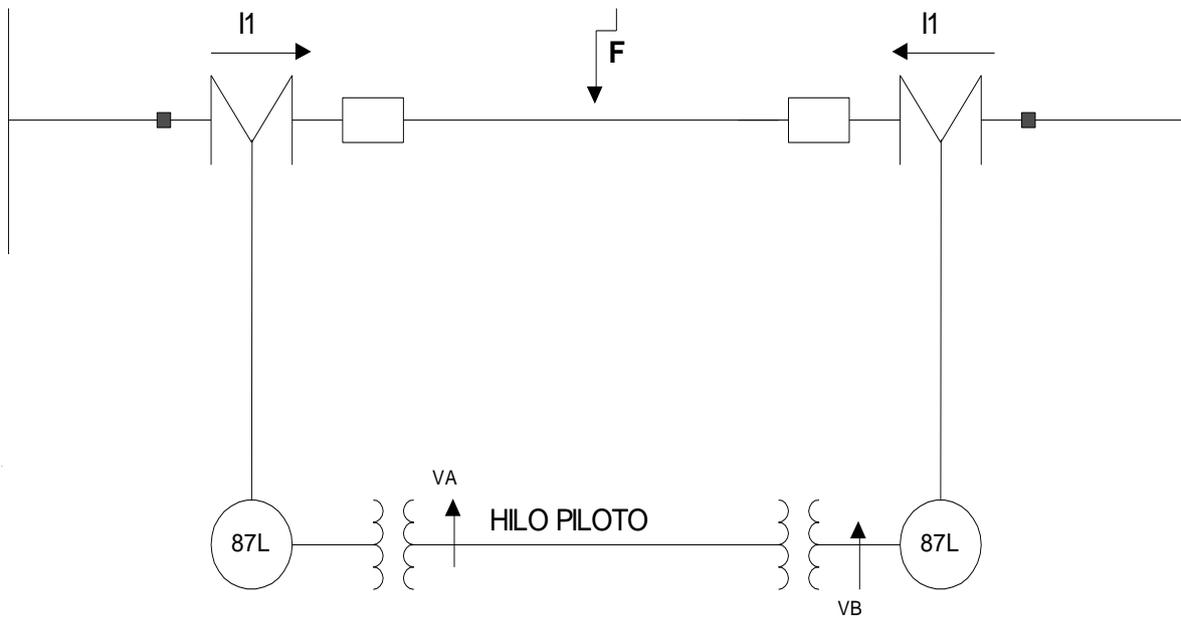


Protección diferencial de línea de transmisión.

En condiciones normales de operación se tiene la misma corriente a través de la línea y tiene el mismo sentido, para esta protección se necesitan dos relevadores 87L conectados entre si por un hilo piloto que sirve como medio de comunicación, también podría ser fibra óptica.

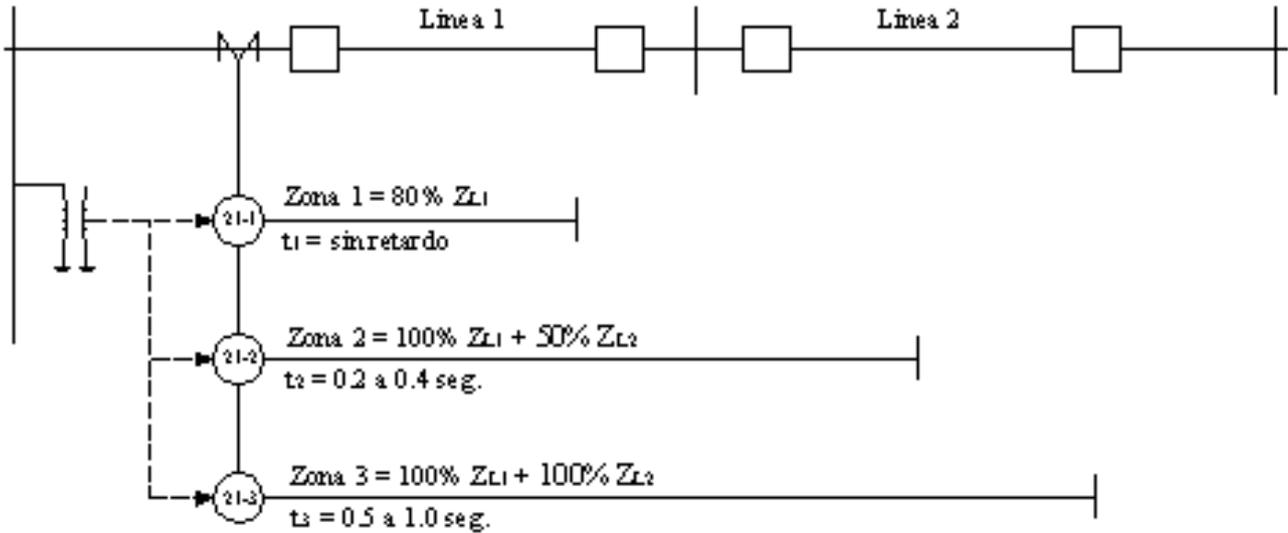


En condiciones de falla ahora los dos lados de la línea la alimentaran y el sentido de la corriente de uno de los lados se invertirá, operando el relevador para mandar señal de disparo a los interruptores.



21 Relevador de distancia

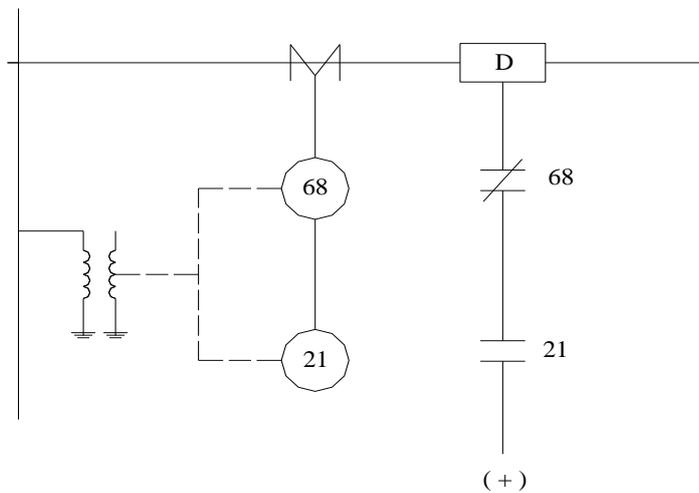
Generalmente se utiliza como protección primaria y de respaldo de líneas de transmisión. Se calibra en función de la impedancia de la línea (en base a esta es su ajuste). Esta protección recibe señal de corriente y de potencial, como se ve en la figura.



siendo $Z = \frac{V_s}{i_s}$

68 Relevador de bloqueo

Este es un relevador de bloqueo de disparo y se conecta en serie con el relevador 21 (Rel. de distancia). En caso de falla cierra el 68, y en caso de que no sea falla el 68 abre para bloquear la acción del 21.



81 Relevador de frecuencia

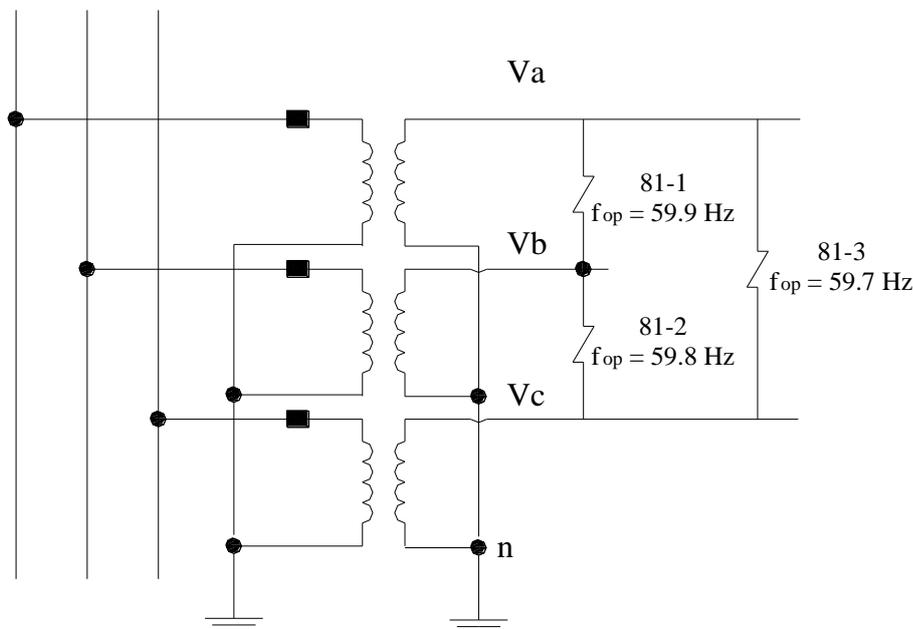
Se utiliza en el esquema de tiro de carga por baja frecuencia.

El relevador se alimenta con voltaje, pero es sensible a la frecuencia. Para operación normal debe haber relación (equilibrio) entre generación y carga (en kVA).

$$kVA_G = kVA_{CARGA} + \text{Pérdidas}$$

Si aumenta la carga y no se compensa con una mayor generación, la frecuencia baja y se puede llegar a la pérdida de sincronismo de los generadores provocando el colapso de todo el sistema.

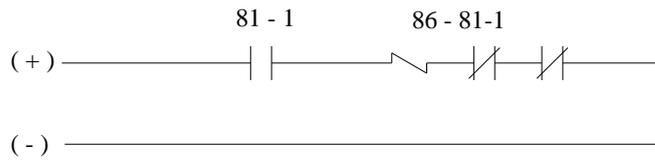
Las bobinas de los relevadores se conectan a los secundarios de los T. P. Cuando operan, envían señales a un relevador auxiliar 86 (Relev, de bloqueo sostenido) y éste es el que envía señal de disparo a los alimentadores.



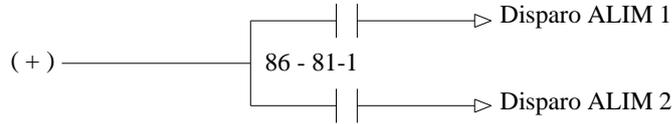
Se muestra que cada relevador está ajustado para frecuencias distintas, así, el primer relevador que operará será el 81-1 porque cuando la frecuencia baje 0.1 Hz (59.9 Hz) en ese momento este relevador actuará, le sigue así el relevador 81-2 si es que la frecuencia sigue bajando y llega a 59.8, y si la frecuencia continua bajando hasta 59.7 Hz entonces operará el 81-3.

Analizando los contactos de cada uno de los relevadores se observa que por cada relevador que actúa se deja fuera de operación a dos Alimentadores, esto es, se está desconectando carga con la finalidad de recuperar la frecuencia del sistema.

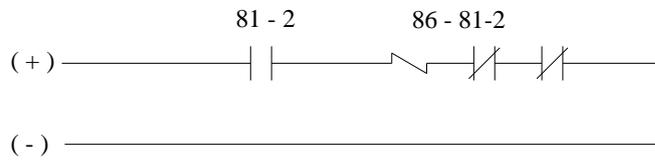
Contacto del 81 - 1



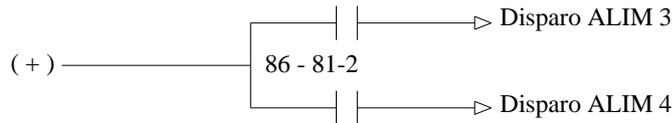
a través de su auxiliar "a"



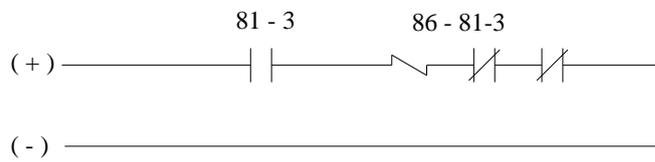
Contacto del 81 - 2



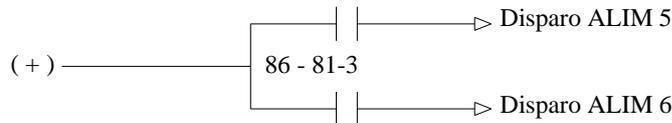
a través de su auxiliar "a"



Contacto del 81 - 3



a través de su auxiliar "a"



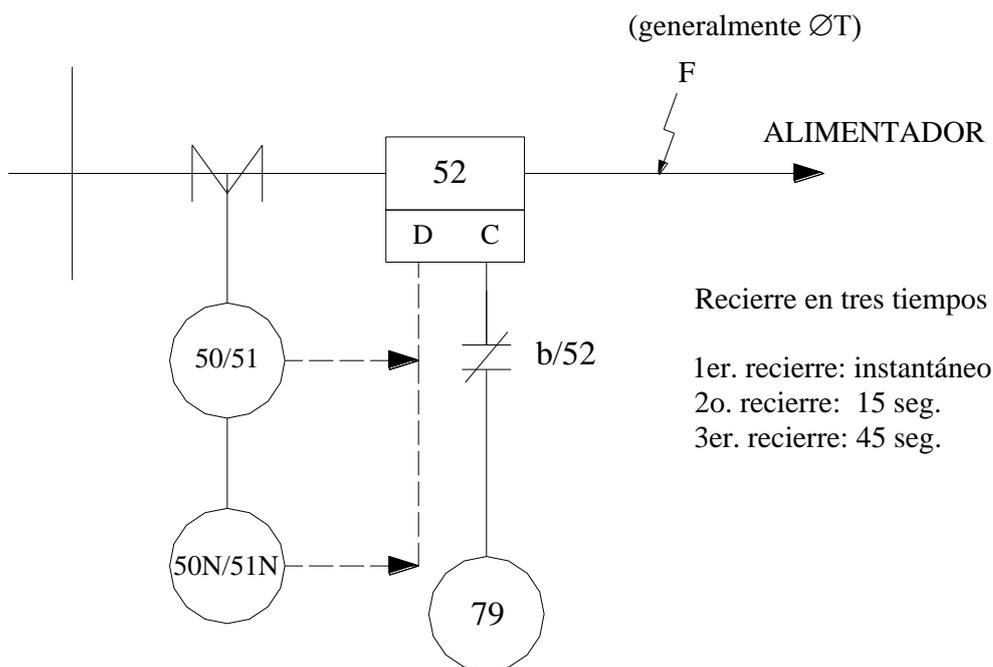
79 Relevador de recierre

Se utiliza generalmente en alimentadores aéreos.

En alimentadores subterráneos no hay recierre porque si falla es que falla el aislamiento, estas son fallas permanentes y se tiene que revisar el alimentador y reparar la falla.

Los alimentadores aéreos si tiene recierre, generalmente tienen tres.

Cuando hay falla actúa el 51, abre el interruptor y su contacto auxiliar "b" cierra, entonces actúa el 79 para su recierre que envía señal al interruptor.



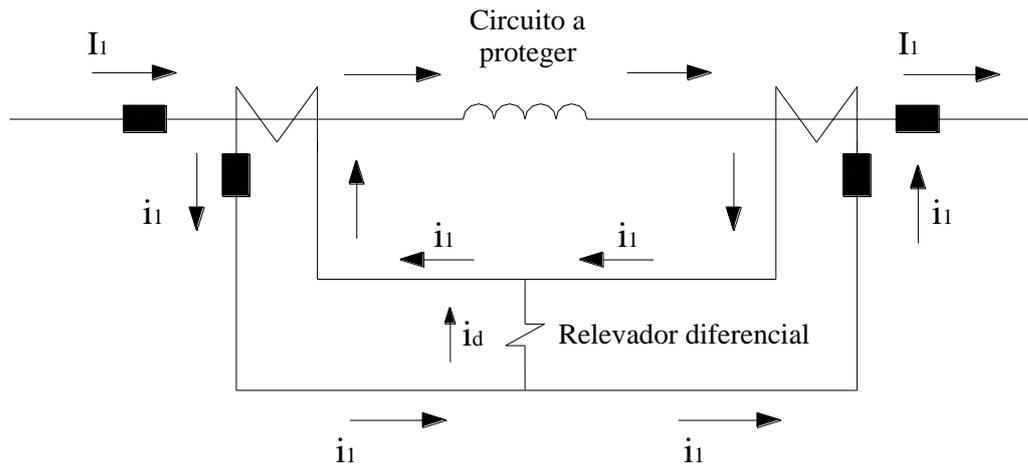
PRINCIPIO DE OPERACIÓN DE LA PROTECCIÓN DIFERENCIAL

Existen varios tipos de relevadores diferenciales cuya característica particular depende o está en función del equipo que van a proteger, en general un relevador diferencial opera cuando la diferencia vectorial de dos o mas cantidades eléctricas similares exceden un valor predeterminado.

Principio básico de operación de la protección diferencial

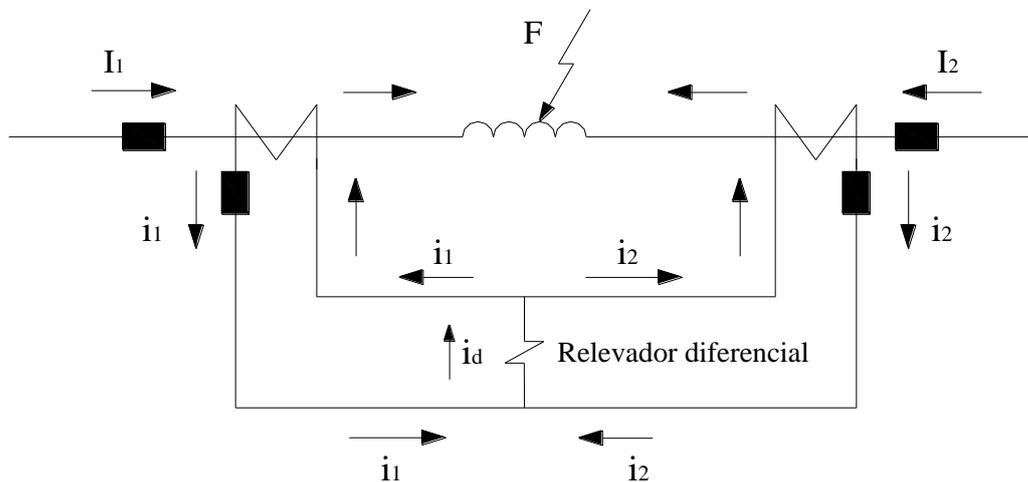
En condiciones normales, como se muestra en la primera figura, la corriente diferencial es igual a cero: $i_d = 0$

El relevador no opera, lo cual es correcto puesto que no hay falla en el circuito que está protegiendo.



En condiciones de falla $i_d \neq 0 = i_1 + i_2$

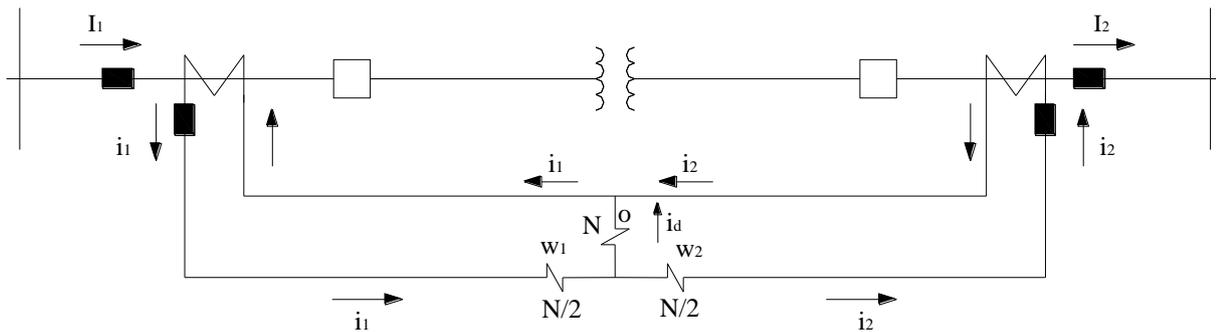
El relevador opera debido a que detecta la falla en el circuito que está protegiendo.



Esto es solo ilustrativo para ver el principio de funcionamiento de esta protección.

Relevador diferencial de porcentaje

En la práctica el relevador diferencial no se usa con la sola bobina de operación porque no se puede ajustar adecuadamente. Si se ajusta a un valor bajo de corriente para que sea sensible a fallas de baja corriente de cortocircuito, puede operar indebidamente con fallas severas externas y si se ajusta a un valor de corriente alto, no opera con fallas internas pequeñas, por lo que se usa el relevador diferencial con bobinas de restricción, llamado relevador diferencial de porcentaje, ya que la corriente de operación (i_{dif}) no es un valor fijo pero sí un porcentaje fijo de la corriente total que pasa por las bobinas de restricción, asegurando de esta forma su correcta operación en todo tipo de falla. Este relevador se usa para la protección de generadores y transformadores.



Para que el relevador opere, el par de operación debe rebasar un determinado porcentaje del par de restricción.

En el diagrama:

O = Bobina de operación

w₁ y w₂ = Bobinas de restricción

$$I_d = i_1 - i_2$$

De la figura se deduce que:

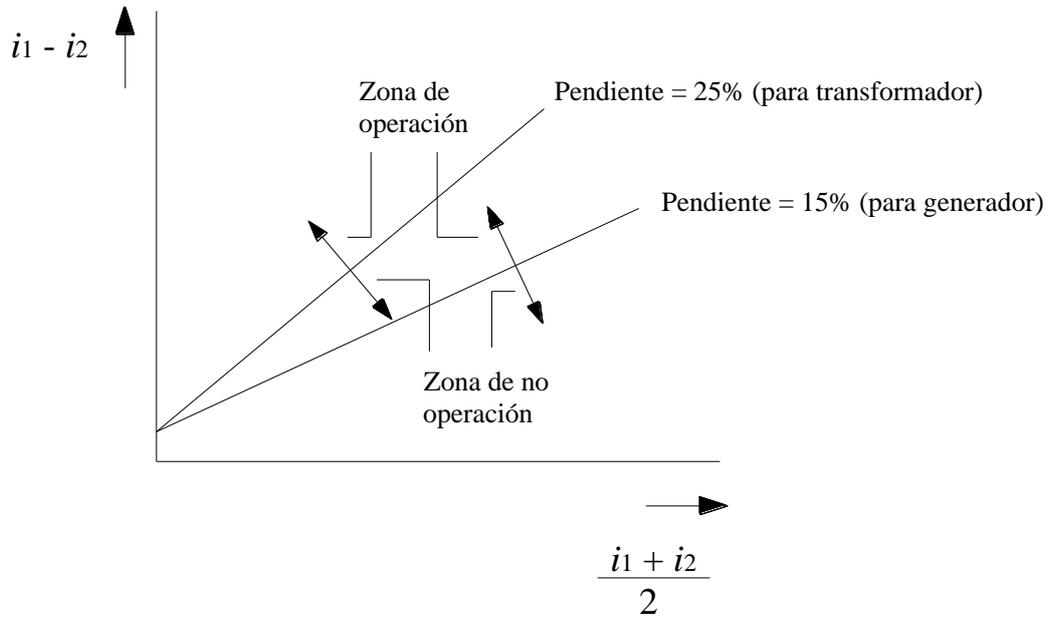
El par de operación es proporcional a $(i_1 - i_2) N$

El par de restricción es proporcional a $i_1 (N/2) + i_2 (N/2) \Rightarrow \frac{i_1 + i_2}{2} N$

Donde N es el número de espiras de la bobina.

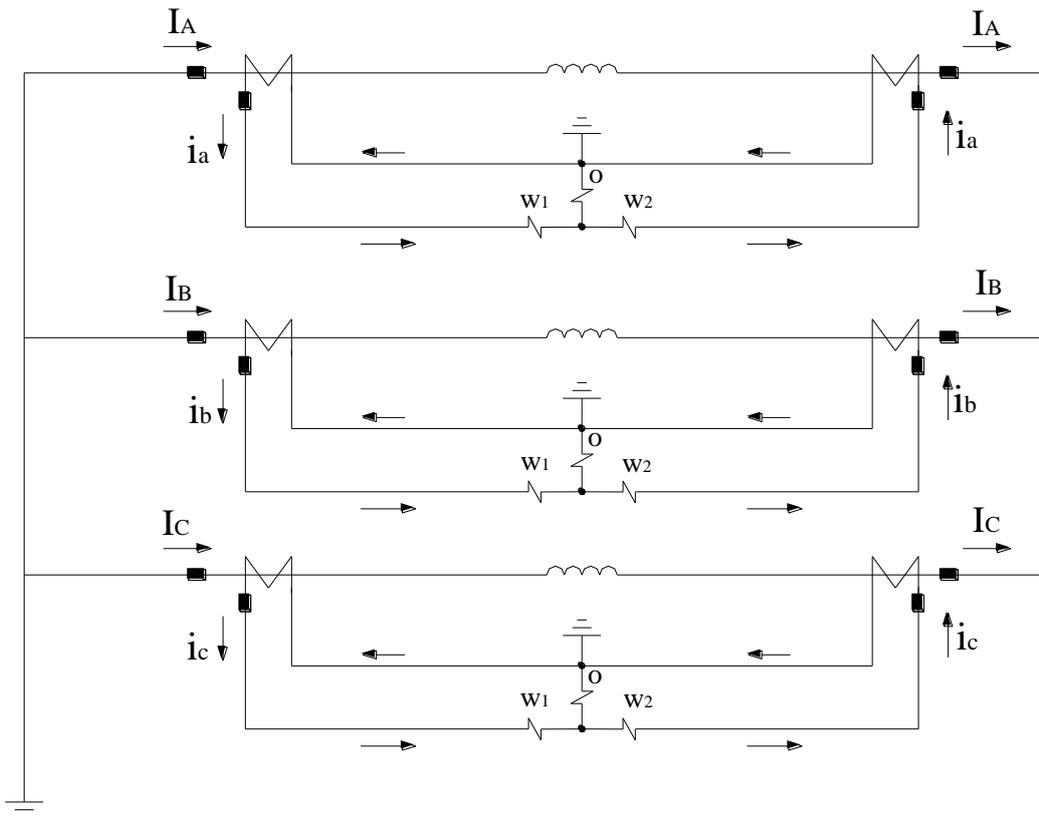
Característica de operación del relevador diferencial de porcentaje

La siguiente figura muestra dos diferentes curvas las cuales muestran la característica de operación de un relevador para protección a un transformador y a un generador. Esto es: si la corriente de operación rebasa el 25% de la corriente de restricción entonces el relevador operará. Al rebasar el 25% de corriente mencionada, se pasa de la zona de no operación a la zona de operación. Se le llama “umbral” a la recta que muestra las características de operación de un relevador. Esta recta no empieza en el origen porque se necesita un valor mínimo para operar.

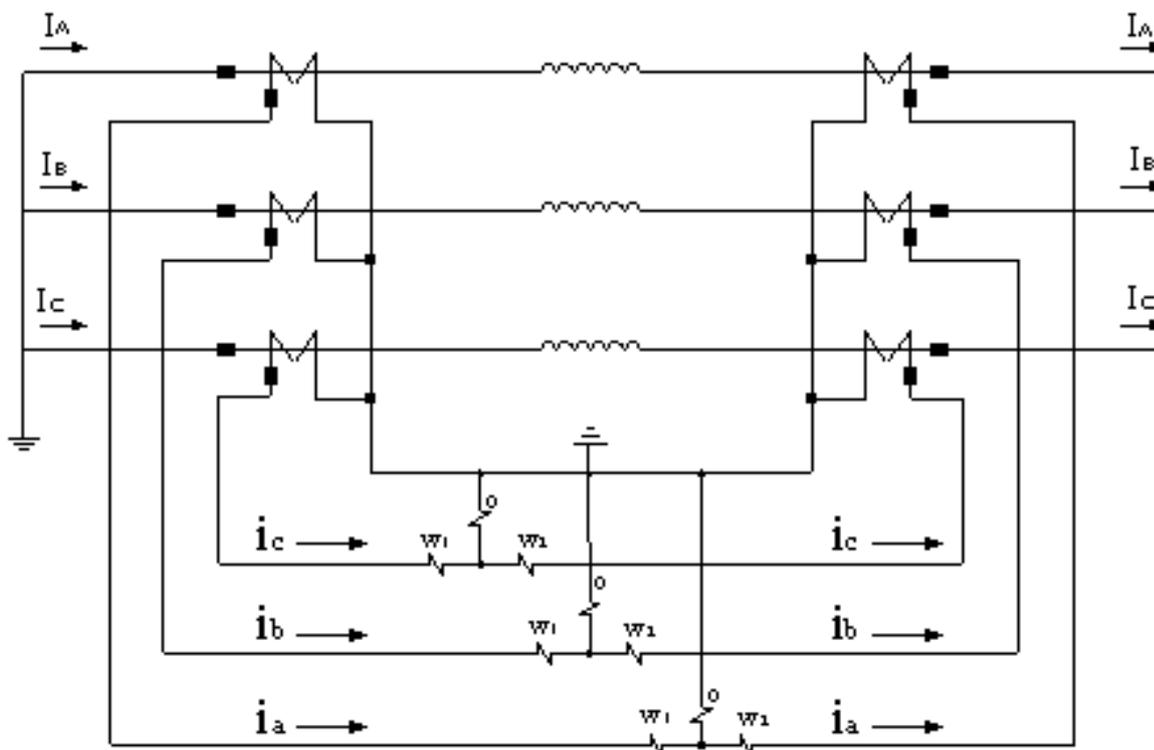


Protección de un generador con relevadores diferenciales de porcentaje

Inicialmente se puede considerar la conexión de la protección diferencial del generador en forma monofásica como se muestra en la figura siguiente.



Escuela Superior de Ingeniería Mecánica Y Eléctrica -- Ingeniería Eléctrica --- Protecciones uno
Sin embargo, con el fin de reducir el número de conductores y el consumo de energía en los secundarios de los TC de la protección diferencial del generador, se utiliza la conexión estrella para conectar los relevadores.



En condiciones normales la corriente en el cierre de la estrella es cero, es decir, no circula corriente por el hilo de retorno. Con este arreglo se ahorran dos conductores de retorno de los TC.

PROTECCIÓN DE TRANSFORMADORES DE POTENCIA

Para aplicar la protección diferencial de porcentaje a un transformador de potencia, se intercala un filtro de restricción de armónicas para evitar que el relevador opere cuando se excita el transformador, ya que la mayor parte de la corriente de excitación es de 2ª armónica.

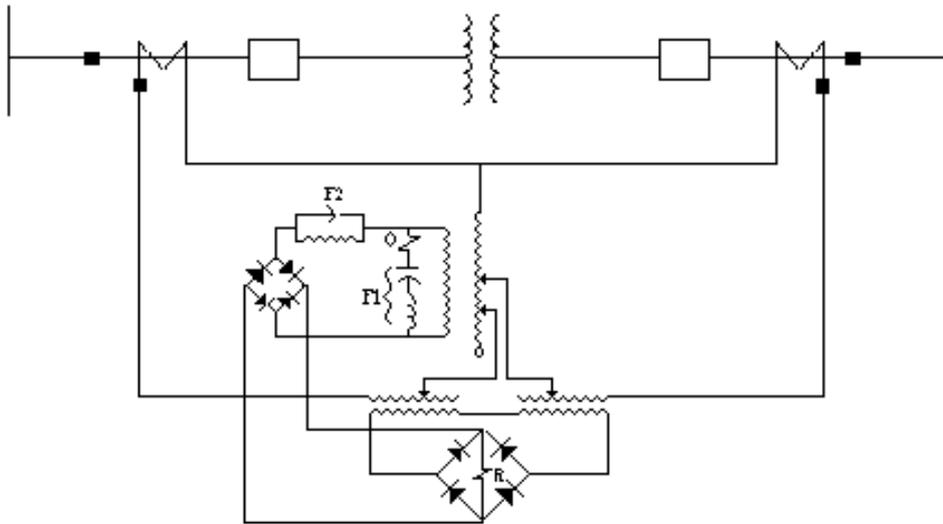


Diagrama elemental del relevador diferencial de porcentaje para transformador

- O - Bobina de operación
- R - Bobina de restricción
- F1 Filtro Resonante a 60 Hz.
- F2 - Filtro Resonante a la 2ª armónica (120Hz)

También se conectan TC auxiliares asociados a las bobinas de restricción, con el fin de compensar la corriente secundaria del T C de A. T. con la corriente secundaria del T. C. de B. T. y hacerlas aproximadamente iguales en su efecto sobre el relevador.

Se tiene diferente corriente en el lado de alta tensión con respecto al lado de baja tensión, es por esto que las relaciones de los TC deben ser diferentes en el caso de protección a bancos de transformadores; A menos que el transformador sea de relación 1:1.

1.- *Filtro de restricción de armónicas*: este filtro consta de dos circuitos resonantes, el primero es resonante a 60 Hz y se conecta en serie con la bobina de operación para bloquear el paso de las armónicas. El segundo filtro llamado “filtro de paso de 2ª armónica” se conecta en paralelo al primero y es resonante a 120 Hz para presentar baja impedancia y permitir el paso de la 2ª armónica. Este filtro sirve para evitar la operación incorrecta del relevador en el momento de excitar al Transformador de Potencia, ya que en estas condiciones se tienen corrientes solamente en un juego de TC y el porcentaje mayor de corriente corresponde a la 2ª armónica.

2.- *Transformadores de corriente auxiliares*: debido a que solo en raras ocasiones se pueden igualar las corrientes secundarias i_1 e i_2 al seleccionar las relaciones de los TC, los relevadores diferenciales para protección de bancos están provistos con transformadores de corriente auxiliares (TC aux.) asociados a las bobinas de restricción con taps de ajuste de relación, por medio de los cuales las corrientes de paso de la bobina de restricción pueden ser compensadas.

Estos diferentes taps de los TC aux. se muestran en la siguiente tabla:

W_1	W_2
2.9	2.9
3.2	3.2
3.5	3.5

3.8	3.8
4.2	4.2
4.6	4.6
5.0	5.0
8.7	8.7

Reglas generales para la conexión de la protección diferencial del Transformador

1.- La relación de los TC debe seleccionarse de manera que la corriente que llega a la bobina de restricción del relevador sea aproximadamente de 5 A.

2.- Por regla general los secundarios de los TC del lado Δ de un banco deben conectarse en Y, y los secundarios de los TC del lado Y del banco deben conectarse en Δ ; con el fin de compensar el defasamiento angular de 30° introducido por la conexión del banco y bloquear la corriente $3i_0$ en la protección diferencial en caso de fallas a tierra externas al banco.

3.- Los secundarios de los TC deben conectarse de manera que las corrientes secundarias de los TC de AT pasen por las bobinas de restricción y entren a los secundarios de los TC de BT para condiciones de carga balanceada.

4.- La relación de taps de los TC auxiliares deben estar lo mas cercano posible a la relación de corrientes que pasan por las bobinas de restricción.

De esta manera:

$$\frac{i_1}{i_2} = \frac{w_1}{w_2}$$

ó

$$\frac{i_2}{i_1} = \frac{w_2}{w_1}$$

5.- El % de error de ajuste del relevador no debe ser mayor de $\pm 5\%$ aplicando la siguiente fórmula:

$$\%E = \frac{\frac{w_1}{i_1} - \frac{w_2}{i_2}}{D} \times 100 \leq \pm 5\%$$

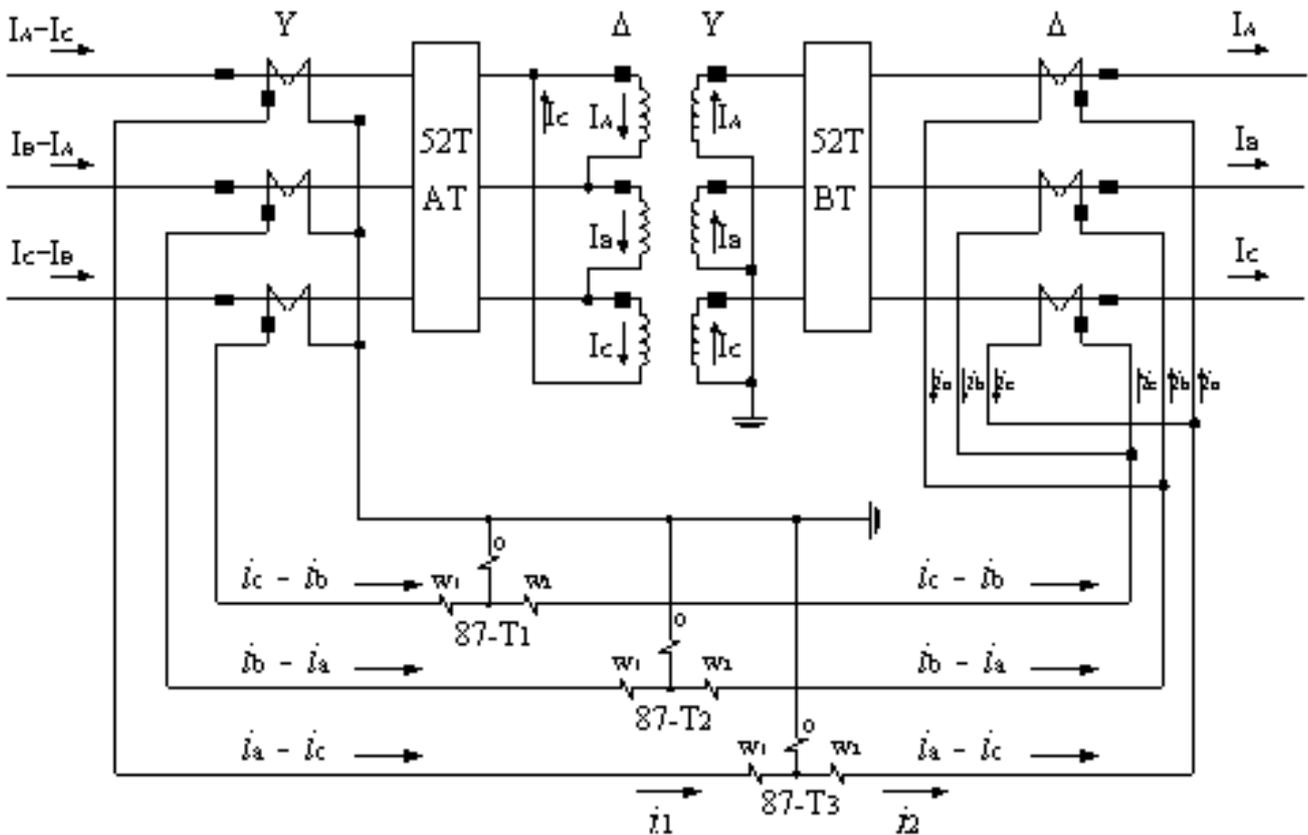
donde D es el menor de los dos cocientes.

6.- Para verificar la conexión correcta de la protección diferencial se hace un faseo de corrientes asignando primeramente los nombres a las corrientes en los devanados de AT y en función de ellas se determinan las corrientes que entran al banco por las tres fases de AT y las que salen del banco por las tres fases de BT.

7.- Se debe verificar que en condiciones normales de carga las corrientes que salen de los secundarios de los TC de AT pasen por las bobinas de restricción w_1 , w_2 y entren a los secundarios de los TC de BT.

EJEMPLOS DE APLICACIÓN

Conexión de la protección diferencial para un banco de 30 MVA de 85 kV / 23 kV conexión Δ / Y



Como el devanado de AT del transformador de potencia esta conectado en Δ, el secundario del TC se conecta en Y.

Tenemos el devanado de BT del transformador de potencia en Y, entonces los secundarios de los TC se conectan en Δ.

Esto con el fin de obtener el mismo ángulo ya que deben de estar en fase, si hay defasamiento habrá una corriente resultante que va a circular por la bobina de operación del relevador y puede llegar a operar condiciones no deseables.

Ajuste de los relevadores

Para llevar a cavo el ajuste de los relevadores se realiza la siguiente tabla de datos:

kV	I_p	k_{TC}	i_s	Conexión	$i_{relev.}$	tap	Error %
85	203.771	50	$i_{s1} = 4.075$	Y	$i_1 = 4.075$	$w_1 = 3.2$	2.415
23	753.066	160	$i_{s2} = 3.765$	Δ	$i_2 = 6.521$	$w_2 = 5.0$	

$$I_p = \frac{30 \times 10^6}{\sqrt{3} (85 \times 10^3)} = 203.771 \text{ A} \quad \text{se selecciona un TC de } 250 : 5 \text{ con } k_{TC} \text{ de } 50$$

$$I_p = \frac{30 \times 10^6}{\sqrt{3} (23 \times 10^3)} = 753.066 \text{ A} \quad \text{se selecciona un TC de } 800 : 5 \text{ con } k_{TC} \text{ de } 160$$

$$i_{s1} = \frac{203.771}{50} = 4.075 \text{ A}$$

$$i_{s2} = \frac{753.066}{160} = 4.707 \text{ A}$$

$$i_1 = i_{s1} = 4.075$$

$$i_2 = i_a - i_c = 4.707 \angle 0^\circ - 4.707 \angle 120^\circ$$

$$i_2 = 8.153 \angle -30^\circ$$

$$i_2 = \sqrt{3} i_{s2} \quad \text{por ser una } \Delta$$

Debido a que i_2 es muy alta se selecciona un TC con mayor relación

Seleccionando un TC 1000:5 ; $k_{TC} = 200$

$$i_{s2} = \frac{753.066}{200} = 3.765 \text{ A}$$

$$i_2 = \sqrt{3} i_{s2} = \sqrt{3} (3.765) = 6.521 \text{ A}$$

Ahora:

$$\frac{w_2}{w_1} = \frac{i_2}{i_1} \quad \text{se selecciona } w_2 = 5.0 \text{ y se calcula } w_1$$

$$\therefore w_1 = \frac{w_2 i_1}{i_2} = \frac{(5.0) (4.075)}{6.521} = 3.125$$

entonces se selecciona un tap de 3.2 (de la tabla de taps) ya que es el valor de los que se dispone mas cercano al calculado.

Ahora verificando el % de error:

$$\%E = \frac{\frac{w_1}{D} - \frac{i_1}{i_2}}{\frac{i_1}{i_2}} \times 100 = \frac{0.64 - 0.625}{0.625} \times 100 = 2.415 \%$$

Existe otra manera de seleccionar los taps de ajuste y es mediante la determinación del cociente de las corrientes calculadas y con este valor entrar a la tabla de taps que se muestra a continuación:

	2.9	3.2	3.5	3.8	4.2	4.6	5.0	8.7
2.9	1.000	1.103	1.207	1.310	1.448	1.586	1.724	3.000
3.2		1.000	1.094	1.188	1.313	1.438	1.563	2.719
3.5			1.000	1.086	1.200	1.314	1.429	2.486
3.8				1.000	1.105	1.211	1.316	2.289
4.2					1.000	1.095	1.190	2.071
4.6						1.000	1.087	1.891
5.0							1.000	1.740
8.7								1.000

de esta manera se calcula el cociente de corrientes considerando ahora que el valor mayor estará en la parte de arriba en la relación:

$$\frac{i_2}{i_1} = \frac{6.521}{4.075} = 1.600$$

entonces con este valor se entra a la tabla ya mostrada y se selecciona el valor mas cercano a 1.600 que es, 1.586 y que corresponde a 4.6/2.9. Así se obtienen w_1 y w_2 .

Se deduce entonces que:

$$w_2 = 4.6$$

$$w_1 = 2.9$$

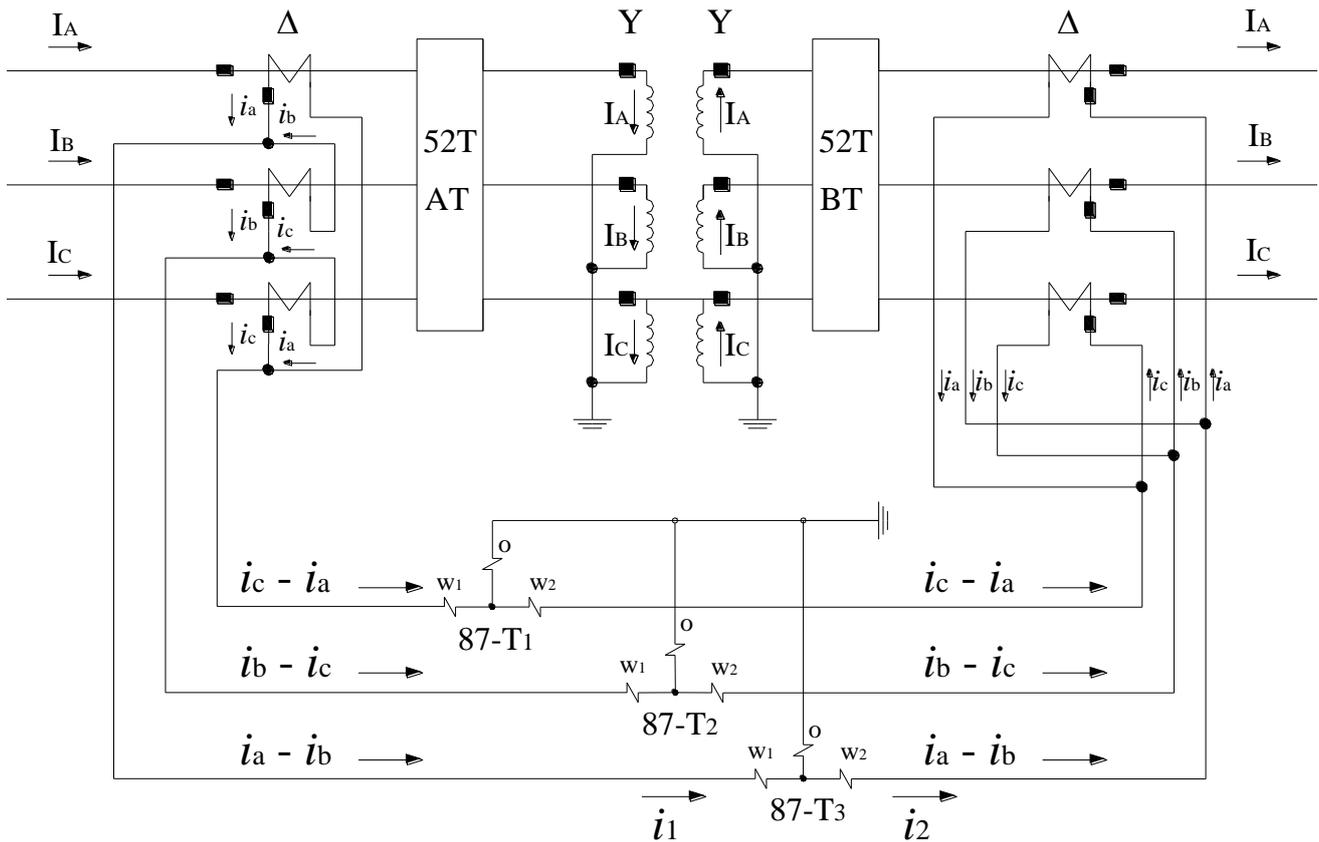
considerando el mismo criterio establecido para la relación de corrientes, en donde ahora w_2 será el mayor.

Con estos nuevos valores de ajuste se calcula ahora el % de error:

$$\%E = \frac{w_1 - i_1}{D} \times 100 = \frac{2.9 - 4.075}{0.625} \times 100 = 0.885 \%$$

obteniéndose así un % de error mas pequeño por este método (usando la tabla de relación de taps)

Conexión de la protección diferencial para un banco de 30 MVA de 230 kV / 23 kV conexión Y / Y



Como el devanado de AT del transformador de potencia está conectado en Y, el secundario del TC se conecta en Δ.

Tenemos el devanado de BT del transformador de potencia en Y, entonces los secundarios de los TC se conectan en Δ.

Esto con el fin de obtener el mismo ángulo ya que deben de estar en fase, si hay defasamiento, habrá una corriente diferencial que hará que el relevador opere indebidamente.

Ajuste de los relevadores

Para llevar a cabo el ajuste de los relevadores se realiza la siguiente tabla de datos:

kV	I_p	k_{TC}	i_s	Conexión	$i_{relev.}$	tap	Error %
230	75.307	20	$i_{s1} = 3.765$	Δ	$i_1 = 6.522$	$w_1 = 5.0$	0.0
23	753.066	200	$i_{s2} = 3.765$	Δ	$i_2 = 6.522$	$w_2 = 5.0$	

$$I_p = \frac{30 \times 10^6}{\sqrt{3} (230 \times 10^3)} = 75.307 \text{ A}$$

se selecciona un TC de 100 : 5 con k_{TC} de 20

$$I_p = \frac{30 \times 10^6}{\sqrt{3} (23 \times 10^3)} = 753.066 \text{ A}$$

se selecciona un TC de 800 : 5 con k_{TC} de 160

$$i_{s1} = \frac{75.307}{20} = 3.765 \text{ A}$$

$$i_{s2} = \frac{753.066}{160} = 4.707 \text{ A}$$

$$i_{1REL} = i_1 = i_s \angle 0^\circ - i_s \angle 120^\circ = \sqrt{3} i_s = \sqrt{3} (3.765) = 6.522 \text{ A} \quad \text{por ser una } \Delta$$

$$i_{2REL} = i_2 = i_s \angle 0^\circ - i_s \angle 120^\circ = \sqrt{3} i_s = \sqrt{3} (4.707) = 8.152 \text{ A} \quad \text{por ser una } \Delta$$

Como esta corriente (i_2) es muy grande para el relevador (>5A), se selecciona un TC con mayor relación

Seleccionando un TC 1000:5 con $k_{TC} = 200$

$$i_{s2} = \frac{753.066}{200} = 3.765 \text{ A}$$

$$i_{2REL} = i_2 = i_s \angle 0^\circ - i_s \angle 120^\circ = \sqrt{3} i_s = \sqrt{3} (3.765) = 6.522 \text{ A} \quad \text{por ser una } \Delta$$

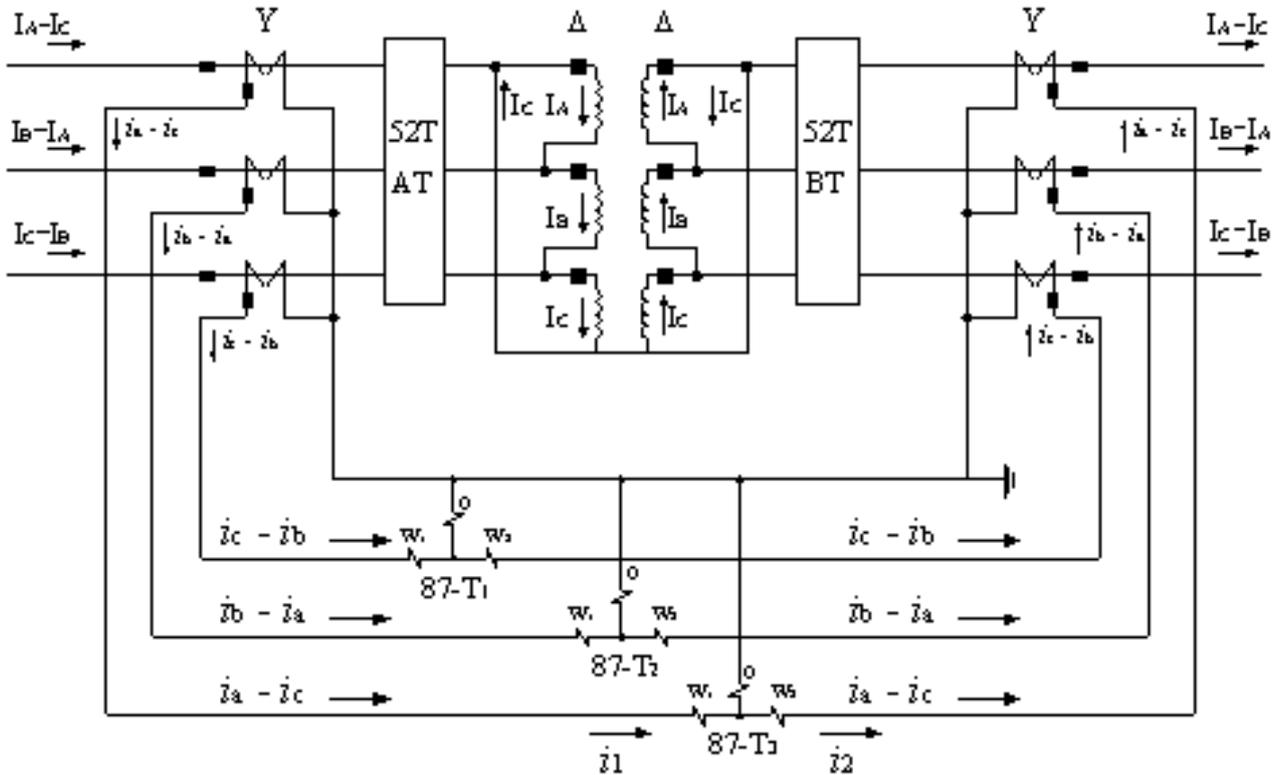
Ahora:

$$\frac{w_2}{w_1} = \frac{i_2}{i_1} \quad \text{se selecciona } w_1 = 5.0 \text{ y se calcula } w_2$$

$$\therefore w_2 = \frac{w_1 i_2}{i_1} = \frac{(6.522) (5.0)}{6.522} = 5.0$$

de esto se deduce que como las corrientes son iguales los taps también lo son, y al ser iguales ambos cocientes el porcentaje de error es cero.

**Conexión de la protección diferencial para un banco de 10 MVA de 85 kV / 6.3 kV
conexión Δ / Δ**



Como el devanado de AT del transformador de potencia esta conectado en Δ, el secundario del TC se conecta en Y.

Tenemos el devanado de BT del transformador de potencia en Δ, entonces los secundarios de los TC se conectan en Y.

Esto con el fin de obtener el mismo ángulo ya que deben de estar en fase, si hay defasamiento esa corriente la verá la bobina de operación del relevador y puede llegar a operar, estando en condiciones no deseables de operación.

Ajuste de los relevadores

Para llevar a cabo el ajuste de los relevadores se realiza la siguiente tabla de datos:

KV	I_p	k_{TC}	i_s	Conexión	$i_{relev.}$	tap	Error %
85	67.924	20	$i_{s1} = 3.396$	Y	$i_1 = 3.396$	$w_1 = 3.8$	0.0
6.3	916.429	200	$i_{s2} = 4.582$	Y	$i_2 = 4.582$	$w_2 = 5.0$	

$$I_p = \frac{10 \times 10^6}{\sqrt{3} (85 \times 10^3)} = 67.924 \text{ A} \quad \text{se selecciona un TC de } 75 : 5 \text{ con } k_{TC} \text{ de } 15$$

$$I_p = \frac{10 \times 10^6}{\sqrt{3} (6.3 \times 10^3)} = 916.429 \text{ A} \quad \text{se selecciona un TC de } 1000 : 5 \text{ con } k_{TC} \text{ de } 200$$

$$i_{s1} = \frac{67.924}{15} = 4.528 \text{ A}$$

$$i_{s2} = \frac{916.429}{200} = 4.582 \text{ A}$$

$$i_{1REL} = i_1 = i_{s1} = 4.528 \text{ A} \quad \text{por ser una estrella}$$

$$i_{2REL} = i_2 = i_{s2} = 4.582 \text{ A} \quad \text{por ser una estrella}$$

Ahora:

$$\frac{w_2}{w_1} = \frac{i_2}{i_1} \quad \text{se selecciona } w_1 = 5.0 \text{ y se calcula } w_2$$

$$\therefore w_2 = \frac{w_1 i_2}{i_1} = \frac{(4.582) (5.0)}{4.528} = 5.059$$

no hay tap de este valor, el mas cercano es 5.0, por lo tanto también se elige de 5.0

Con estos valores de ajuste se calcula ahora el % de error:

$$\%E = \frac{\frac{w_1}{w_2} - \frac{i_1}{i_2}}{D} \times 100 = \frac{\frac{5.0}{5.0} - \frac{4.582}{4.528}}{1} \times 100 = -1.193 \%$$

No importa que el error sea un valor negativo, se consideran valores absolutos.

El error calculado es aceptable y los ajustes son los adecuados, pero para ejemplificar mejor el problema, se usara ahora un TC con relación de 100:5 del lado de alta tensión.

Con un TC relación 100:5 se tiene $k_{TC} = 20$

$$i_{s1} = \frac{67.924}{20} = 3.396 \text{ A}$$

Ahora, el ajuste:

$$\frac{w_2}{w_1} = \frac{i_2}{i_1} \quad \text{se selecciona } w_2 = 5.0 \text{ y se calcula } w_1$$

$$\therefore w_1 = \frac{w_2 i_1}{i_2} = \frac{(5.0) (3.396)}{4.582} = 3.706$$

Se selecciona entonces un tap de 3.8 de acuerdo a los taps normalizados ya mencionados en la tabla. Para este calculo ahora se propuso a w_2 como valor establecido, esto porque la corriente i_2 es la mayor y se debe seguir la relación.

Con estos valores de corriente y taps se calcula ahora el error:

$$\%E = \frac{\frac{w_2}{w_1} - \frac{i_2}{i_1}}{D} \times 100 = \frac{\frac{5.0}{3.8} - \frac{4.582}{3.396}}{\frac{5.0}{3.8}} \times 100 = - 2.542 \%$$

El resultado también ha sido aceptable.