

Capítulo 8 Protección de las máquinas síncronas

8.1 Generalidades

La misión de las protecciones de los generadores de las centrales eléctricas es doble; por una parte evitar que aparezcan defectos en los mismos, y por otra limitar las consecuencias de éstas al mínimo.

Las causas que producen averías o defectos en los generadores pueden ser múltiples, por ejemplo:

- envejecimiento de los aislantes,
- defectos de aislamientos de cables, máquinas, etc.,
- sobretensiones de origen atmosférico,
- sobretensiones de maniobra en las redes,
- objetos extraños en la máquina,
- sobrecargas de larga duración.

Para proteger a los generadores de estas averías o defectos en los generadores se dispone de una serie de dispositivos de protección contra:

- defectos interiores a masa, entre espiras, entre fases, etc.,
- sobrecargas,
- sobretensiones internas,
- desequilibrio de carga,
- apertura de la excitación accidental,
- incendios.

Las protecciones que se usan en los generadores (figura 8.1.1) se clasifican básicamente en dos tipos: protecciones propias y protecciones externas.

Las *protecciones propias* están constituidas por:

- la protección de sobrevelocidad (12),
- la protección de temperatura de cojinetes (38),
- la protección de temperatura de bobinados (49).

Las *protecciones externas* están constituidas por:

- la protección de máxima tensión (59),
- la protección de máxima y mínima frecuencia (81),
- la protección de distancia (reserva) (21),
- la protección diferencial (87),
- la protección de mínima excitación (40),
- la protección de inversión o desequilibrio de fases (46),
- la protección de sobrevelocidad (12),
- la protección de faltas a tierra en el estator (64 N),
- la protección de faltas a tierra del rotor (64 F).

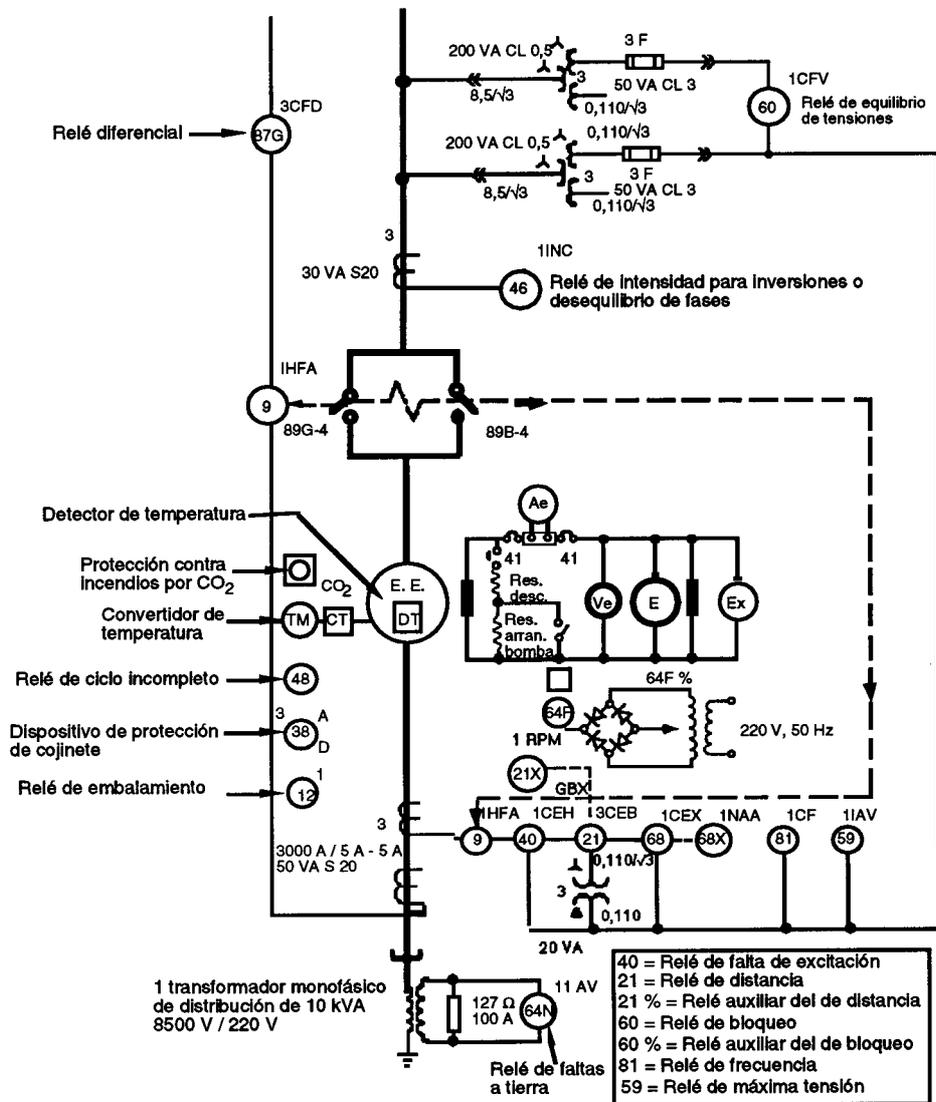


Fig. 8.1.1 Esquema unifilar de las protecciones de un generador.

Se ha de tener en cuenta que la eliminación de un defecto que afecte a los devanados del alternador exige, no solamente su desconexión inmediata de la red, sino también la supresión, tan rápida como sea posible, de la f.e.m interna. Para ello se cierra el devanado de excitación sobre una resistencia de desconexión (la resistencia *Res. desc.* de la figura 8.1.1) y a continuación abriendo el interruptor de la excitatriz.

El grado de protección (implica costes económicos) de un generador está relacionado con la importancia del mismo dentro del sistema (la potencia del generador). Es por ello por lo que en la práctica los dispositivos de protección que se emplean varían de unos generadores a otros según el intervalo de potencia donde se encuentren ubicados. Las protecciones habituales con que se dotan a los alternadores de potencias nominales inferiores a los 5 MW, comprendidas entre los 20 MW y 100 MW y mayores de 300 MW, aparecen representadas en las figuras 8.1.2, 8.1.3 y 8.1.4 respectivamente.

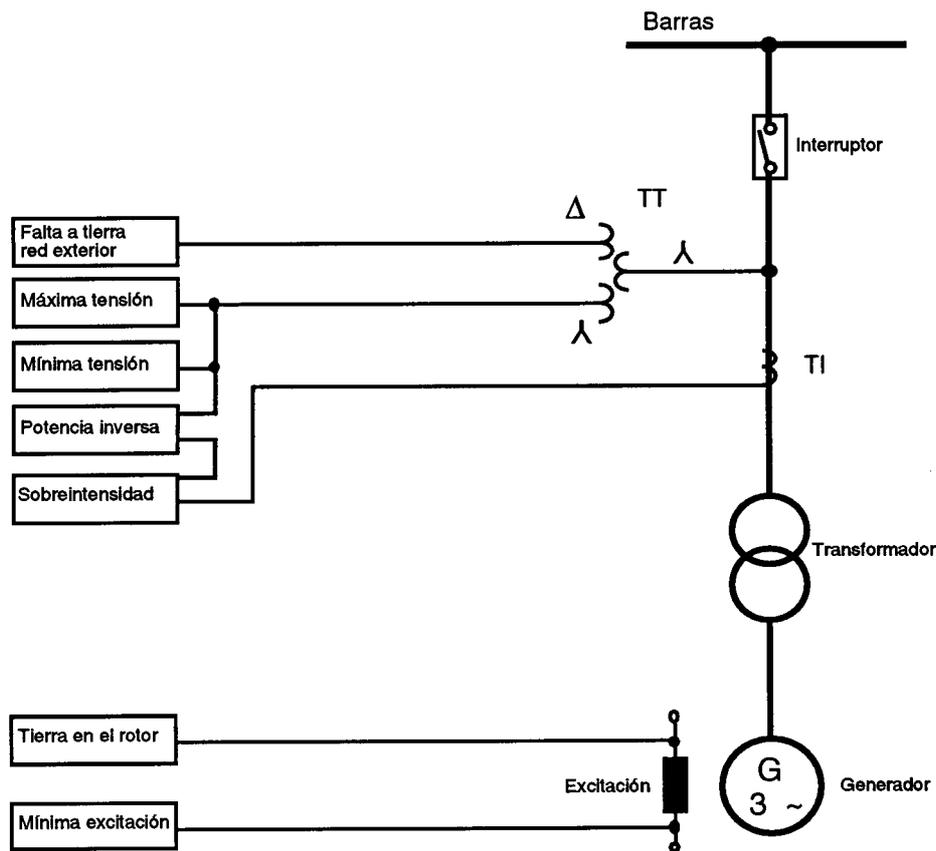


Fig. 8.1.2 Protecciones de los generadores de $S_n < 5 \text{ MW}$.

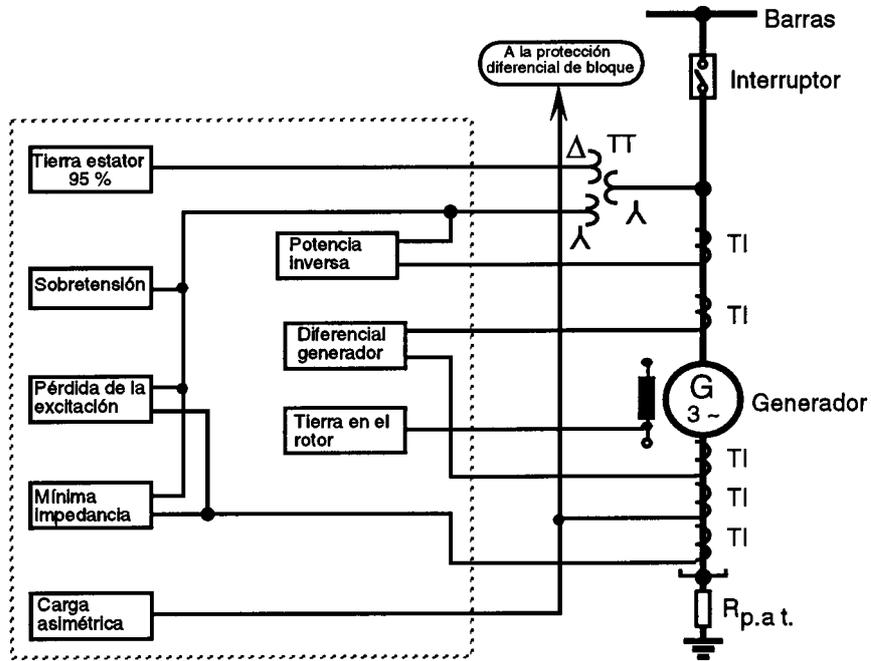


Fig. 8.1.3 Protecciones de los generadores de $20 \leq S_n \leq 100$ MW.

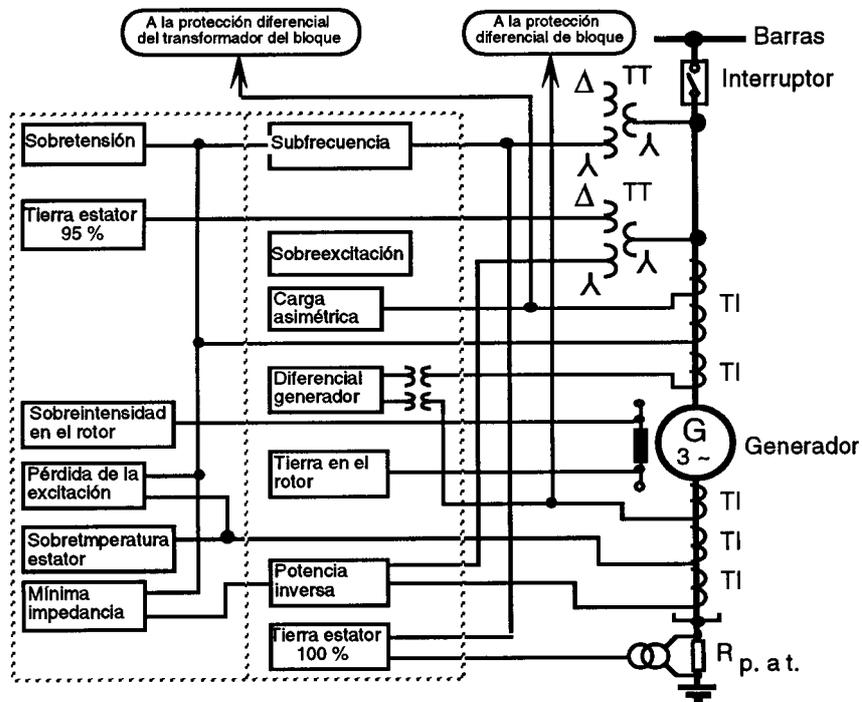


Fig. 8.1.4 Protecciones de los generadores de $S_n > 100$ MW.

8.2 Protección contra los defectos entre espiras

a) Protección de los cortocircuitos entre espiras en máquinas con un arrollamiento por fase.

Se basa en la reducción de tensión que aparece en la fase afectada por el cortocircuito de alguna de sus espiras. La diferencia de potencial entre el neutro de los arrollamientos del generador y el neutro de las tensiones en bornes del generador sirve para alimentar, en caso de defecto, un relé de máxima tensión con un filtro para los armónicos de tercer orden (figura 8.2.1).

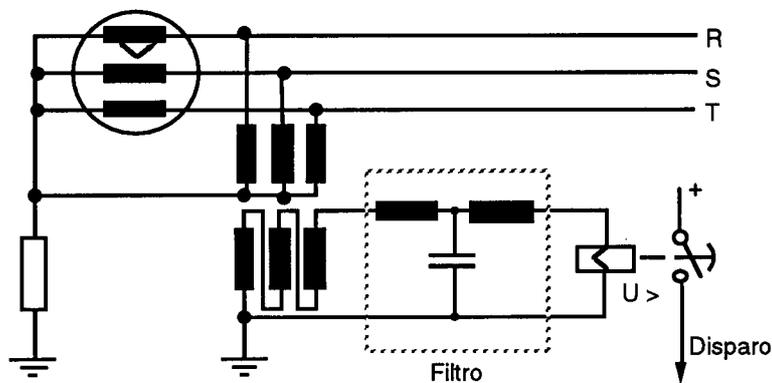


Fig. 8.2.1 Protección contra cortocircuitos entre espiras a partir de un relé de sobretensión y filtro para los armónicos de tercer orden.

b) Protección de los cortocircuitos entre espiras en máquinas con varios arrollamientos por fase y neutro aislado.

En este caso, para detectar el defecto se mide la circulación de corriente entre las dos bobinas tal como se indica en la figura 8.2.2.

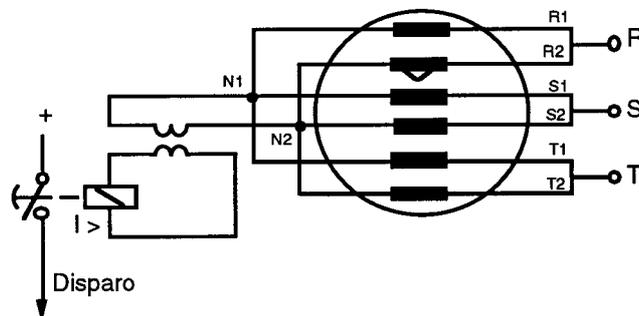


Fig. 8.2.2 Protección contra cortocircuitos entre espiras en máquinas con varios arrollamientos por fase y neutro aislado a partir de un relé de sobreintensidad entre los dos puntos neutros N_1 y N_2 de los dos grupos de arrollamientos.

- c) Protección de los cortocircuitos entre espiras en máquinas con varios arrollamientos por fase y neutro puesto a tierra.

En este caso se pueden dar varias soluciones. Una de ellas consiste en realizar la puesta a tierra a través de un transformador cuyos extremos del primario están unidos a los puntos neutros N_1 y N_2 de los dos arrollamientos, y cuyo secundario alimenta un relé de corriente. Cuando las intensidades de corriente por los dos arrollamientos de la misma fase son idénticas, las f.m.m. de los semidevanados primarios se compensan, por lo que por el devanado secundario no circula ninguna corriente (figura 8.2.3).

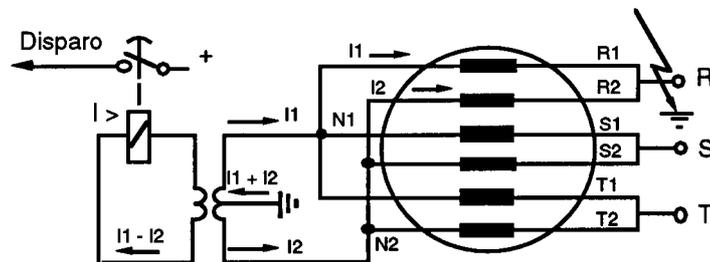


Fig. 8.2.3 Protección contra cortocircuitos entre espiras en máquinas con varios arrollamientos por fase y neutros N_1 y N_2 puestos a tierra a través del arrollamiento primario de un transformador, cuyo secundario alimenta un relé de corriente.

Otras soluciones consisten en emplear protecciones diferenciales bien sean longitudinales (figura 8.2.4) o transversales (figura 8.2.5).

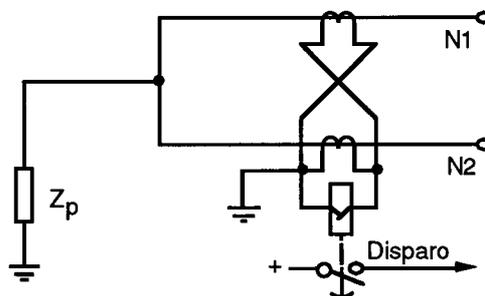


Fig. 8.2.4 Protección diferencial transversal contra cortocircuitos entre espiras en máquinas con varios arrollamientos por fase y neutros N_1 y N_2 puestos a tierra a través de una impedancia.

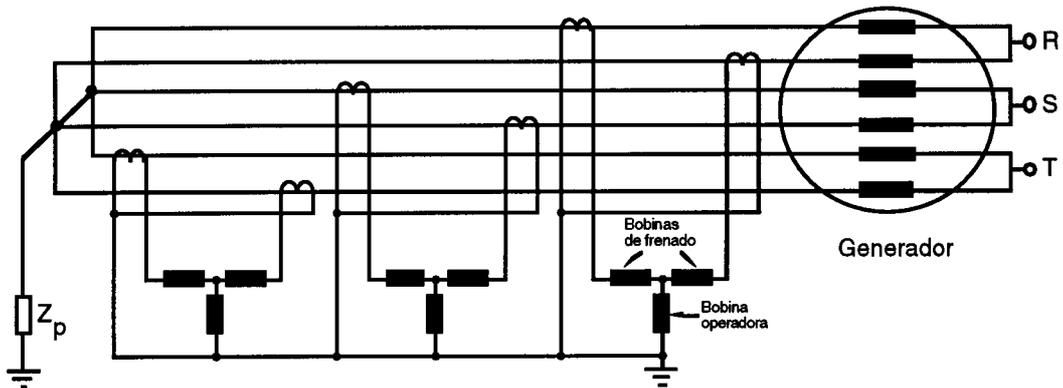


Fig. 8.2.5 Protección diferencial longitudinal contra cortocircuitos entre espiras en máquinas con varios arrollamientos por fase y neutros N_1 y N_2 puestos a tierra a través de una impedancia.

8.3 Protección contra los defectos entre fases

Para la protección contra los defectos entre fases en los alternadores se emplea la protección diferencial longitudinal. Dicha protección puede ser separada para el generador y el transformador (figura 8.3.1) o conjunta para ambos, es decir, lo que se designa como protección de bloque (figura 8.3.2).

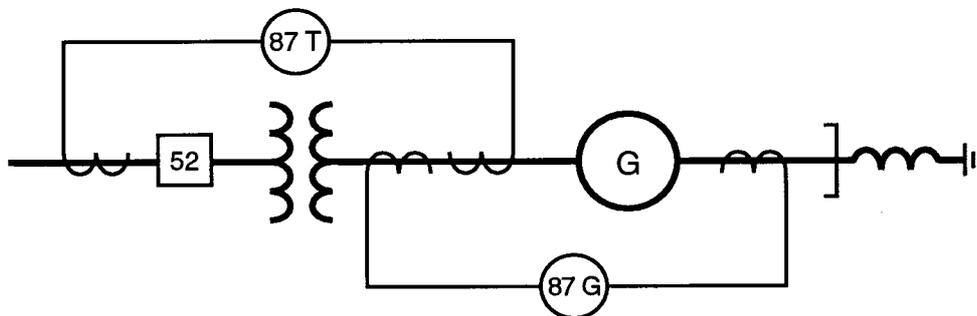


Fig. 8.3.1 Protección diferencial de un generador y un transformador separadamente.

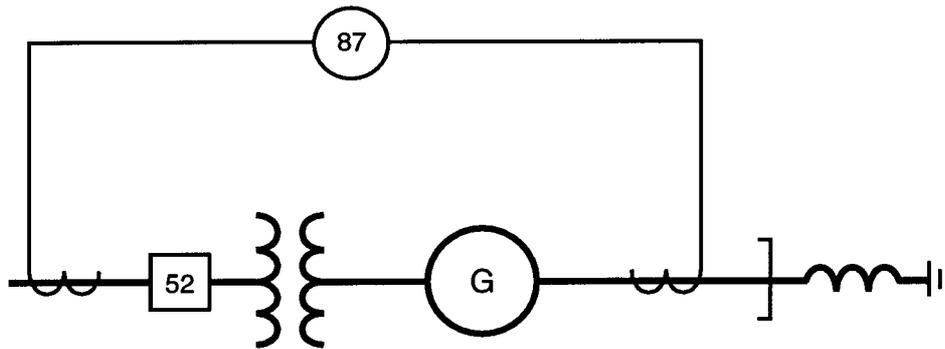


Fig. 8.3.2 Protección diferencial de un generador y un transformador conjuntamente; protección del bloque.

También se puede utilizar una protección diferencial que abarque al generador, al transformador y a las barras de la central. Sin embargo, lo más habitual en las grandes instalaciones es el uso de sendas protecciones diferenciales para el generador, el transformador y las barras.

8.4 Protección contra los defectos a tierra

Los defectos a tierra de los devanados estatóricos son la avería más frecuente en los generadores de corriente alterna trifásicos, y suelen ser el origen de posteriores contactos entre espiras y entre fases, lo que supone graves daños para el generador. Para evitar estos nocivos efectos es preciso que la protección cumpla las siguientes condiciones:

- Que detecte los contactos a tierra en todo el devanado.
- Que desconecte el generador y su excitación lo más rápidamente posible.
- Que se limiten las corrientes a tierra para evitar daños en la chapa del estator (< 30 A).
- Que sea insensible frente a perturbaciones y contactos a tierra en la red.

Para conseguir una baja intensidad de la corriente de defecto es aconsejable trabajar con el neutro del generador aislado o puesto a tierra través de una impedancia de alto valor.

En la figura 8.4.1 se representa el esquema unifilar de la protección de un defecto a tierra de los devanados del estator mediante un relé de tensión. Generalmente se limita la intensidad de la corriente de defecto a tierra a unos 10 A (medidos en el primario del transformador).

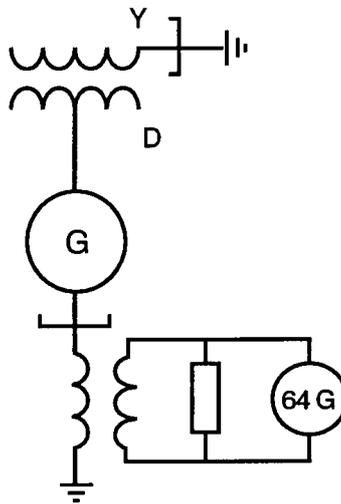


Fig. 8.4.1 Esquema unifilar de la protección de defecto a tierra de los devanados del estator mediante un relé de tensión.

En la figura 8.4.2 se observa que cuanto menor sea el nivel de ajuste del relé de tensión mayor será la zona protegida del arrollamiento.

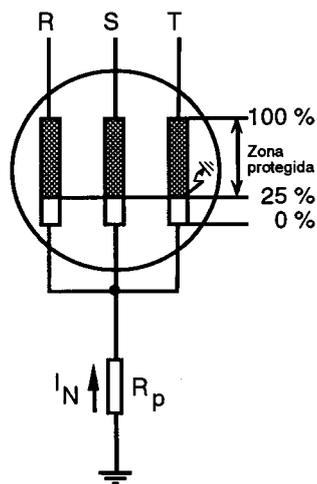


Fig. 8.4.2 Zona protegida de los devanados del estator de un generador en función de la tensión de ajuste del relé de tensión de la protección de defecto a tierra de los devanados del estator.

Para evitar que los armónicos de corriente del neutro disparen de una forma intempestiva la protección, estos dispositivos han de incorporar un filtro que los elimine.

Otro posible sistema de protección del contacto a tierra del estator es la protección diferencial de neutro (figura 8.4.3).

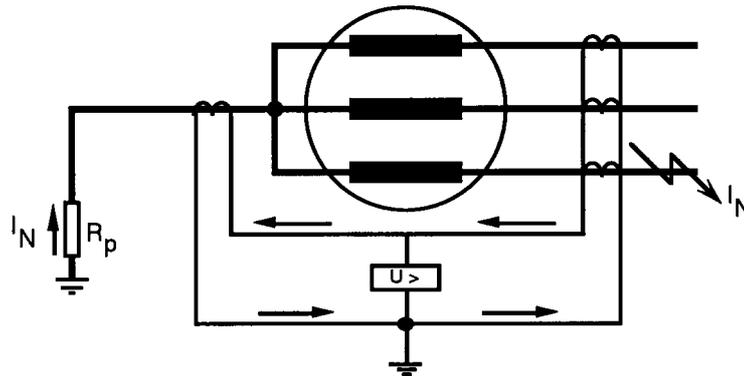


Fig. 8.4.3 Esquema de principio de una protección diferencial de neutro.

Los sistemas anteriormente descritos presentan el inconveniente de que, si la falta es muy próxima al centro de la estrella, puede ocurrir que no la detecten. Para paliar este defecto se han implementado los sistemas anteriores.

A tal fin, se suele utilizar el hecho de que la intensidad del armónico de tercer orden de la corriente disminuye a medida que el contacto a tierra se produce más próximo al neutro.

Normalmente estas protecciones trabajan en dos niveles. Un primer nivel, con un relé de máxima tensión que cubre el intervalo entre el 0 y el 95 %, midiendo la tensión en la resistencia de puesta a tierra y con un filtro de rechazo del tercer armónico, y un segundo nivel entre el 95 % y el 100 % con un relé de mínima tensión, que dispone de un circuito que amplifica la tensión del tercer armónico, de modo que cuando la intensidad del tercer armónico de la corriente es prácticamente nula y, además, la tensión de servicio (figura 8.4.4) es la nominal (esta condición evita falsos disparos cuando la máquina está parada o se encuentra regulando velocidad), en tal caso actúa la protección en el intervalo 95 % a 100 %.

La protección de falta a tierra en el rotor de un generador síncrono se utiliza por lo general como alarma, dado que un solo contacto a tierra no produce por sí mismo una perturbación en la explotación del generador. Sin embargo, con la aparición del segundo contacto a tierra parte del arrollamiento inductor queda fuera de servicio, lo que ocasiona distorsiones del flujo en los polos, produciéndose esfuerzos asimétricos sobre el eje y vibraciones que pueden ocasionar graves perjuicios a la máquina. Existen varios métodos para detectar el

primer contacto a tierra: Método del potenciómetro, método de inyección de corriente continua y método de inyección de corriente alterna.

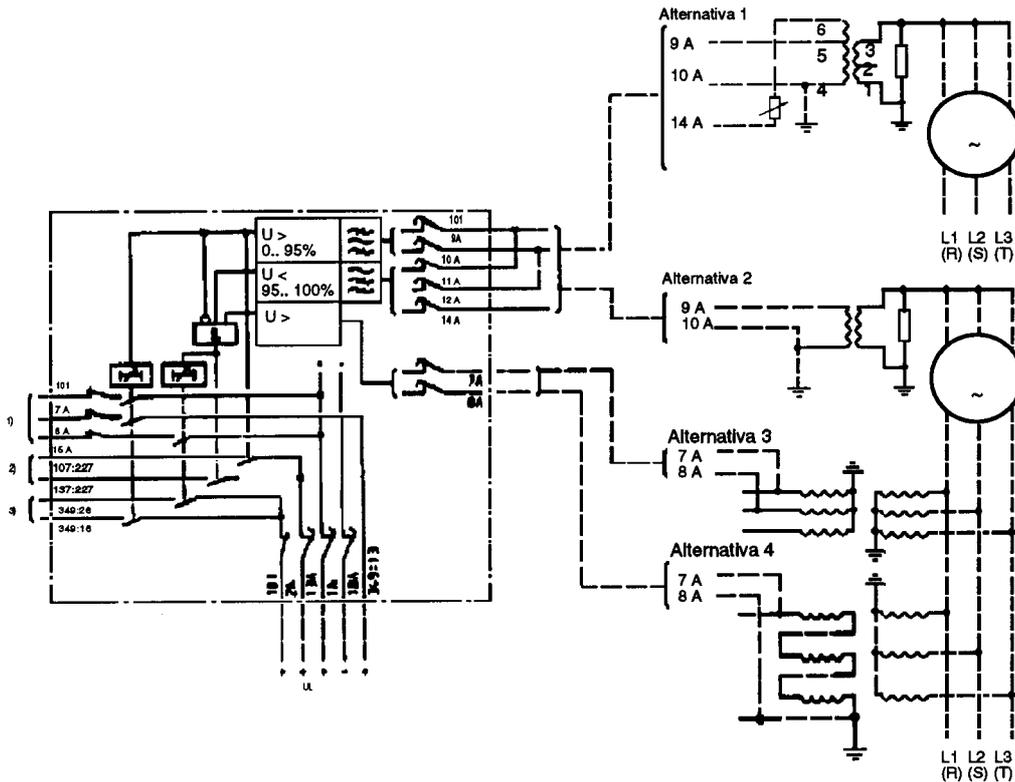


Fig. 8.4.4 Esquema de una protección (100 %) de contacto a tierra de los devanados del estator de un generador mediante un relé tipo RAGEA de ABB, con supervisión de tensión.

8.5 Protección contra las sobrecargas

Los alternadores modernos están proyectados y diseñados para poder resistir durante un tiempo apreciable las fuertes corrientes de cortocircuito. Por lo que su protección de sobrecorrientes no debe intervenir para cortar estas corrientes de cortocircuito, misión encomendada a las protecciones selectivas de las diversas partes de la red, salvo en el caso de que éstas fallen. La protección contra sobrecorrientes se realiza por medio de relés de corriente máxima temporizados.

Cuando se debe proteger un generador contra sobrecargas prolongadas y se quiere obtener de él toda la potencia que sea capaz de dar sin que se produzcan averías por sobrecalentamiento de sus devanados por encima de los límites normalizados, hay que recurrir al empleo de detectores de temperatura (pares termoelectrónicos) colocados en puntos convenientes del generador, una de cuyas salidas se lleva a un relé de sobretemperatura (designación 49, por ejemplo, un IRT51G de GE, temporización del orden de los 5 minutos). Sin embargo con mayor frecuencia se emplean relés térmicos de imagen térmica, con una constante de tiempo de calentamiento sensiblemente igual a la de la máquina. Estos relés pueden indicar la temperatura, accionar una señal de alarma o pueden provocar la desconexión del alternador.

8.6 Protección contra las sobretensiones

Los alternadores pueden trabajar, por ejemplo, con una sobretensión del 10 % de la nominal durante 30 minutos, o una sobretensión máxima del 25 % durante un periodo de tiempo de 6 segundos a 12 segundos. La protección contra las sobretensiones se realiza mediante relés de máxima tensión con características de tiempo inverso e instantáneo (designación 59). Actualmente esta protección contra las sobretensiones se instala, no sólo en los alternadores accionados por turbinas hidráulicas, por el peligro de embalamiento de estas máquinas en casos de brusca descarga y mal funcionamiento del regulador de velocidad, sino que también en los turboalternadores para prevenir los fallos de actuación de los reguladores de tensión, ya que las grandes reactancias transitorias que poseen pueden originar en caso de desconexión en carga tensiones transitorias muy elevadas próximas a las máximas admitidas por el generador.

8.7 Protección contra los desequilibrios de carga

Cualquier asimetría de la carga produce corrientes de secuencia inversa. El campo creado por las corrientes de secuencia inversa gira en sentido contrario al campo principal y, por tanto, contrario también al sentido de giro del rotor, induciendo en los arrollamientos de éste (excitación y amortiguador) y en su núcleo corrientes de frecuencia doble de la de la red, que provocan pérdidas suplementarias en el rotor y pueden originar, si el desequilibrio es importante y se mantiene durante un largo periodo de tiempo, calentamientos peligrosos del rotor.

Los turbogeneradores son especialmente sensibles a las cargas asimétricas. En los alternadores de gran potencia no pueden aceptarse corrientes inversas que sobrepasen permanentemente un 6 % de la corriente nominal (e incluso un 4%) en los turboalternadores y de un 12 a un 20 % de los alternadores de polos salientes.

Se protege el alternador contra los defectos de campo inverso instalando un relé sensible a la componente inversa (designación 46) con una característica $I_2^2 \cdot t = K$ por debajo de la capacidad del generador. La ejecución más empleada es el relé de dos etapas. La respuesta de la primera etapa consiste en una señalización retardada ante una asimetría leve. En la segunda etapa se produce un disparo retardado en el caso de fuertes asimetrías.

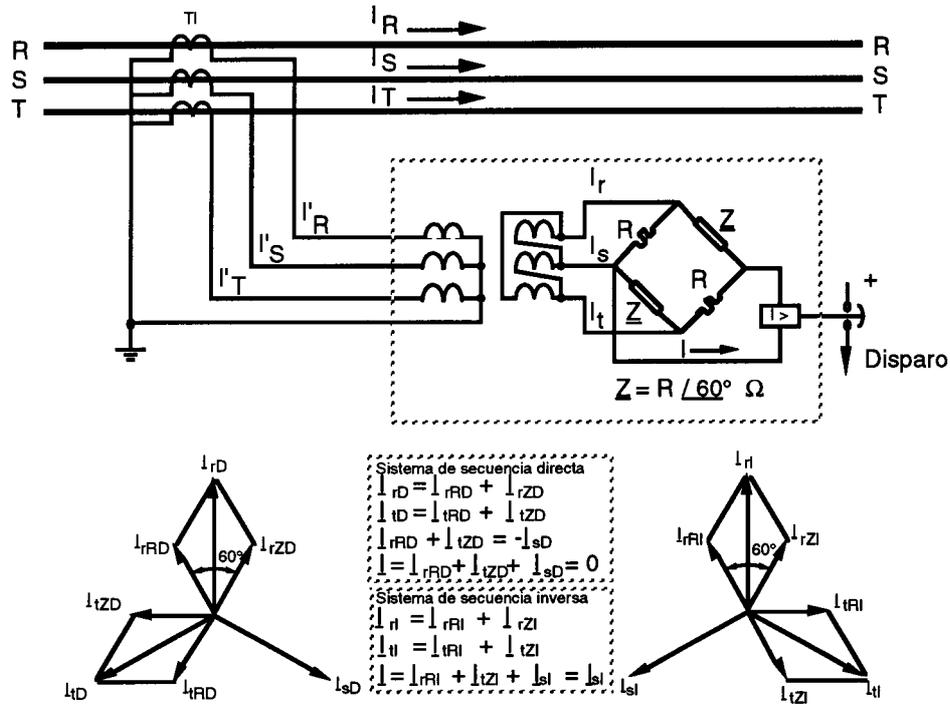


Fig. 8.7.1 Esquema de principio de un relé de cargas asimétricas.

8.8 Protección contra la potencia inversa

La protección contra la potencia inversa tiene como misión separar el generador de la red cuando éste actúe como motor arrastrando a la turbina de vapor. En este estado la turbina puede estar sometida a esfuerzos anormales. La potencia absorbida por las turbinas de vapor es muy reducida y varía entre un 3% y un 5% de la potencia nominal según el tipo de turbina.

En las protecciones electrónicas modernas, la potencia inversa puede ajustarse hasta un 0,5 % de la potencia activa nominal y con un retardo considerable, dependiendo del tiempo de cierre rápido de las válvulas de la turbina.

Dado que el funcionamiento del generador como motor es equilibrado, la protección de potencia inversa puede conseguirse con un relé direccional de potencia activa monofásico, con temporización ajustable de 1 a 30 segundos (designación 32G, por ejemplo, un GGP53C de GE) (figura 8.8.1).

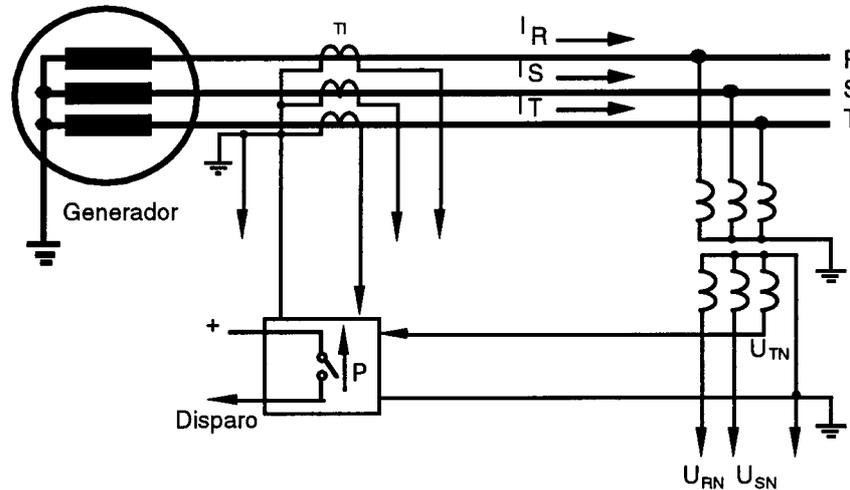


Fig. 8.8.1 Relé de potencia inversa.

8.9 Protección contra la falta de excitación

La supresión accidental de la corriente de excitación en un alternador puede producir la pérdida de sincronismo entre él y resto de los generadores síncronos de la red. El generador absorbe de la red la potencia reactiva que necesita para la excitación. Además, el funcionamiento del alternador como generador asíncrono provoca la circulación de una corriente en los polos del rotor, que puede ocasionar un calentamiento considerable del mismo. Por ello, cuando se presenta esta circunstancia es necesario desconectar el interruptor del alternador. En los generadores pequeños, cuando se instala una protección contra la subexcitación suele ser un relé de mínima intensidad en serie con el arrollamiento del rotor, o alimentado por un shunt en serie con el indicado arrollamiento (figura 8.9.1).

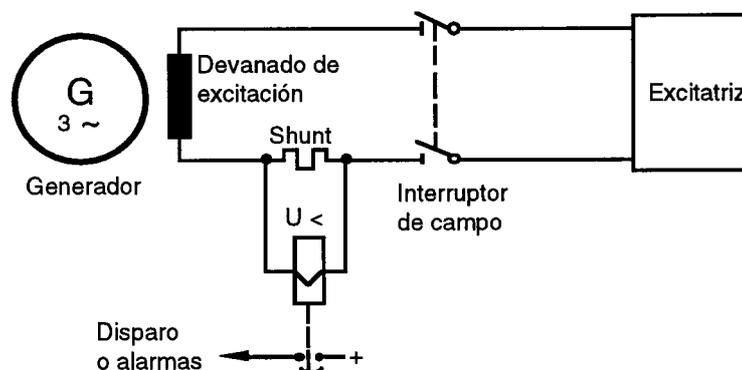


Fig. 8.9.1 Principio de funcionamiento de una protección contra subexcitación.

En los grandes alternadores se utiliza un relé de impedancia de ángulo instalado en los terminales del estator.

8.10 Protección contra los incendios

Esta protección se hace indispensable en todos los alternadores de elevada potencia. El principio de funcionamiento es el siguiente: En el momento en que el generador es desconectado de los bornes a causa de algún defecto interior, unos relés provocan la apertura de las válvulas de cierre de las botellas de acero que contienen el gas extintor a presión (por ejemplo, anhídrido carbónico), por lo que éste penetra en el circuito de refrigeración inundándolo.

8.11 Bibliografía

- [1] Buchhold-Happoldt: *Centrales y redes eléctricas*. Editorial Labor. Barcelona, 1974
- [2] Cortes, M.: *Centrales eléctricas*. C.P.D.A., E.T.S.I.I., Barcelona, 1980.
- [3] Doemeland W.: *VEM-Handbuch Relaischutztechnik*. VEB Verlag Technik, Berlin, 1976.
- [4] G.B.E.C.: *Power System Protection. 1 Principles and Components. 2 Systems and Methods. 3 Application*. Editada por Electricity Council. Peter Peregrinus LTD. Londres, 1986.
- [5] Montané P.: *Protecciones en las instalaciones eléctricas. Evolución y perspectivas*. Ed. Marcombo. Barcelona 1988.
- [6] Ramírez, J.: *Estaciones de distribución. Protección de sistemas eléctricos*. Ed. CEAC, S.A. Barcelona 1972.
- [8] Warrington, A. R.: *Protection relays. Their Theory and Practice*. Chapman and Hall. Londres, 1979.

Capítulo 9 Protección de motores y transformadores

9.1 Protección de motores

Los defectos que se presentan en los motores y contra los que han de protegerse son: cortocircuitos, sobrecargas, arranques intempestivos, fallo de una fase e inversión de fases.

Básicamente los dispositivos de protección de los generadores se pueden aplicar a los motores y a los compensadores síncronos. Sin embargo, por razones de economía, para los motores de potencias medias y pequeñas, debido al elevado coste de dichas protecciones, se emplean dispositivos de protección más sencillos y más simples y económicos tales como: relés térmicos, magnetotérmicos y relés de tensión. Combinando relés magnetotérmicos con un relé de mínima tensión se puede obtener una protección contra las puestas en marcha intempestivas.

Cuando los motores están instalados en redes con una elevada potencia de cortocircuito, se puede conseguir una protección económica combinando un interruptor automático (o contactor) de limitado poder de corte con cortocircuitos fusibles de alto poder de ruptura. En este caso, el interruptor automático se ocupa de la maniobra y protección contra las sobrecargas, mientras que el cortocircuito fusible de gran poder de ruptura, tipo *aM*, se encarga de la protección contra los cortocircuitos que se producen en el motor.

Además, se ha de tener en cuenta a la hora de elegir y ajustar las protecciones anteriores que éstas sean capaces de discriminar entre la corriente de arranque, la corriente de sobrecarga y la corriente de cortocircuito, para evitar así que, por ejemplo, una protección contra sobrecarga se ponga en funcionamiento de forma instantánea cuando se produzca el arranque de un motor de inducción del que, como se sabe, la intensidad de arranque puede llegar a ser de cinco veces la nominal, pero que alcanza su valor de régimen pasados sólo algunos segundos. Por tanto, y para este caso la protección no debería actuar hasta pasado un periodo de tiempo superior al que el motor necesita para arrancar.

Al fallar una fase, el motor de inducción sigue funcionando como monofásico. Según sea la carga que arrastra en ese momento puede ocurrir que la corriente que absorba sea inferior o superior a la nominal. En caso de que el motor arrastre la carga nominal y se produzca este defecto, la intensidad de corriente en las fases sanas suele ser del orden 1,3 a 1,4 veces la intensidad de corriente nominal. Dicho valor ya puede ser detectado por el relé térmico de protección.

Para la protección contra la falta de tensión o descenso de la misma se utilizan relés de

mínima tensión (figura 9.1.1) que desconectan el motor de la red en caso de que ésta falte o disminuya por debajo de un cierto valor. Estos relés deben ajustarse a la tensión del motor. Además, con el objeto de evitar desconexiones innecesarias por disminuciones transitorias de la tensión, deben estar temporizados a tiempo inverso.

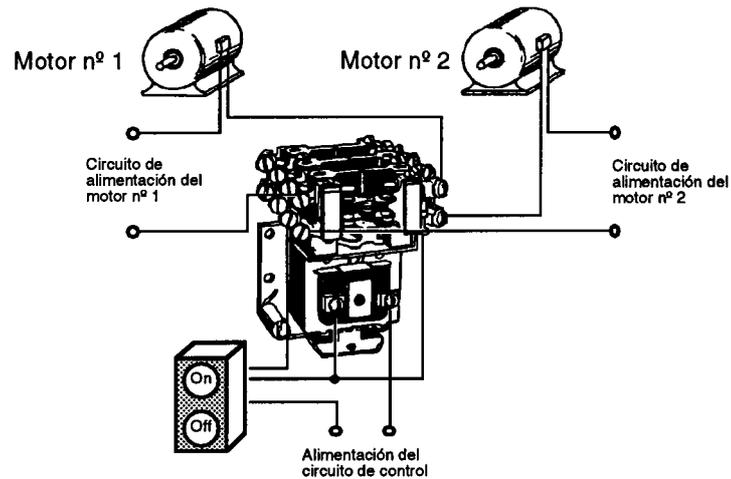


Fig. 9.1.1 Relé de mínima tensión protegiendo dos motores.

Para la protección contra falta de una fase o la inversión del sentido de las fases se pueden utilizar relés de inducción de disco como el representado en la figura 9.1.2.

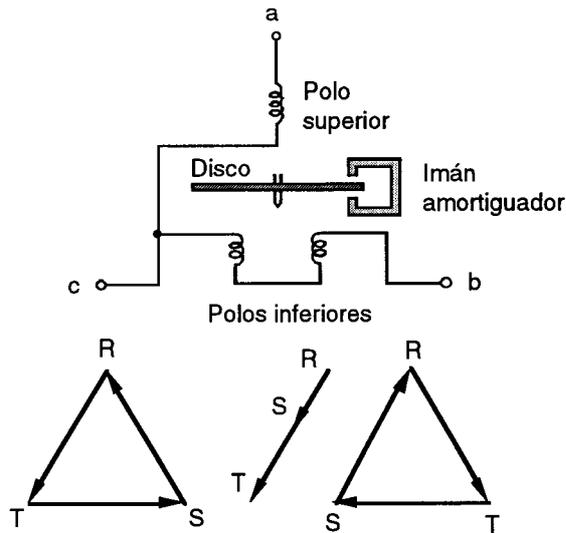


Fig. 9.1.2 Relé de protección contra fallo de una fase e inversión del sentido de las fases.

9.2 Protección de los transformadores

Al igual que los generadores, los transformadores tienen que protegerse debidamente contra los defectos y averías debidas a causas de tipo externo e interno que pueden ocasionar su destrucción.

Las causas externas son: sobretensiones, sobrecargas y cortocircuitos.

Las causas de tipo interno pueden originarse: en el circuito magnético (falta de aislamiento entre chapas, piezas de sujeción del núcleo, falta de aislamiento entre chapas y bobinas y existencia de entrehierros); en el circuito electrocinético (corte de los arrollamientos, cortocircuito entre espiras y cortocircuito entre conductores y el núcleo magnético); en los dieléctricos (falta o deterioro del aislamiento) y en el circuito de refrigeración (pérdidas del fluido refrigerante, obstrucción de las tuberías de circulación del refrigerante, fallo de la ventilación forzada, etc.).

Generalmente las protecciones del transformador (figura 9.2.1) se suelen clasificar en dos grupos según las protecciones estén incorporadas en él y detecten faltas producidas dentro de la cuba, o estén conectadas a los circuitos secundarios de los transformadores de protección, respectivamente: protecciones propias y protecciones externas.

Protecciones propias:

- relé de Buchholz (63 B),
- termómetros (26-1),
- termostato (26-2),
- dispositivos de imagen térmica (49),
- indicador de nivel (63 N),
- liberador de presión (63 L),
- relé de Jansen (63 BJ).

Protecciones externas:

- protección diferencial (87),
- protección de sobreintensidad (50 - 51),
- protección de la cuba (51 N).

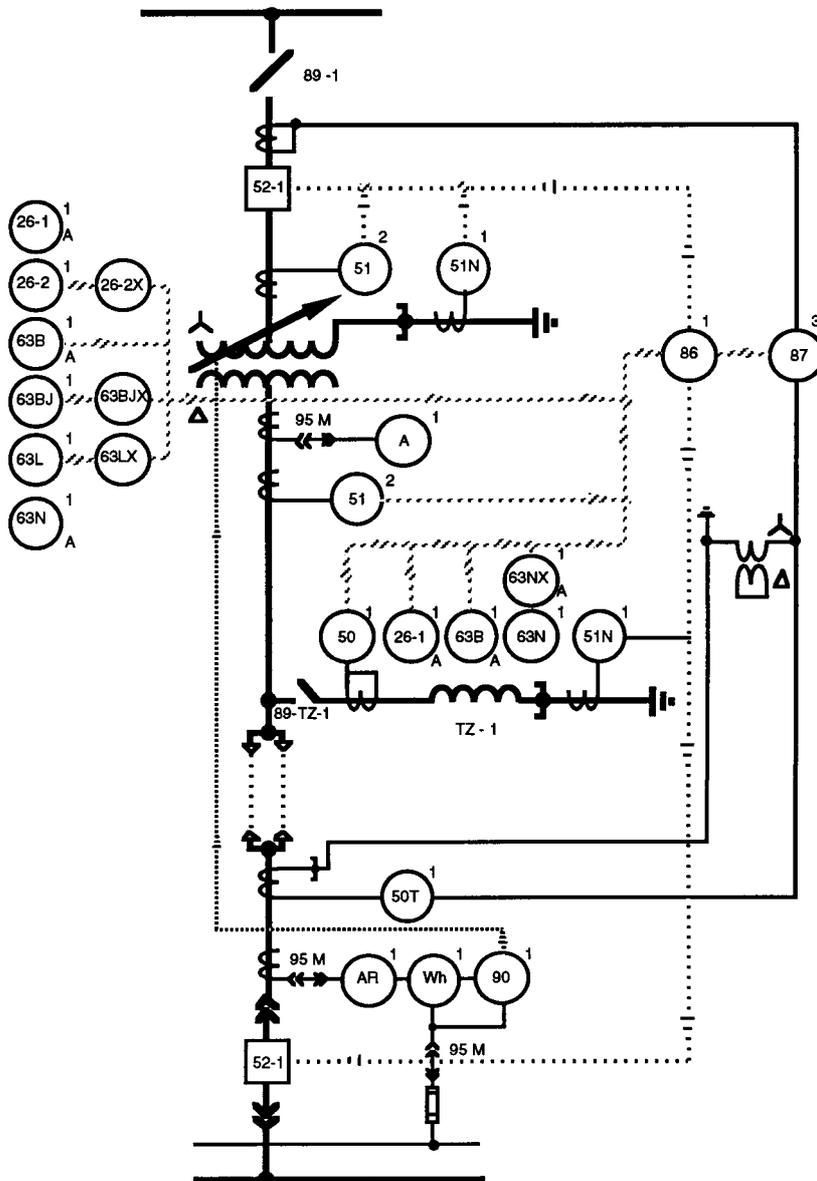


Fig. 9.2.1 Esquema unifilar de las protecciones de un transformador de potencia.

9.2.1 Protección por detección de gas: Relés de Buchholz y de Jansen

El relé Buchholz es la protección propia más importante del transformador y se utiliza ampliamente en la protección de transformadores en baño de aceite. Este relé se monta en la tubería horizontal de unión entre la cuba del transformador y el depósito de expansión del

aceite. Su principio de funcionamiento está basado en el hecho de que toda avería interna en los transformadores sumergidos en aceite provoca, por el efecto térmico del arco eléctrico, la descomposición de los aislantes sólidos y líquidos con la consiguiente generación de gases. Sirve para detectar faltas internas, cortocircuitos, arcos eléctricos y bajo nivel de aceite.

Este relé tiene la forma de una pequeña cuba (figura 9.2.1.1) y está instalado en la tubería que une la cuba del transformador al depósito de expansión y de manera que pueda detectar la totalidad de los gases que se originan en la cuba. En su interior hay dos flotadores dispuestos a distinto nivel, que pueden girar en torno a sus respectivos ejes. El flotador del nivel superior efectúa la alarma y el inferior efectúa el disparo mediante unos interruptores de mercurio.

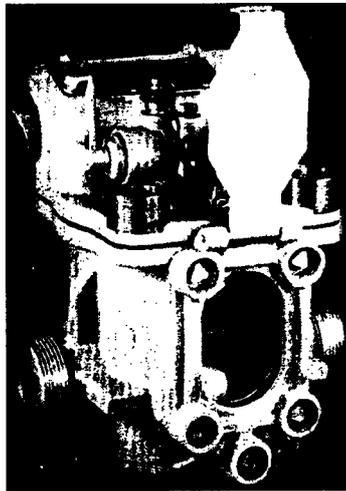


Fig. 9.2.1.1 Relé de Buchholz (AEG).

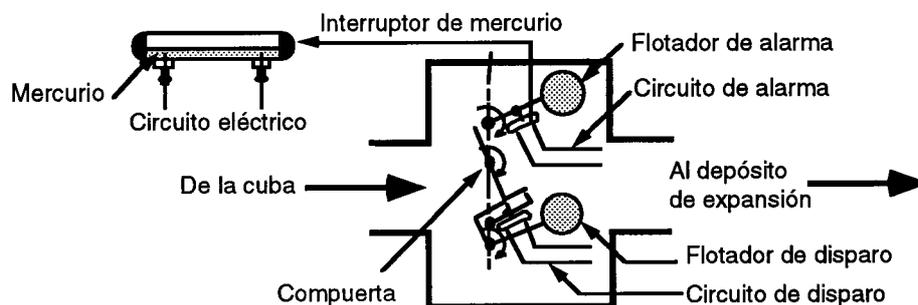


Fig. 9.2.1.2 Esquema de principio del relé de Buchholz y del interruptor de mercurio.

En la figura 9.2.1.3 se representa un corte esquemático de un relé de Buchholz para un estado de servicio normal.

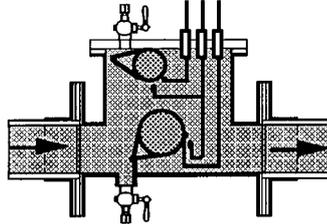


Fig. 9.2.1.3 Esquema de principio del relé de Buchholz en servicio normal.

Si se produce una avería de pequeña importancia, las burbujas gaseosas que se forman ascienden y, situándose en la parte superior del cárter, hacen disminuir el empuje ascensional del flotador superior, el cual oscila hacia abajo y hace bascular un tubo de mercurio que cierra un contacto, por medio del cual se dispara una señal de alarma (figura 9.2.1.4). Se procede entonces a tomar una muestra del gas por medio del grifo superior y se analiza este gas. Si es incombustible se trata de aire procedente de una entrada accidental, por lo que el transformador puede seguir funcionando. Gas combustible revela la presencia de un defecto que exigirá la desconexión del transformador y la posterior revisión del mismo.

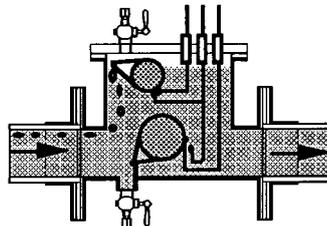


Fig. 9.2.1.4 Esquema de principio del relé de Buchholz con averías de poca importancia.

Una producción lenta de gases no ejerce acción alguna sobre el flotador inferior, que permanece sumergido en el aceite. La producción intempestiva de gases indica la presencia de una avería grave (figura 9.2.1.5). En este caso el aceite es impulsado a borbotones, lo que origina que el flotador inferior vuelque cerrando un nuevo contacto, que hace que abran los interruptores automáticos de ambos lados del transformador para desconectarlo.

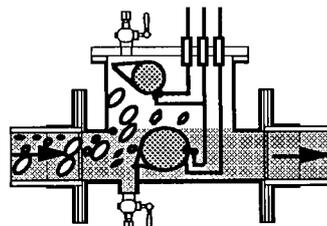


Fig. 9.2.1.5 Esquema de principio del relé de Buchholz con avería grave.

9.2.2 Protección contra las sobrecargas y las sobretensiones

Los transformadores de gran potencia se proyectan para que puedan soportar durante un tiempo considerable las corrientes de cortocircuito que pueden atravesar sus devanados, de modo que sus protecciones solo necesitarían actuar, para eliminar las corrientes de cortocircuito que se originan por defectos fuera del transformador, cuando fallen las protecciones selectivas de las diversas partes de la red donde está ubicado y a las que se les ha encomendado dicha tarea. Para tal eventualidad, en los transformadores de dos arrollamientos, AT/MT, se instala una protección de sobreintensidad a tiempo inverso en el lado de AT.

Por una parte, hay que tener en cuenta que los transformadores deben estar protegidos contra las sobrecargas duraderas que pueden producir un calentamiento excesivo de sus arrollamientos, mientras que, por otra parte, es necesario poder cargar el transformador hasta la potencia máxima compatible con su seguridad de funcionamiento, valor que depende de las condiciones ambientales y del sistema de refrigeración.

En el interior de la cuba la temperatura del aceite varía con la altura, siendo máxima en la parte alta de la cuba donde puede medirse por medio de un termómetro. Su valor se visualiza en una esfera indicadora colocada en un lugar accesible. El termómetro (designación 26-1) dispone de dos agujas de control; una de alarma, generalmente de color azul, se regula para que actúe a los 85 °C, y otra de color rojo efectúa el disparo de los interruptores de los distintos niveles de tensión, que se ajusta para que actúe a los 95 °C (figura 9.2.2.1).

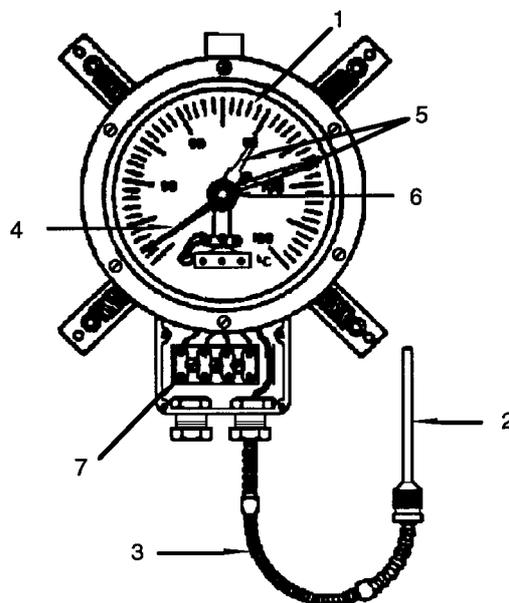


Fig. 9.2.2.1 Termómetro: 1 = Escala; 2 = Bulbo; 3 = Tubo capilar; 4 = Aguja indicadora; 5 = Agujas de alarma y disparo; 6 = Contactos; 7 = Caja de bornes.

Sin embargo, dado que la temperatura depende de las pérdidas de calor totales en el transformador, y dada la elevada capacidad calorífica del aceite, su temperatura varía muy lentamente con las variaciones de carga. Es decir, el circuito de refrigeración tiene una gran inercia térmica, con unas constantes de tiempo térmicas elevadas que van de una a varias horas según sea el tipo de refrigeración. Por el contrario, el calentamiento de los devanados se produce básicamente por el efecto Joule en los mismos, y depende del cuadrado de la intensidad de corriente que los atraviesa, es decir proporcional al cuadrado del índice de carga. Las constantes de tiempo térmicas de los devanados de los transformadores son mucho menores que las del aceite de la cuba, del orden de varios minutos.

A veces, además del termómetro se utiliza un termostato (designación 26-2) como reserva o apoyo del mismo. El termostato (figura 9.2.2.2) es un dispositivo térmico, que al igual que el termómetro, detecta las variaciones de temperatura. Cuando la temperatura detectada por el mismo alcanza un valor previamente elegido, hace actuar unos contactos sobre el dispositivo que provocan el disparo. También se utilizan para arrancar los ventiladores.

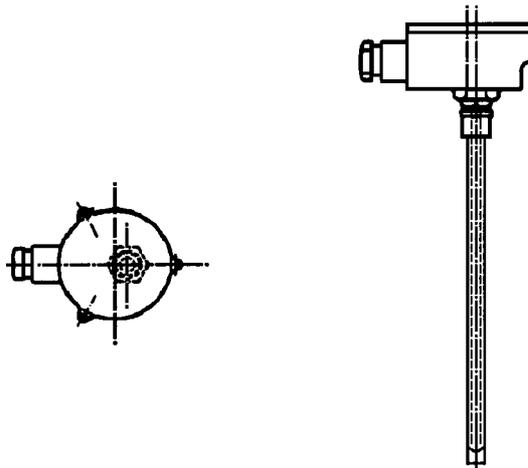


Fig. 9.2.2.2 Termostato.

Generalmente la aparición de la señal de alarma que proviene del termómetro o termostato indica que la temperatura del aceite del transformador está cerca del máximo admisible. Si en esta situación se produjese un aumento de la carga, el termómetro o termostato tardarían mucho tiempo en actuar, con lo que en el aceite se iría almacenando una gran cantidad de calor que tardaría mucho tiempo en disiparse después de la desconexión del transformador. Para evitar este inconveniente se dispone en el transformador un dispositivo de imagen térmica que debe reproducir exactamente las temperaturas de los devanados, tener la misma constante de tiempo térmica que ellos, y además tener en cuenta la temperatura del aceite.

El relé de imagen térmica comprende una sonda termométrica metida dentro de un tubo aislante, que se sitúa en el interior de la cuba del transformador en su parte alta (figura 9.2.2.3). La temperatura de la sonda es igual a la del aceite incrementada en el calentamiento

producido por un elemento calefactor que rodea la sonda, alimentado por un transformador auxiliar conectado en serie con el transformador de intensidad del devanado elegido, generalmente el devanado de alta tensión. Los bornes de salida de la sonda termométrica se conectan a un termómetro con contactos de alarma o disparo.

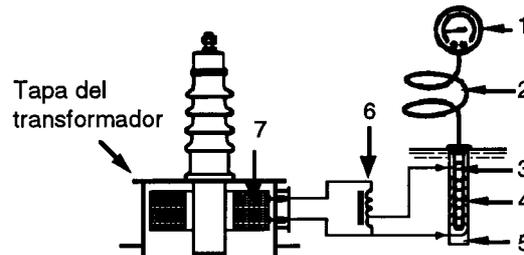


Fig. 9.2.2.3 Relé de imagen térmica: 1 = Termómetro; 2 = Tubo capilar; 3 = Bulbo; 4 = Bobina calefactora; 5 = Recipiente; 6 = Autotransformador; 7 = Transformador de intensidad.

Los transformadores utilizan indicadores de nivel de aceite mediante un flotador conectado a una aguja indicadora (figura 9.2.2.4). Se utilizan para detectar posibles fugas de aceite. Actúan dando una señal de alarma o disparo.

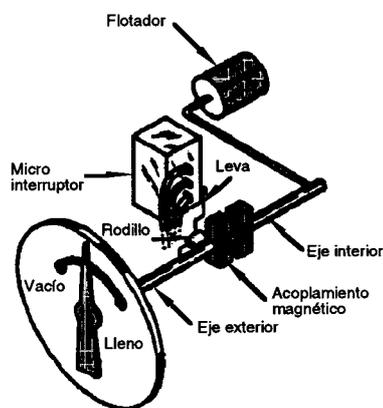


Fig. 9.2.2.4 Indicador de nivel de aceite.

Otro dispositivo de protección propio de los transformadores de baño en aceite es el liberador de presión (designación 63-L). Este dispositivo trata de evitar que en caso de sobrepresiones internas se deforme la cuba. Existen dos tipos: de chimenea (figura 9.2.2.5) y de válvula liberadora (figura 9.2.2.6). Detectan averías internas, cortocircuitos, arcos, etc., y provocan un disparo definitivo que suele ir acompañado por la actuación de otra protección (diferencial, Buchholz, etc.).

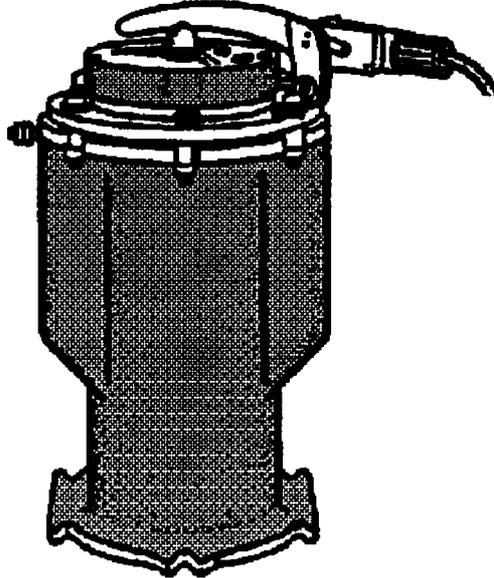


Fig. 9.2.2.5 Liberador de presión de chimenea.

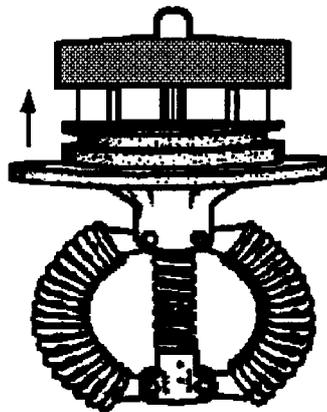


Fig. 9.2.2.6 Liberador de presión de válvula.

En los transformadores con regulación de tensión en carga se utiliza además un relé de Jansen. Este dispositivo está intercalado entre el depósito de expansión del aceite del regulador y el conmutador mismo. En su interior dispone de una compuerta basculante que es accionada por la corriente de aceite que procede del regulador de tomas. Al bascular cierra un contacto de mercurio (figura 9.2.2.7).

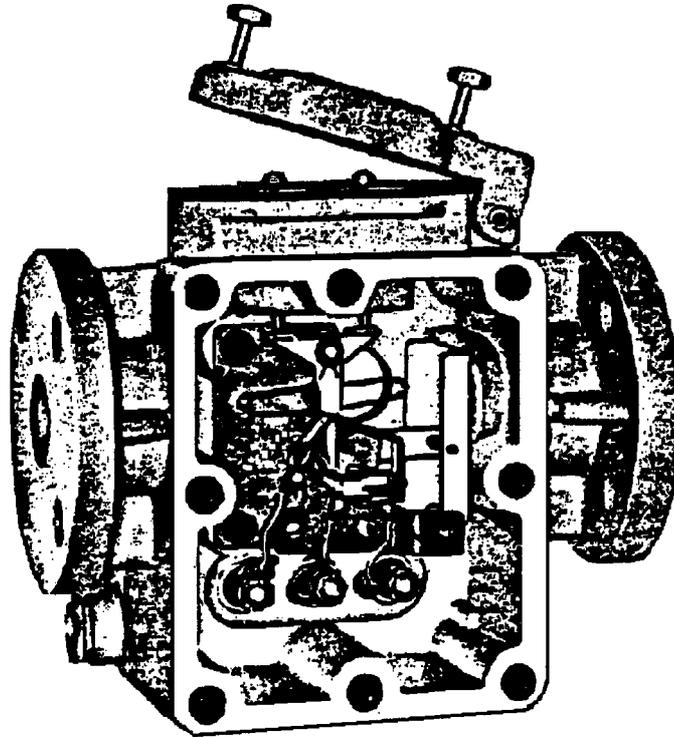


Fig. 9.2.2.7 Relé de Jansen.

9.2.3 Protección diferencial

La protección diferencial en los transformadores se aplica de una forma similar a como se ha descrito para de los alternadores, y se realiza comparando las intensidades de corriente a la entrada del primario y a la salida del secundario de cada fase. Sin embargo, en los transformadores se presentan una serie de dificultades adicionales que hay que tener en cuenta, como pueden ser:

- intensidades de distinta magnitud,
- desfases entre las tensiones del primario y el secundario (índice horario),
- transformadores de intensidad de distintas relaciones dependiendo del grupo de conexión del transformador,
- desfases entre las corrientes primarias y secundarias,
- conexión del transformador en vacío,
- ubicación de los transformadores de intensidad que alimentan la protección diferencial,
- si existe regulación de tensión.

En la figura 9.2.3.1 se presenta el esquema unifilar de la protección diferencial de un transformador $Yy0$.

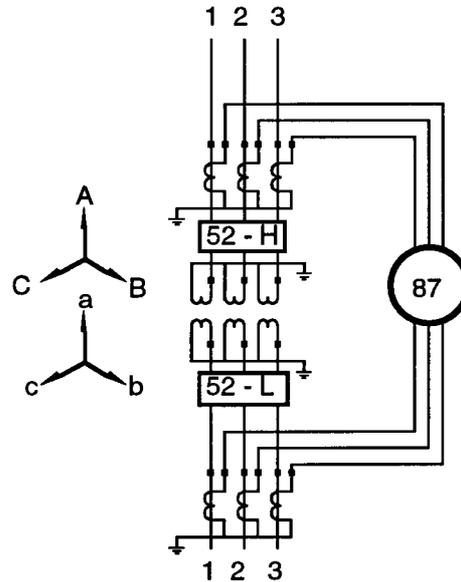


Fig. 9.2.3.1 Protección diferencial de un transformador trifásico Yy0.

La relación de transformación del transformador de potencia viene dada por:

$$r_t = \frac{U_{1n}}{U_{2v}} \sim \frac{N_1}{N_2} = \frac{I_2}{I_1} \quad (9.2.3.1)$$

Designando las relaciones de transformación de los transformadores de intensidad conectados en el primario y el secundario como r_1 y r_2 , respectivamente, se verifica:

$$r_1 = \frac{I_{11}}{I_1} \quad \text{y} \quad r_2 = \frac{I_{22}}{I_2} \quad (9.2.3.2)$$

siendo I_{11} e I_{22} las intensidades de corriente secundarias de los transformadores de intensidad cuando por sus primarios circulan las intensidades de corriente I_1 e I_2 respectivamente.

Para que en condiciones normales no actúe la protección por efecto de la diferencia de magnitud entre las intensidades de corriente primaria y secundaria, se ha de cumplir que:

$$I_{11} = I_{22} \quad (9.2.3.3)$$

o lo que es equivalente:

$$r_1 I_1 = r_2 I_2 \quad (9.2.3.4)$$

Si la igualdad anterior se expresa en función de la relación de transformación del transformador de potencia:

$$r_1 I_1 = r_2 r_t I_1 \tag{9.2.3.5}$$

Luego entre las relaciones de transformación de los transformadores de medida debe verificarse:

$$r_1 = r_2 r_t \tag{9.2.3.6}$$

Cuando el grupo de conexión del transformador es *Yd11*, las corrientes entre el primario y el secundario están desfasadas 30°. Para compensar esta diferencia en los circuitos del relé diferencial, se acoplan los secundarios de los transformadores de intensidad colocados en el lado del triángulo del transformador principal en estrella y en triángulo en el lado estrella (figuras 9.2.3.2 y 9.2.3.3). En la figura 9.2.3.2 puede observarse qué transformadores de medida se conectan en estrella y cuáles en triángulo al cambiar de un transformador *Yd11* a otro *Dy11*.

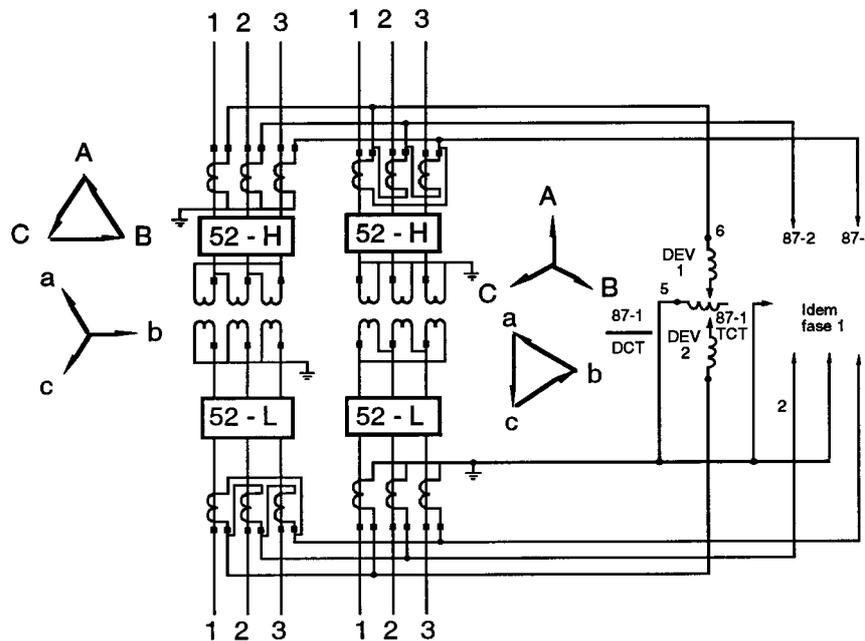


Fig. 9.2.3.2 Protección diferencial de un transformador *Yd11* y *Dy11*.

Un montaje inverso podría ocasionar desenganches intempestivos, en caso de defecto a tierra, sobre la red unida a los devanados en estrella.

En el caso de que el primario del transformador principal esté conectado en triángulo y el secundario en estrella, la relación entre r_1 , r_1 y r_2 para que el relé diferencial no actúe en condiciones normales viene dada por:

$$r_1 = \sqrt{3} r_1 \cdot r_2 \quad (9.2.3.7)$$

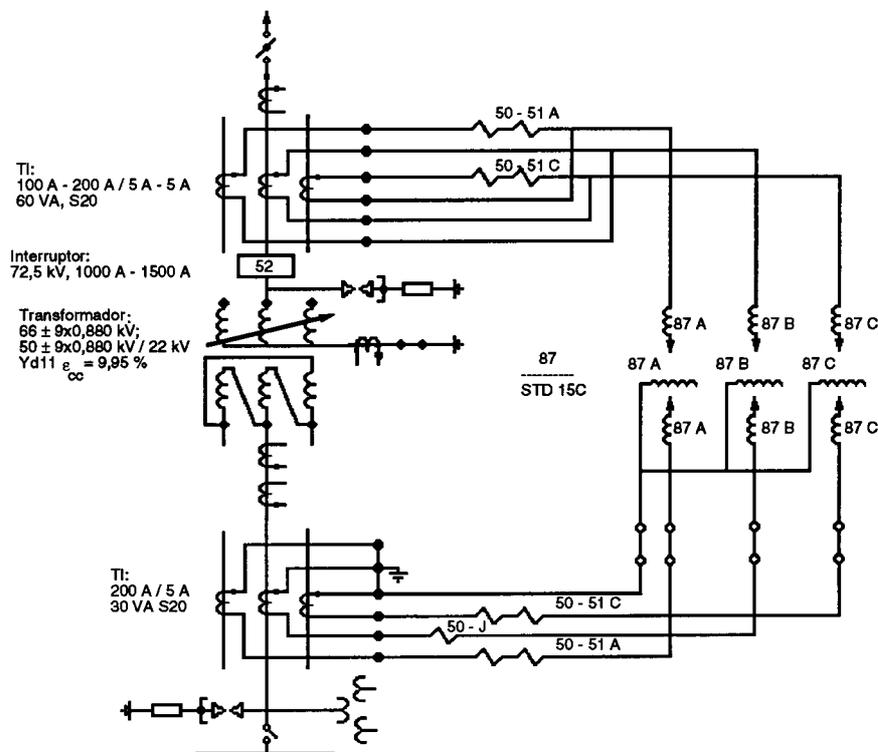


Fig. 9.2.3.3 Protección diferencial de un transformador Yd11.

Para evitar que las diferencias entre las características de los transformadores de intensidad originen el funcionamiento intempestivo de las protecciones diferenciales cuando ocurre un defecto exterior al tramo protegido, se recurre a relés de porcentaje.

En las figuras 9.2.3.4 y 9.2.3.5 se representan esquemas de protección para transformadores de tres arrollamientos y para autotransformadores respectivamente.

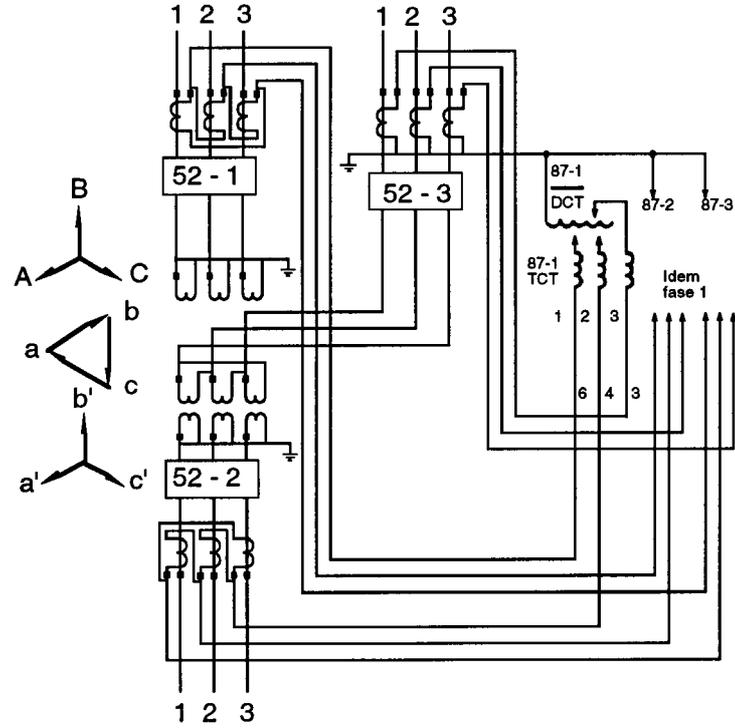


Fig. 9.2.3.4 Protección diferencial de un transformador trifásico de tres devanados.

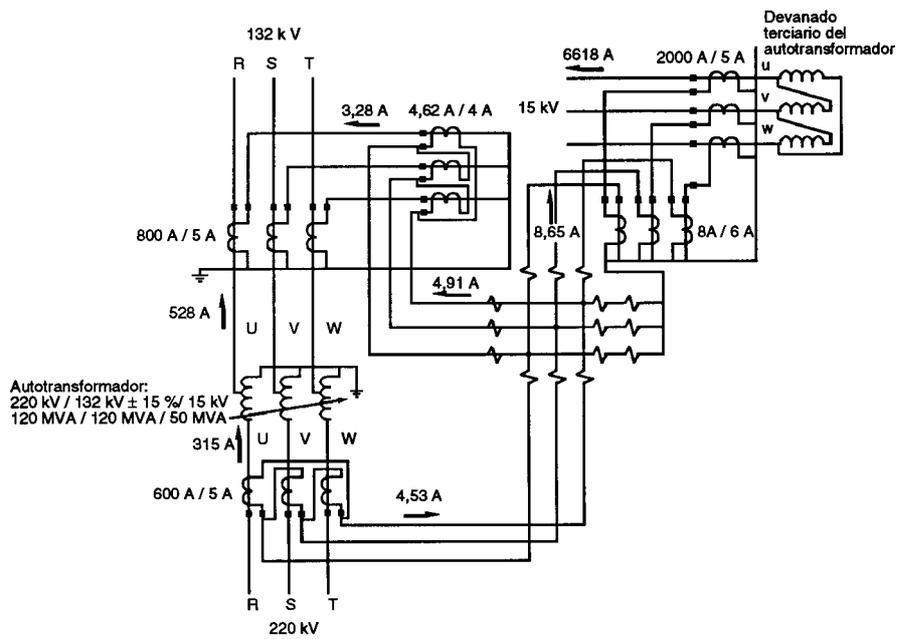


Fig. 9.2.3.5 Protección diferencial de un autotransformador trifásico.

9.2.4 Protección diferencial del neutro

Se pueden proteger el devanado conectado en estrella y el punto de la estrella conectado a tierra contra los defectos a tierra, comparando la corriente de neutro a uno y otro lado de la zona limitada por los transformadores de intensidad (figura 9.2.4.1).

Para obtener una buena sensibilidad, el relé a emplear será de tipo voltimétrico

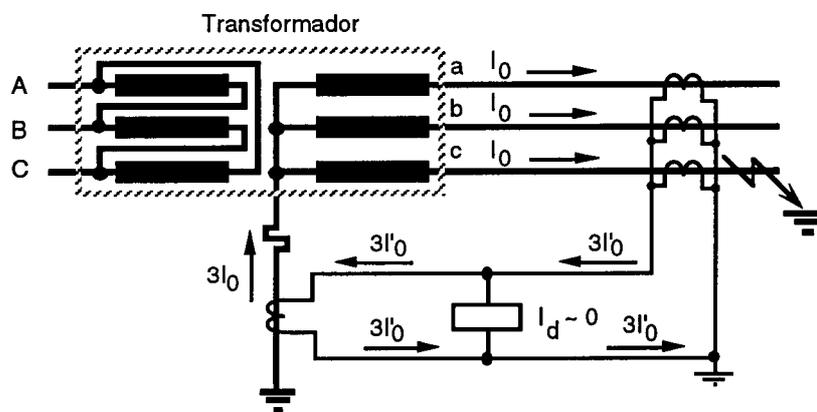


Fig. 9.2.4.1 Esquema de principio de la protección diferencial de neutro.

9.2.5 Protección de cuba

Este tipo de protección consiste en unir la cuba del transformador a una toma de tierra, a través de un transformador de intensidad cuyo secundario está conectado a un relé amperimétrico instantáneo. Para poder aplicar esta protección es necesario que la cuba del transformador esté suficientemente aislada de tierra (aislamiento mínimo de 25 Ω).

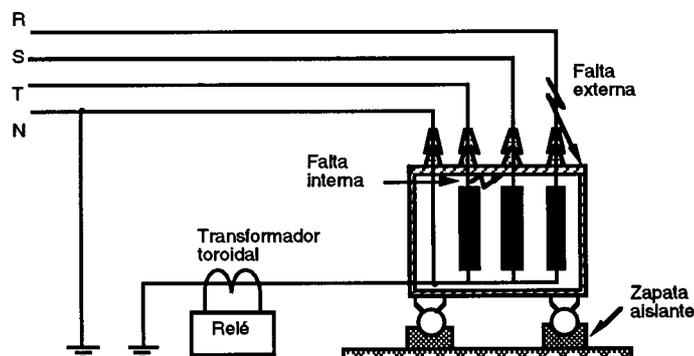


Fig. 9.2.5.1 Protección de cuba.

9.3 Bibliografía

- [1] Buchhold-Happoldt: *Centrales y redes eléctricas*. Editorial Labor. Barcelona, 1974.
- [2] Cortes, M.: *Centrales eléctricas*. C.P.D.A., E.T.S.I.I., Barcelona, 1980.
- [3] Doemeland, W.: *VEM-Handbuch Relaischutztechnik*. VEB Verlag Technik, Berlín, 1976.
- [4] G.B.E.C.: *Power System Protection. 1 Principles and Components. 2 Systems and Methods. 3 Application*. Editada por Electricity Council. Peter Peregrinus LTD. Londres, 1986.
- [5] Montané P.: *Protecciones en las instalaciones eléctricas. Evolución y perspectivas*. Ed. Marcombo. Barcelona 1988.
- [6] Ramírez, J.: *Estaciones de transformación y distribución. Protección de sistemas eléctricos*. Ed. CEAC, S.A. Barcelona 1972.
- [7] Ras , E: *Transformadores de potencia, de medida y de protección*. 7ª Ed. Marcombo, S.A , Barcelona 1988
- [8] Zopetti, G.: *Estaciones transformadoras y de distribución*. 3ª Edición. Ed. Gustavo Gili, S.A. Barcelona, 1979