



Protección de Transformadores de potencia contra defectos internos

Andrés Granero

Merlin Gerin

Modicon

Square D

Telemecanique



Protección de Transformadores de potencia contra defectos internos

La protección del transformador es una condición impuesta por su coste y por su importancia en el proceso productivo, pero además de atender la seguridad en la explotación, las protecciones también salvaguardan la integridad física de las personas que los manipulan, mantienen o simplemente los utilizan.

Andrés Granero

El transformador de potencia es sin duda alguna uno de los equipos más importantes de un sistema eléctrico, pieza básica del transporte y distribución de energía eléctrica. Sencillo, eficaz y fiable, constituye la máquina de rendimiento más elevado debido a su particular faceta de no tener ningún órgano móvil.

Los defectos y averías internas en un transformador de potencia normalmente vienen motivadas por perturbaciones de origen externo, haciéndose patentes de manera instantánea o bien evolucionando paulatinamente. La relación causa-efecto podríamos resumirla como sigue:

Solicitaciones Térmicas:

- Sobreintensidades
- Sobrecargas permanentes o repetidas
- Cortocircuitos

Solicitaciones Dieléctricas:

- Sobretensiones temporales
- Sobretensiones atmosféricas
- Sobretensiones tipo maniobra

También son altamente nocivos los efectos electrodinámicos originados por cortocircuitos externos, «solicitaciones de tipo mecánico», esfuerzos que son relativamente compensados por elementos de presión dispuestos sobre las cabezas de los devanados tal y como se aprecia en la figura 1.

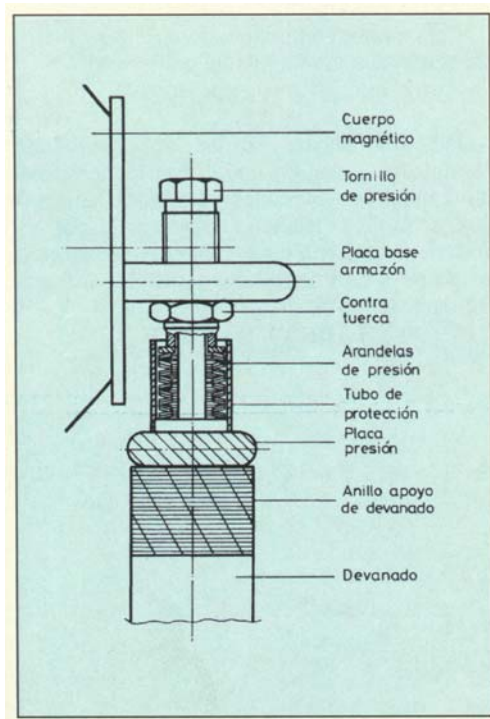


Fig. 1. Elementos de presión para devanados

Debido a la fuerza resultante f , queda comprimido el bobinado interior, como indican las flechas (figura 2), tendiendo a aplastarlo sobre el núcleo, al igual que a hacer estallar el bobinado exterior que experimenta una presión análoga a la de un cuerpo de caldera.

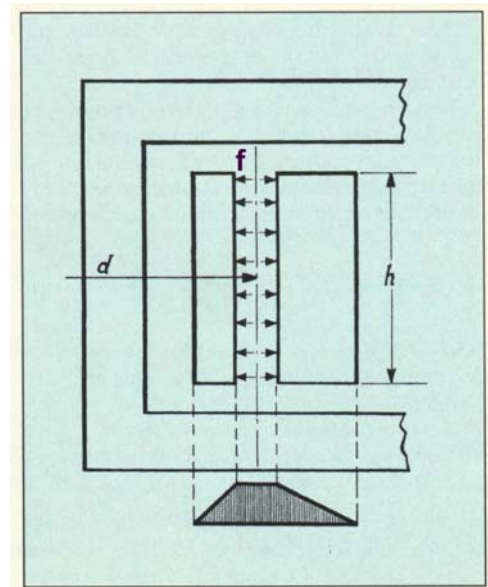


Fig. 2. Esfuerzos electrodinámicos en devanados.

Este efecto destructor dependiente del cortocircuito quedará tanto más limitado cuanto más rápido sea el sistema de protección dispuesto.

Los efectos causados por tales perturbaciones en el transformador pueden ser:

- Cortocircuitos entre fases.
- Cortocircuitos entre espiras.
- Defectos de aislamiento en el núcleo magnético.

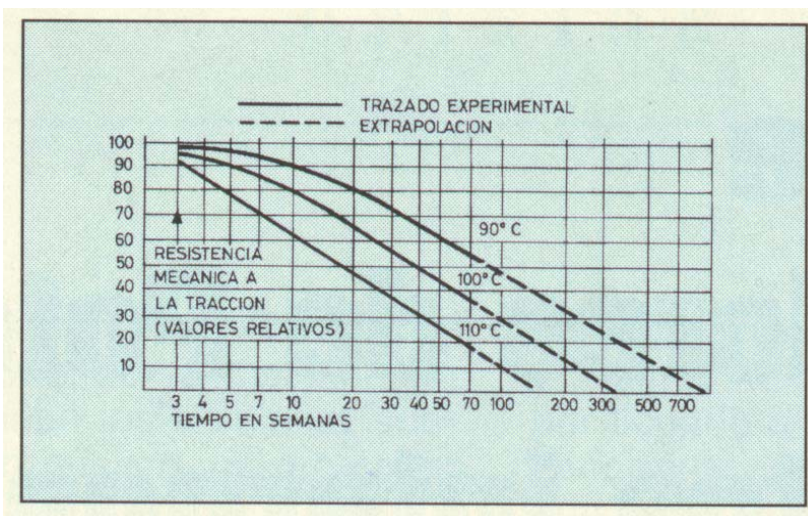


Fig. 3. Curvas de Montsinger.

El resultado más común es la alteración del aislamiento en conductores, que se vuelven más frágiles y quebradizos al debilitarse su resistencia mecánica y al disminuir su rigidez dieléctrica por efecto del calor.

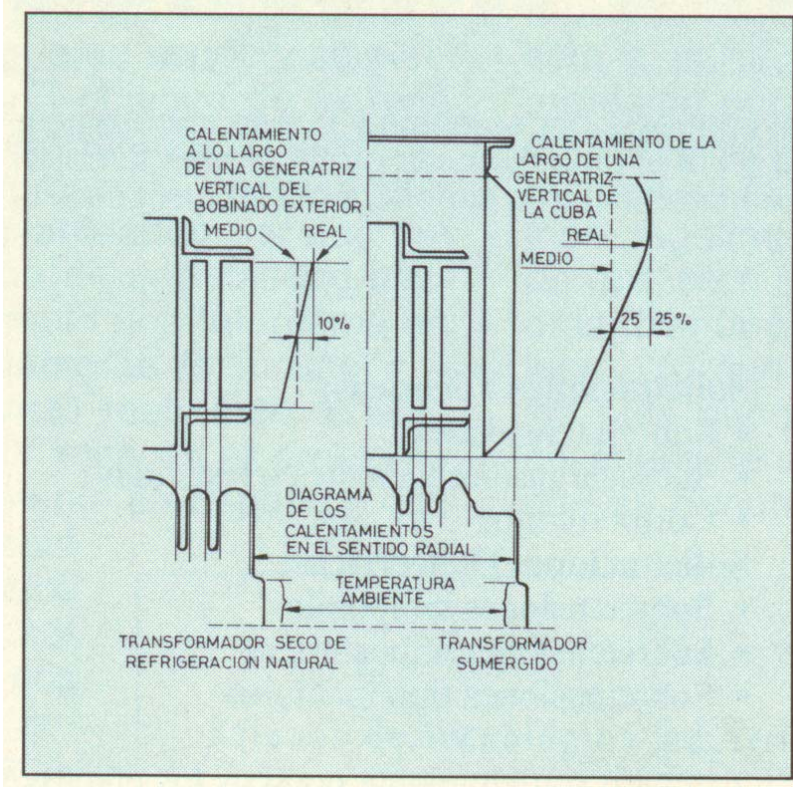


Fig. 4. Etapas de propagación del calor en transformadores.

Un análisis superficial de estas incidencias nos hace reflexionar sobre la importancia de proteger al transformador con dispositivos selectivos y sensibles, capaces de interrumpir rápidamente el flujo de energía al lugar defecto.

Existen también causas de avería propias al transformador, derivadas principalmente de defectos de construcción, mantenimiento o utilización, problemas de evolución lenta tales como envejecimiento natural o prematuro; falta de presión en conexiones, deficiencias en la refrigeración etc., etc.

Estudios recientes sobre la acción del calor en los aislantes han demostrado que, en las proximidades de una temperatura de 100 °C, un régimen de funcionamiento de 8 °C en más o en menos, puede respectivamente doblar o reducir a la mitad la vida de un transformador (ley de Montsinger) según se observa en la figura 3.

Las etapas de propagación del calor en transformadores secos y sumergidos están representadas en el croquis de la figura 4, se observa cómo la temperatura varía no solamente del interior al exterior, sino también de la parte inferior a la superior.

Como podemos observar es de suma importancia la limitación de la temperatura en el transformador para prevenirlo contra calentamientos impropios que pudieran ponerlo en peligro.

TABLA I Límites de calentamiento para transformadores de tipo seco			
1 Parte	2 Método de refrigeración	3 Clase de temperatura de aislamiento (*)	4 Calentamiento máximo °C
Arrollamiento (calentamiento medido por el método de variación de resistencia) (**)	Por aire, natural o ventilación forzada.	A E B F H	60 75 80 100 125 150 (**)
Circuitos magnéticos y otras partes: a) En contacto con los arrollamientos b) No en contacto con los arrollamientos.	Todos		a) Los mismos valores que para los arrollamientos. b) La temperatura no alcanzará en ningún caso un valor que pueda dañar al propio circuito magnético, otras partes, o los materiales ayacentes.
(*) Véase la norma UNE 21 305. (**) Para algunos materiales aislantes, se puedan aceptar calentamientos superiores a 150 °C, por acuerdo entre fabricante y comprador. Nota: Los materiales aislantes se pueden utilizar separadamente o en combinación, teniendo en cuenta que en ningún caso cada aislante sea sometido durante el funcionamiento en las condiciones asignadas, a una temperatura superior a aquella para la cual está previsto.			

La norma UNE 20- 101 (2) determina estos límites para transformadores secos y sumergidos en aceite, según las tablas siguientes: (ver Tabla I y Tabla II).

Aunque las temperaturas del ambiente o del fluido refrigerante es variable, las normas CEI consideran como valores límites:

Para el aire: 40 °C Máximo
 30 °C Como media diaria
 20 °C Como media anual
 Calentamiento máximo del aceite = 60 °C
 Calentamiento medio del cobre = 65 °C
 Para el agua de refrigeración = 25 °C

Para una mayor claridad, en el siguiente ejemplo se ponen de manifiesto las temperaturas máximas tolerables para un aislamiento de la Clase A (sustancias orgánicas: papel, algodón, seda, esmaltes y análogos) sumergido en aceite y con una temperatura del aire circundante de 40 °C.

Según la TABLA II se tendría:

	Calentamiento	Temperatura
Temperatura del aire:		40 °C
Aceite:	60 °C	100 °C
Arrollamientos (Temperatura media):	65 °C	105 °C
Temperatura máxima para el aislamiento Clase A:		115 °C
Diferencia entre temperaturas del punto más caliente y la media del arrollamiento:		10 °C

Según normas UNE 20-101 (5) el transformador deberá poder soportar sin daño los efectos térmicos y mecánicos de los cortocircuitos exteriores, durante un tiempo mínimo de 2 segundos.

Con relación a la norma VDE 0532, los valores máximos de corriente de cortocircuito I_{kd} referida a la corriente nominal y tiempo de cortocircuito T_K en transformadores de dos arrollamientos, vienen dados en la Tabla III:

TABLA II Límites de calentamiento para transformadores sumergidos en aceite	
1 Parte	2 Calentamiento máximo °C
ARROLLAMIENTOS: Clase de temperatura del aislamiento A (calentamiento medido por el método de variación de resistencia).	65, cuando la circulación del aceite es natural o forzada no dirigida. 70, cuando la circulación del aceite es forzada y dirigida.
Aceite en la parte superior (calentamiento medido por termómetro).	60, cuando el transformador está provisto de conservador o es estanco al aire. 55, cuando el transformador no está provisto de conservador ni es estanco al aire.
Circuitos, magnéticos, partes metálicas y otros materiales adyacentes.	La temperatura no alcanzará en ningún caso, un valor que pueda dañar, al propio circuito magnético, otras partes o los materiales adyacentes.
Nota: Los límites de calentamiento de los arrollamientos (medido por el método de variación de resistencia) se eligen de forma que den el mismo calentamiento del punto caliente con diferentes tipos de circulación del aceite. El calentamiento del punto caliente no se puede medir, normalmente, directamente. En los transformadores con circulación forzada y dirigida del aceite, la diferencia entre el calentamiento del punto caliente y el calentamiento medio en los arrollamientos es más pequeño que en los transformadores con circulación natural del aceite, o que en los de circulación forzada pero no dirigida del aceite, por esta razón los arrollamientos de los transformadores con circulación forzada y dirigida del aceite pueden tener límites de calentamiento (medido por el método de variación de resistencia) superiores en 5 °C a los de los otros transformadores.	

TABLA III			
Potencia Nominal P _N (kVA)	I _{kd} (1)	T _{cc} (%)	T _K (seg.)
≤ 630	25	4,00	2,0
631... 1.250	20	5,00	3,0
1.251... 3.150	16	6,25	4,0
3.151... 6.300	14	7,15	4,5
6.301... 12.500	12	8,35	5,0
12.501... 25.000	10	10,00	6,0
25.000... 100.000	8	12,50	8,0
(1) Múltiplos de la Intensidad Nominal.			

No se sobrepasarán los valores admisibles de temperatura media más elevada θ_1 (Véase UNE 20-101 (5)) del arrollamiento después del cortocircuito dados en la Tabla IV.

TABLA IV Valores máximos admisibles de la temperatura media más elevada θ_1 del arrollamiento después del cortocircuito			
Tipo de transformador	Temperatura del sistema de aislamiento °C	Valor máximo de θ °C	
		Cobre	Aluminio
Sumergido en aceite	105 (A)	250	200
Seco	105 (A)	180	180
	120 (E)	250	200
	130 (B)	350	200
	155 (F)	350	200
	185 (H)	350	200
	220 (C)	350	200

Para sobrecargas distintas a los cortocircuitos, los relés deberán proporcionar tiempos de actuación en función de la carga, de modo que su curva de respuesta se adapte a la curva de calentamiento dada por el fabricante del transformador.

La tabla V da valores orientativos sobre la capacidad de sobrecarga de transformadores con refrigeración natural en función de su carga previa o de la temperatura del aceite medida al comienzo de la sobrecarga. Se ha supuesto una temperatura del aire de 25 °C siendo la temperatura al final del periodo de sobrecarga 105 °C. (Valor límite).

Al utilizar esta tabla hay que tener en cuenta los siguientes aspectos:

- Para transformadores secos con aislamientos de las clases B, E, F, habrá que reducir aproximadamente un 15% la duración de las sobrecargas.
- Para alturas superiores a los mil metros sobre el nivel del mar, el aumento de temperatura expresado en las tablas anteriores deberá reducirse para cada 500 m por encima de los 1000:

- a) Transformadores sumergidos en aceite, con refrigeración natural por aire = 2,0%
- b) Transformadores tipo seco, con refrigeración natural por aire = 2,5%
- c) Transformadores sumergidos en aceite, con ventilación forzada = 3,0%
- d) Transformadores tipo seco, con ventilación forzada = 5,0%

TABLA V (Según VDE 0532 Apéndice I)							
Construcción	Carga previa permanente en % de P _N	Temperatura del aceite bajo tapa °C	Tiempo de sobrecarga admisible en minutos para una sobrecarga de % P _N				
			10	20	30	40	50
Aceite	50	55	180	90	60	30	15
	75	68	120	60	30	15	8
	90	78	60	30	15	8	4
Seco (clase A)	50		60	30	20	15	12
	75		55	23	15	11	9
	90		45	16	10	7	5

Las características de calentamiento/enfriamiento determinadas por el fabricante del transformador, vienen impuestas por la normativa UNE 20-101 (2) por medio del método de variación de resistencia.

La temperatura de un arrollamiento [θ_2] al final de un ensayo se calculará a partir de su resistencia [R_2] medida a esta temperatura y de su resistencia [R_1] medida a otra temperatura [θ_1] mediante las fórmulas:

$$\theta_2 = \frac{R_2}{R_1} [235 + \theta_1] - 235$$

Para el Cobre y Aluminio respectivamente

$$\theta_2 = \frac{R_2}{R_1} [235 + \theta_1] - 225$$

en la que θ_1 y θ_2 están medidos en grados Celsius.

La resistencia [R_1] es normalmente, la resistencia en frío.

La resistencia [R_2] se mide bien después de cada corte de la alimentación, teniendo en cuenta las correcciones pertinentes para observar las variaciones de la temperatura media del aceite. O bien, sin interrumpir la alimentación, por el método de superposición, que consiste en hacer pasar por el arrollamiento una corriente continua de medida de pequeña intensidad que se superpone a la corriente de carga.

La protección contra sobrecargas

Su principio está basado en el proceso de calentamiento de los cuerpos homogéneos, en efecto, dadas las ecuaciones y características térmicas universales de la figura 5 podemos deducir:

El incremento de temperatura que alcanza un cuerpo al cabo de un tiempo igual a T, es decir, de la ecuación $\theta_\Delta = 1 - e^{-t}$ si $t = T$ ó $t = 1$ es precisamente el 63% de su valor máximo θ_Δ y al cabo de $t = 3T$ ó $t = 3$ el aumento de temperatura sería del 95% de θ_Δ

En efecto:

$$\text{para } t = 1 \quad \theta_\Delta = 1 - \frac{1}{e} = 1 - \frac{1}{2,72} = 0,632$$

y

$$\text{para } t = 3 \quad \theta_\Delta = 1 - \frac{1}{e^3} = 1 - \frac{1}{20} = 0,95$$

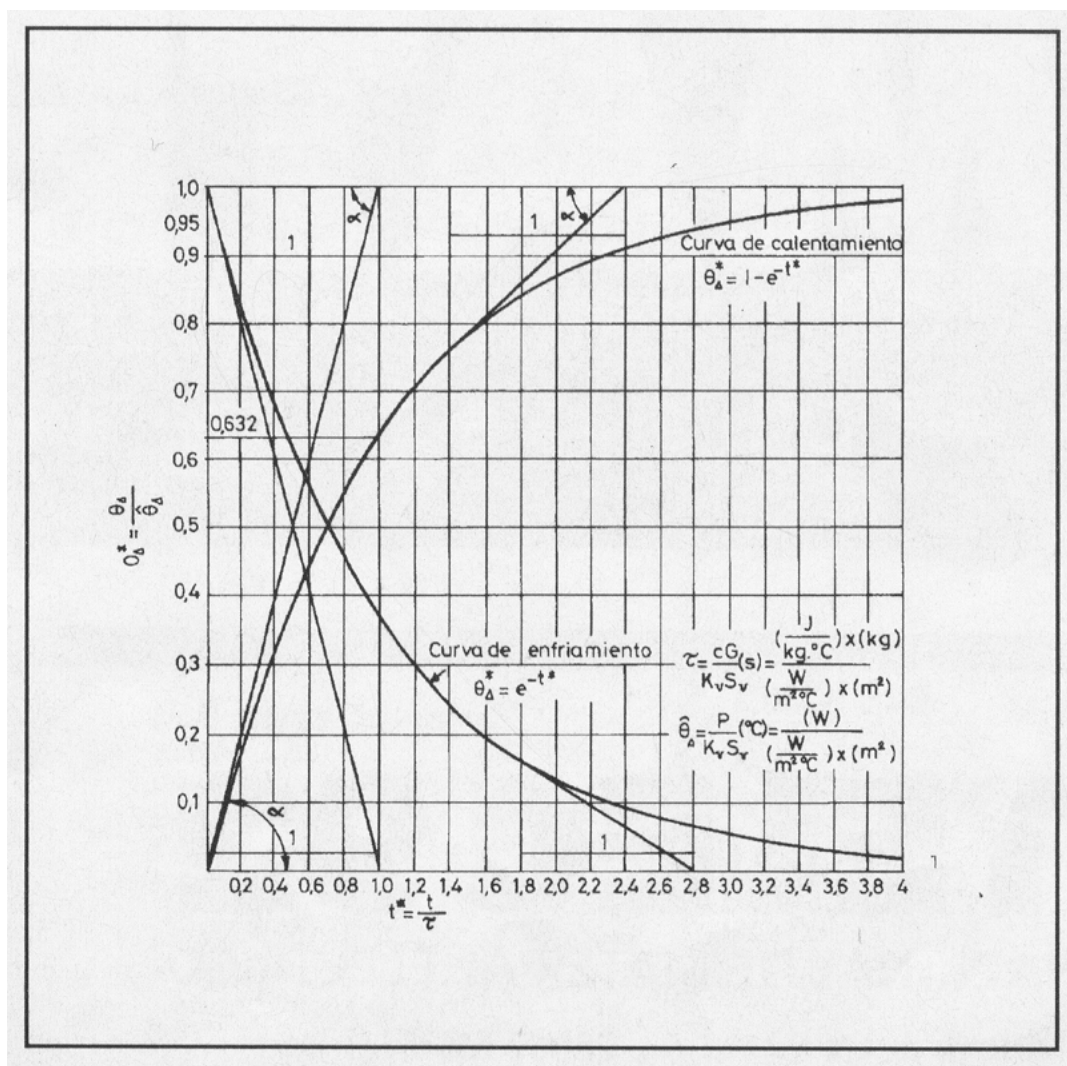


Fig. 5. Características universales.

También podemos definirla (figura 6) por el tiempo que determina la intersección de la tangente en el origen de la curva $\theta_A = 1 - e^{-t}$ con la asíntota θ_A (punto M de la figura).

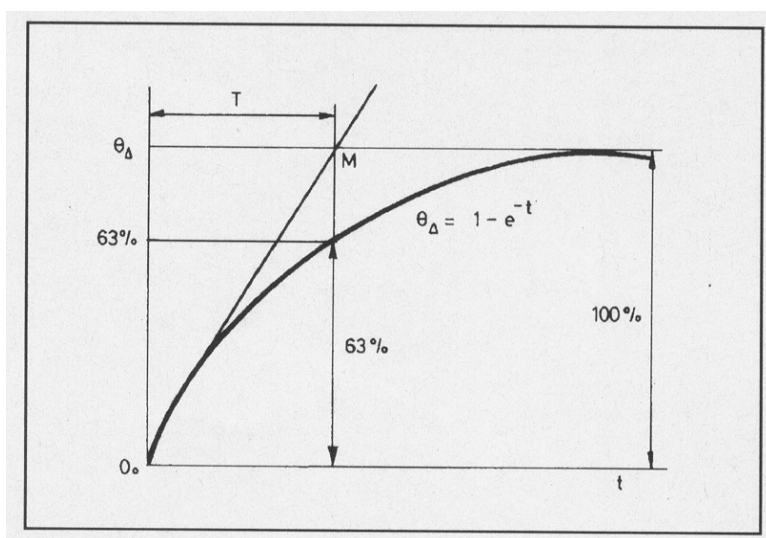


Fig. 6. Definición de la Constante de Tiempo.

En los transformadores la constante de tiempo aumenta o disminuye en la misma proporción que su masa, interviniendo también de manera importante su forma de refrigeración, en general podríamos situarla en los límites siguientes:

Transformadores en aceite: 45 a 180 minutos.

Transformadores secos: 15 a 45 minutos

La constante térmica o de tiempo del relé deberá ser aproximadamente la misma o menor que la del transformador con el fin de que el calentamiento del relé sea igual o incluso más rápido que el del transformador.

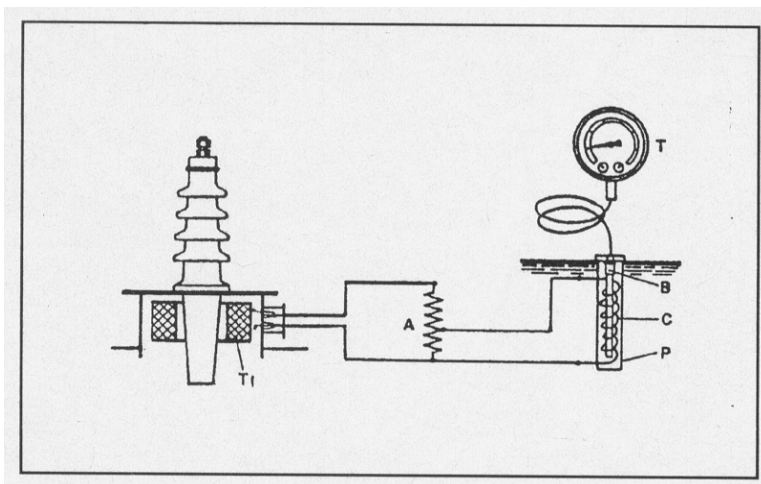


Fig. 7. Dispositivo de Imagen Térmica.

Los fabricantes de estos tipos de relé facilitan las correspondientes curvas de calentamiento y enfriamiento para una constante de tiempo determinada (por ejemplo 60 minutos).

En definitiva, el relé térmico tiene por misión el asegurar la protección contra sobrecargas en transformadores que por construcción no disponen de elementos de protección propios de *imagen térmica* (véase apartado siguiente), será preciso sobrepasar un determinado tarado del relé, para que este accione un contacto por medio del cual se excitará un circuito de alarma y/o de disparo. En tanto no se sobrepasen los umbrales de temperatura antes referidos, el relé permitirá cualquier sobrecarga del transformador, lográndose así un grado

óptimo de utilización en la instalación.

Los relés de máxima corriente no serían adecuados, como podemos observar, para cumplir estas condiciones, pues una sobrecarga más o menos duradera que no sobrepasase el límite térmico de la máquina activaría, sin duda, el disparo de la instalación.

Algunos tipos de relés térmicos, disponen también de un relé de máxima corriente que al sobrepasar su intensidad de ajuste, funciona sin temporización. Este complemento es utilizado como protección instantánea contra cortocircuitos.

Un relé térmico está compuesto fundamentalmente por un sistema de medida formado por columnas de tiras bimetalicas y de un acumulador de calor constituido por placas metálicas cuyo número y espesor determinan su constante térmica, así como de una banda calefactora recorrida por la corriente de alimentación que calienta tanto las tiras de bimetálico como el acumulador de calor. Tanto la banda calefactora como el acumulador de calor están cubiertos por una protección contra las radiaciones.

Dispositivos propios de imagen térmica en transformadores

Utilizados para la protección contra sobrecargas en transformadores de potencia, estos dispositivos están montados en el propio transformador. Un relé secundario controla indirectamente la temperatura del punto más caliente de los devanados. Dicha temperatura se registra en una esfera graduada que se encuentra en un lateral del transformador.

El equipo (figura 7) está compuesto esencialmente por:

- Una resistencia bobinada **C** de calentamiento.
- Una resistencia Shunt **A** calibrada.
- Un termómetro **T** con su equipo auxiliar.
- Un transformador de intensidad **Ti**.
- Contactos de control de ventiladores en transformadores con ventilación forzada, o bien para el control automático de banda y ventiladores en los de circulación forzada, también pueden disponerse contactos de alarma y disparo para límites temperaturas peligrosas en los bobinados.

La imagen térmica es alimentada por la corriente secundaria del transformador de intensidad **Ti** montado bajo tapa en los bornes del circuito de los devanados a proteger por regla general suelen ser los pasatapas del circuito de salida del transformador con objeto de que en la bobina de calentamiento **C** circula una corriente proporcional a la corriente de carga.

Para obtener incrementos adecuados de temperatura en esta bobina **C** será preciso derivar una parte de la corriente a través de la resistencia de precisión en Shunt **A** ajustable.

Este cuerpo calefactor, así formado, reproduce la diferencia de temperatura y la constante de tiempo del punto más caliente del devanado con relación a la temperatura del aceite existente bajo tapa considerado como el más caliente (parte superior de la cuba del transformador).

El instrumento de medida **T** nos indica la temperatura real del cobre en la parte superior del devanado (suma de temperaturas del aceite más la diferencia de temperatura en el cobre - aceite) y no la diferencia de temperaturas respecto al aceite.

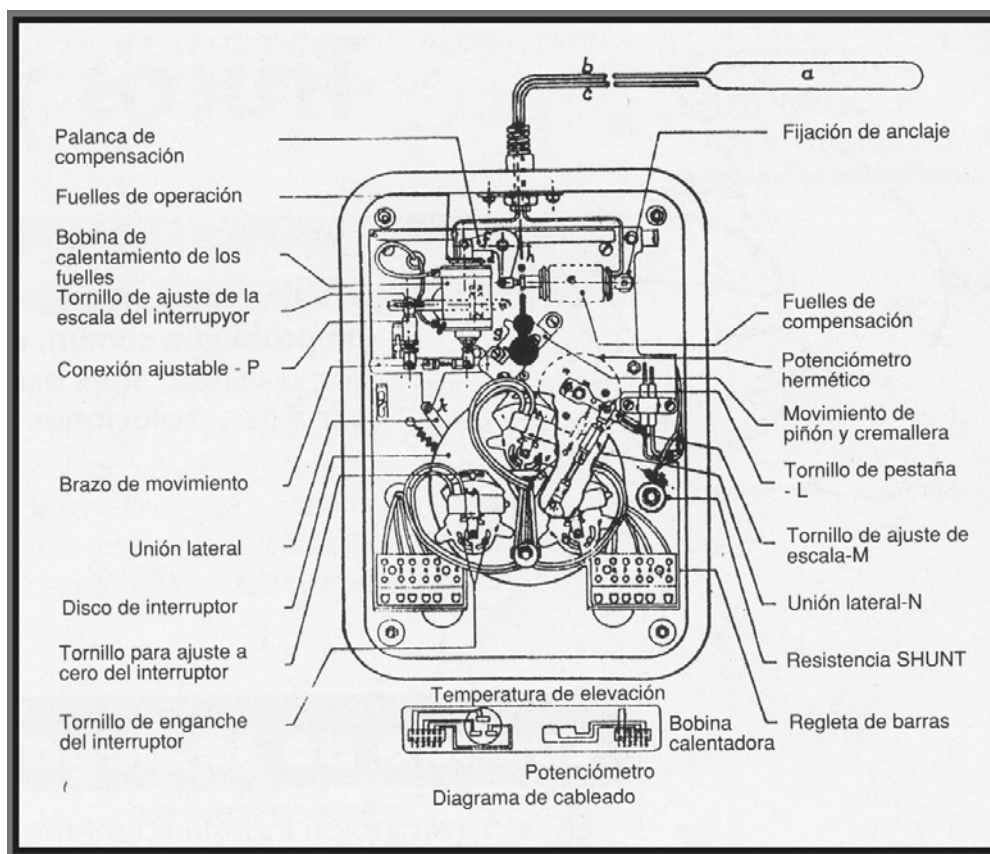


Fig. 8. Disposición interior de un instrumento de imagen térmica

Las ventajas de este dispositivo de imagen térmica son las de proteger los devanados contra temperaturas elevadas o fuera de los márgenes tolerables antes descritos, pero permite sobrecargas momentáneas cuando la temperatura aire y aceite son bajas. Estas posibilidades de sobrecarga del transformador permiten mejorar con ventaja la calidad en la explotación de instalaciones eléctricas.

Existen dispositivos de imagen térmica en los que las bobinas calefactoras van alojadas en la caja del elemento de medida, donde unos fuelles colocados a su alrededor dilatan y contraen según la temperatura, operando sobre contactos de control. La figura 8 representa un dispositivo de imagen térmica de estas características visto en su parte interior (no se muestra la escala graduada). El bulbo (a) es similar al de un termómetro ordinario de lectura a distancia y va conectado al cabezal por medio del tubo (b). Asimismo se ha instalado un segundo tubo (c) cercano al primero. Estos dos tubos están conectados a los fuelles (d) y (e) respectivamente, de modo que ambos fuelles tienen el mismo tamaño en capacidad y volumen y, sin tener en cuenta el bulbo, ambos sistemas son idénticos. Un cambio en la temperatura ambiente hace que el líquido con que está lleno el sistema se dilate o contraiga, y este movimiento se transmite a ambos fuelles. Según se observa en la figura los fuelles están unidos por medio de una palanca de compensación (f) de tal forma que los cambios de temperatura en los tubos capilares o en la caja del instrumento son compensados automáticamente, no influyendo en la indicación.

El extremo inferior de los fuelles de accionamiento (d) está conectado por medio de un piñón y cremallera (g) a la aguja indicadora. Cuando el bulbo es sometido a una elevación de temperatura, el volumen del líquido en el mismo aumenta, haciendo que los fuelles (d) se desplacen hacia abajo (están impedidos a moverse en sentido ascendente por la palanca (f) y los fuelles (e)).

El movimiento descendente es a su vez comunicado por medio de piñón y cremallera (g) a la aguja (h) y, a través de la unión (x) al disco giratorio de accionamiento de los contactos.

Protección Buchholz

Hemos mencionado anteriormente los defectos que pueden ocurrir en el interior del transformador, bien por causas propias o bien por causas externas.

También sabemos que los relés de protección se activan cuando determinados parámetros (tensión, corriente, frecuencia, etc.) sobrepasan sus umbrales de tarado, es decir, su actuación se efectúa al sobrepasar los límites normales de funcionamiento de la máquina o incluso cuando la avería se está produciendo. El relé Buchholz puede detectar la avería incluso antes de producirse, con el consiguiente ahorro económico de la reparación y de la producción que ello puede representar. En la práctica apenas existe avería interna alguna en transformadores ante la cual no reaccione el relé Buchholz.

Es obvio que, ante la actual proliferación de los transformadores secos, esta protección sólo será privilegio de los transformadores sumergidos, y ello es debido a su principio de funcionamiento simple y eficaz. Su acción está basada en el hecho de que cualquier avería producida en el aislamiento del transformador es debida a recalentamientos locales o a los efectos del arco eléctrico, lo que da lugar a la gasificación del aceite y de los aislantes próximos de la avería latente e incipiente. Este desprendimiento de gases depende de la intensidad y naturaleza del defecto, teniendo diferentes repercusiones sobre el relé.

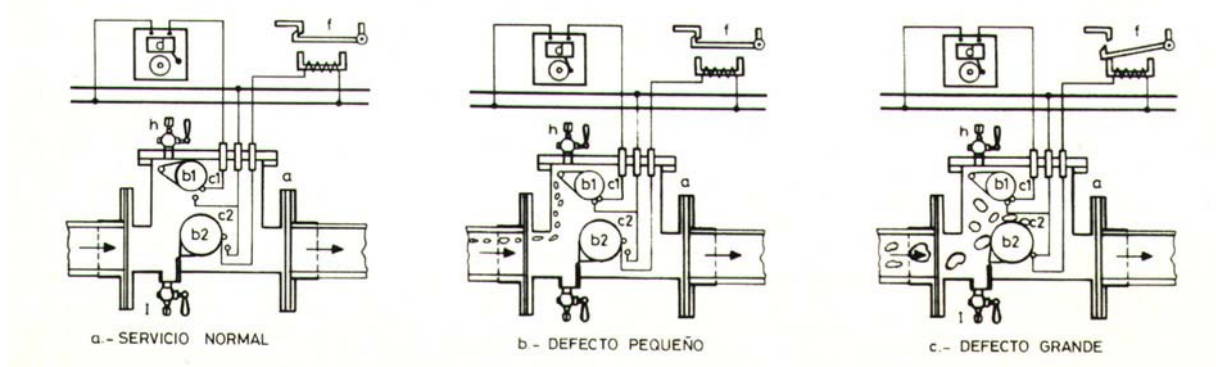


Fig. 9. Sistema de protección de Buchholz.

En averías de pequeña importancia, las burbujas de gas que se desprenden lentamente y llegan hasta el relé Buchholz situado en el conducto de unión de la cuba con el depósito conservador, acumulándose en su parte superior en forma de cámara de gas. En estado normal el relé Buchholz está completamente lleno de aceite y la acumulación de gas origina un descenso de nivel en el relé, por lo que un flotador superior (de alarma), bascula cerrando o abriendo los contactos de una válvula de mercurio, excitando de esta forma, una señal de aviso de avería inminente. (figura 9, a y b).

Cuando las averías son más severas dan lugar a desprendimientos de gases más violentos, propagándose ondas de presión hacia el depósito conservador con velocidades de 50 a 150 cm/s. Para estos casos el relé Buchholz dispone de una pantalla desplazable acoplada a la válvula de mercurio inferior que reacciona de forma inmediata, efectuando el disparo y aislando el transformador afectado de forma selectiva incluso antes de que los gases hubiesen llenado la cámara inferior del relé Buchholz. Cuando las ondas de presión son de velocidad inferior a las mencionadas, estas hacen bascular el flotador inferior (figura 9 c) que también provoca el disparo del circuito donde se encuentra el transformador afectado.

Cuando aparecen burbujas de aire (debidas, entre otras causas, a fugas del líquido dieléctrico, en puntos de estanqueidad, bombas de circulación interna de refrigeración etc.) el relé Buchholz reacciona del mismo modo que cuando existe desprendimiento de gases.

Del examen de los gases acumulados en las cámaras del relé podemos deducir interesantes conclusiones acerca de la índole de la avería, simplificando notablemente su identidad.

Por ejemplo:

Gases combustibles:

Blancos.- Proceden de la destrucción del aislamiento de papel.

Amarillos.- Proceden del deterioro de piezas de madera.

Grises o Negros.- Proceden de la descomposición del aceite.

Gases incombustibles.- Son debidos a la acumulación de aire por descensos de nivel al producirse fugas por juntas de estanqueidad, contracciones del líquido por descensos de temperatura, tratamientos de aceite

defectuosos, traslados del transformador, impregnación de los aislantes en los primeros días de su puesta en marcha, y otros casos similares.

Finalmente y como resumen destacamos algunos tipos de averías más comunes ante las que reacciona el relé Buchholz:

- Descargas superficiales entre piezas bajo tensión.
- Descargas superficiales entre piezas bajo tensión y el núcleo de hierro.
- Derivaciones a Tierra.
- Cortocircuitos entre espiras.
- Interrupciones de una fase.
- Calentamientos anómalos en el núcleo magnético
- Fugas de aceite (descensos de nivel).
- Descargas parciales en el seno del aceite.
- Contactos defectuosos en conmutadores de tomas, etc.

La protección diferencial de Merz-Price

En ausencia del relé Buchholz, la protección diferencial de Merz-Price es el único procedimiento sensible que interviene rápidamente en caso de defectos internos del transformador. Sin embargo ambas protecciones se complementan sin sustituirse una a la otra. Por ello en transformadores de pequeña y mediana potencia suele utilizarse exclusivamente el relé Buchholz, mientras que para transformadores de gran potencia, por su importante papel en el sistema eléctrico y su elevado coste, queda justificada la instalación de ambas protecciones. En tal caso la protección diferencial se limita a eliminar, rápida y selectivamente los cortocircuitos cuando los demás dispositivos de protección de la central eléctrica funcionen con un cierto retardo o de forma no selectiva.

La protección diferencial está basada en la medida de las intensidades antes y después del transformador, adaptándolas en magnitud y ángulo de fase y comparándolas en el relé. Cuando se sobrepasa una relación ajustable entre la intensidad de “paso” y la diferencial, el relé actúa (figura 10).

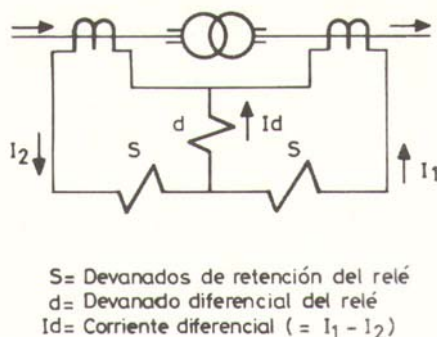


Fig. 10. Esquema de protección diferencial para un transformador de potencia.

Un relé de protección diferencial moderno va provisto de retención con *pendiente porcentual* y bloqueo o frenado al 2º y 5º armónico.

La retención por pendiente porcentual, (s) distingue con precisión entre faltas internas y externas al transformador, mientras que el bloqueo de armónicos retiene con una determinada temporización las sobreintensidades de origen externo, con objeto de evitar disparos intempestivos de la instalación a consecuencia de corrientes transitorias magnetizantes, producidas, por ejemplo, al conectar el transformador a la red (sobre todo en vacío). En definitiva, el relé no debe funcionar ni en el momento de la conexión del transformador ni en el caso de cortocircuitos externos (corrientes «pasantes»). En cambio deberá ser rápido y sensible a los defectos que ocurren dentro de su campo de acción delimitado por los transformadores de intensidad primarios y secundarios.

Retención por pendiente porcentual

Su funcionamiento puede observarse en los esquemas de la figura 11.

Para intensidades iguales circulando en el sentido indicado en las figuras 10 y 11 b (funcionamiento normal o con defecto externo) ninguna intensidad atravesará el devanado diferencial del relé. En funcionamiento normal, tanto la corriente diferencial I_d como las de retención son muy pequeñas. Cuando existe defecto externo, la corriente de retención I_H es elevada y está controlada por los devanados S. Siendo I_d muy pequeña, el relé no actúa. ($I_d = I_1 - I_2 \approx 0$).

Para intensidades desiguales $I_d = I_1 + I_2$ el relé funcionará (figura 11 a). Es el caso de defectos internos en el transformador o dentro del campo de acción limitado por los transformadores de intensidad primarios y secundarios. Se produce, también, una inversión en el sentido de circulación de una de ellas.

La imposibilidad de obtener un circuito totalmente equilibrado hace que por el devanado diferencial del relé circule una pequeña corriente, correspondiente a la magnetización del núcleo del transformador, así como la debida a los errores de selección de los transformadores de intensidad. Estas corrientes sólo representan un pequeño porcentaje de la corriente nominal, pero en determinadas circunstancias, como es el caso de los transformadores con conmutador en carga, pueden llegar a ser hasta de un 20% de la corriente nominal.

Para absorber estos desequilibrios tienen fundamento las bobinas **S** de retención, por lo que, en consecuencia, se requerirán mayores corrientes diferenciales para hacer funcionar el relé.

La característica porcentual de la figura 12 define el desequilibrio de intensidades preciso para que la protección actúe.

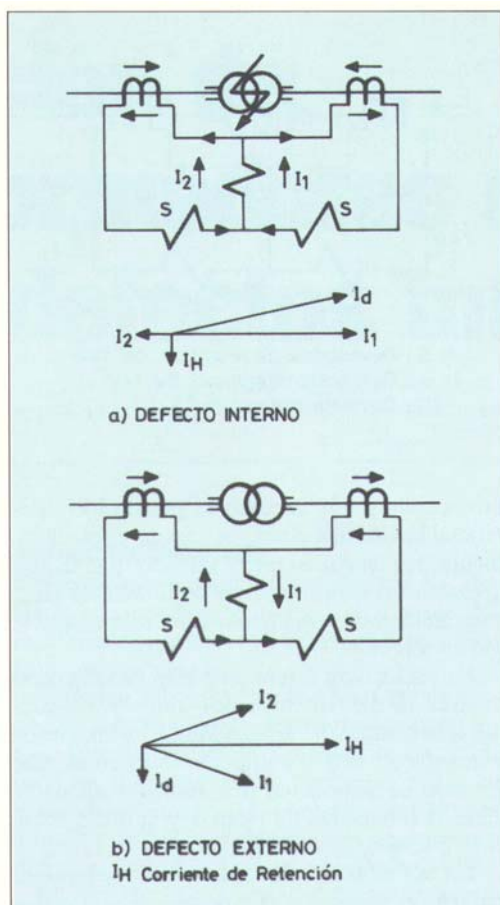


Fig. 11. Efectos de las bobinas de retención para defectos internos y externos

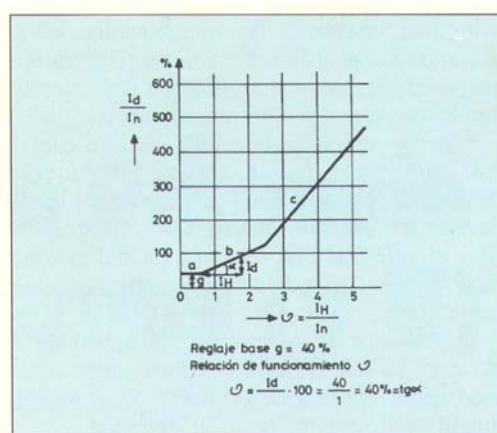


Fig. 12. Pendiente porcentual del relé diferencial.

Esta característica de disparo corresponde a una determinada relación entre la corriente diferencial **I_d** y la corriente de retención **I_H** , presentando dos codos. A esta relación se le designa como relación de retención “ **ϑ** ” que es la corriente diferencial, expresada en tanto por ciento de la corriente de retención, a la que actúa el relé. Es decir:

$$\vartheta = \frac{I_d}{I_H} \cdot 100\% = \text{tg} \alpha$$

En la zona (a) de la figura 12 ($I_H = 0$ a $0,5 I_n$) el valor de la corriente diferencial que provoca el funcionamiento es constante e igual al ajuste base “ **g** ” entendiéndose por tal al valor de funcionamiento de la corriente I_d en % de I_n y por $I_H = 0$.

En la zona (b) ($I_H = 0,5$ a $2,5 I_n$) aumenta el valor de la corriente de funcionamiento. Es este aumento el que anteriormente designábamos **ϑ** o “relación de funcionamiento” y corresponde a $\text{tg} \alpha$, o sea, la pendiente de la característica de funcionamiento. A partir del segundo codo la característica o pendiente porcentual es mucho más escarpada (zona c).

Gracias a esta característica de dos codos se obtienen sensibilidades máximas para pequeñas corrientes de defecto (zona a), mientras que para corrientes de defecto más importantes reduce la sensibilidad (zonas b y c).

El bloqueo o frenado de armónicos

Al conectar un transformador de potencia, especialmente estando éste funcionando en vacío, se produce una fuerte irrupción transitoria de corriente en el devanado primario (*inrush current*), que no es reflejada en el secundario.

Este fenómeno hace circular una corriente por el devanado diferencial del relé, provocando su actuación si no dispone de medios adecuados para evitarlo.

TABLA VI				
Potencia trafo MVA	Corriente de conexión en p.u. de la I_N			
	Valores de cresta			
	Núcleos de pérdidas bajas		Núcleos de pérdidas altas	
	A.T.	B.T.	A.T.	B.T.
0,5	11,0	16	6,0	9,4
1	8,5	14	4,8	7,0
5	6,0	10	3,9	5,8
10	5,0	10	3,8	4,0
50	4,5	9	2,5	3,0

En transformadores modernos, con núcleo magnético de chapa de grano orientado y potencia superior a 10 MVA, la máxima amplitud de la corriente transitoria magnetizante puede alcanzar entre 5 y 10 veces I_N , en caso de conexión a la red por su lado de alta tensión (o primario), y de 10 a 20 veces, en caso de

conexión por el lado de baja tensión (o secundario).

Su magnitud y duración (hasta varios segundos), dependen entre otras a la construcción del núcleo magnético, a su tipo de conexión, a la existencia de otros transformadores conectados en paralelo, al valor instantáneo de la tensión en el momento de la conexión, etc.

Como ejemplo se exponen en la tabla VI algunos valores de la corriente de conexión en transformadores:

En la figura 13 están representadas las formas de onda de las corrientes en caso de defecto del sistema de potencia que es de tipo senoidal pura, acompañada de una componente continua que dependerá del instante en que se produce la falta, según el punto donde se encuentra la onda de tensión y la magnitud y ángulo de la impedancia del circuito.

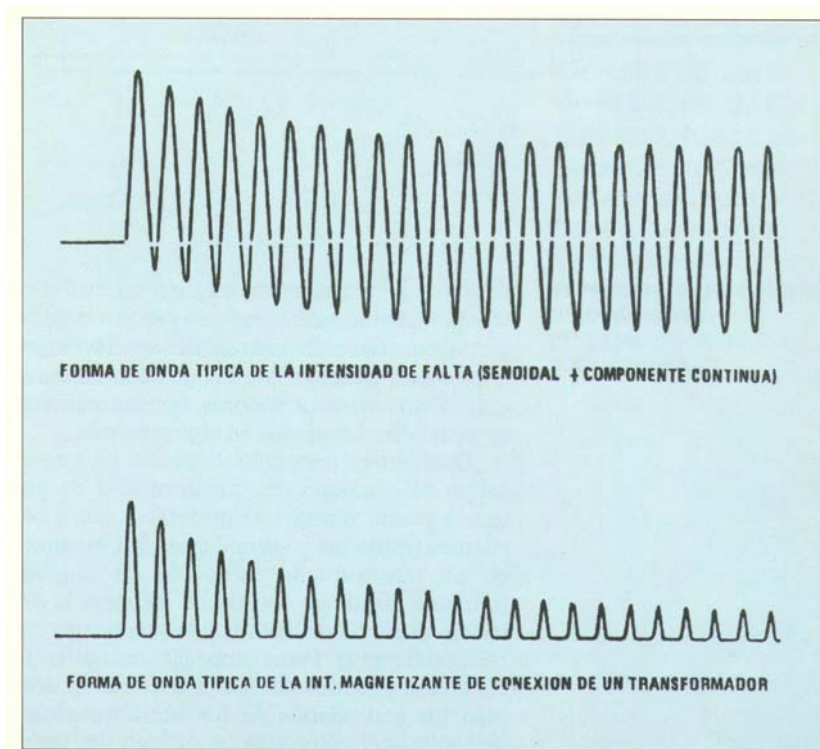


Fig. 13. Formas de onda de las corrientes de falta y magnetizantes de un transformador

En cambio la intensidad magnetizante de conexión del transformador presenta una forma de onda muy

TABLA VII							
Armónico	C.C.	2°	3°	4°	5°	6°	7°
% típico de la amplitud respecto a la fundamental	55	63	26,8	5,1	4,1	3,7	2,4

distorsionada con picos en los vértices para el semiciclo positivo y prácticamente sin intensidad en los semiciclos negativos.

La composición de esta forma de onda suele ser como sigue:

Como se observa, es mucho más acusado el valor del 2º armónico en relación con el resto.

Este es el principio en que se basa el frenado de armónicos en relés diferenciales, distinguiendo, por la forma de onda, entre faltas e intensidad magnetizante.

Para ello se disponen elementos de bloqueo constituidos por dos filtros, uno serie y otro paralelo, sintonizados con la componente del 2º armónico de la corriente de conexión.

El filtro serie presenta una impedancia elevada a los armónicos, sin embargo, permite el paso a la onda fundamental que es rectificadora para dar lugar a la tensión de operación.

El filtro paralelo bloquea la onda fundamental dando paso a los armónicos que después de rectificadas dan lugar a la tensión de frenado.

Otro efecto importante, controlado por el relé diferencial, es el producido en el transformador por aumentos accidentales de tensión debido a perturbaciones en el servicio, provocando una corriente de magnetización 10 veces superior a la nominal para aumentos de tensión del 20% mientras que con un 30% puede superar 100 veces I_N .

Esta corriente magnetizante tiene un alto contenido del quinto armónico, por lo que el relé deberá disponer elementos de retención sintonizados para este armónico.

Consideraciones del conexionado

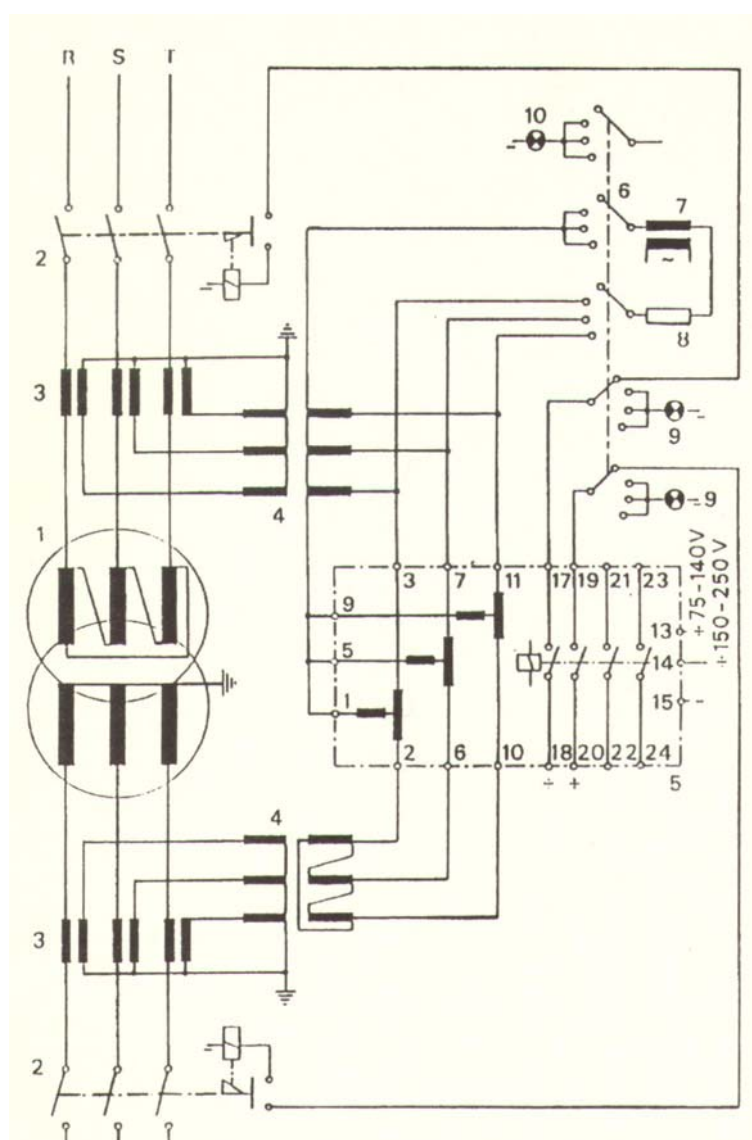


Fig. 14. Protección diferencial de un transformador de dos arrollamientos.

Como hemos venido diciendo, las corrientes provenientes de los transformadores de intensidad primarios y secundarios hacia el relé deben ser iguales en magnitud y en oposición de fase. Puesto que en un transformador de potencia las intensidades primarias y secundarias son distintas, será preciso previamente igualarlas antes de compararlas el relé diferencial. Con este fin se emplean transformadores de corriente de relación adecuada, y si ello no fuese suficiente será preciso instalar transformadores de intensidad auxiliares que compensen exactamente las posibles diferencias. Estos transformadores igualadores van en ocasiones instalados en el propio relé.

También es conocido el hecho de que el grupo de conexión del transformador de potencia puede introducir un desfase entre corrientes primarias y secundarias. Por ejemplo, en un transformador acoplado en estrella- triángulo, existe un desfase de 30º entre la corriente primaria de línea I_1 y la secundaria correspondiente I_2 . 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 de potencia, en estrella y en triángulo en el lado de la estrella (figura 14).

De la misma forma conectaremos:

Conexión del trafo. de potencia	Conexiones de los T.I.
D - Y	Y - D
Y - D	D - Y
D - D	Y - Y
Y - Y	D - D
D - Zig Zag (Con cero grados de desfase entre primario y secundario)	D - D

Un montaje inverso podría ocasionar la actuación de la protección, en caso de defectos a tierra sobre la red unida a los arrollamientos en estrella. En tales condiciones los componentes homopolares de la corriente de cortocircuito solo se encontrarían en los secundarios de los transformadores de intensidad conectados en estrella.

Otra consideración importante a tener presentes en este tipo de protección es la de evitar que los transformadores de intensidad puedan llegar a la saturación bajo condiciones de carga nominal o cuando la corriente de cortocircuito llegue a su máximo valor.

En la práctica se suele aplicar en el cálculo un coeficiente de sobreintensidad de 10 siendo su clase 5P10, o sea (0, 33 ... 10) I_N con error de corriente inferior al 5% y error de ángulo inferior a 300 minutos.

Cuando el transformador a proteger lleva incorporado regulador en carga, no será posible ajustar perfectamente la relación de los T.I. en todo el campo de regulación; será por tanto la característica porcentual regulada adecuadamente la que insensibilizará estos desequilibrios.

La protección de cuba

Este tipo de protección, cada vez más utilizada en transformadores de distribución con resultados aceptables, está basada en la medida de la corriente que circula por la conexión de la cuba del transformador hacia tierra en caso de defectos internos de sus partes activas contra masa. En tales casos la corriente que circula hacia tierra dependerá de la configuración de la red y de las impedancias de los circuitos derivados a la cuba y de esta hacia tierra.

Es interesante, por tanto, que esta conexión a tierra sea de escaso valor óhmico y lo más corta posible. No es aconsejable la interconexión de esta tierra con la correspondiente a la de neutro, porque ello daría lugar a desconexiones intempestivas, motivadas por defectos ajenos al transformador.

Esta protección es igualmente sensible a aquellos defectos externos que accidentalmente pudieran poner en tensión la cuba del transformador, tal es el caso de efluvios de corriente en pasatapas por defecto de aislamiento, descarga de sobretensión en explosores, faltas provocadas por contactos de animales, circuitos auxiliares derivados a masa, etc.

La protección de cuba, (figura 15) comprende:

- 1 Transformador de intensidad toroidal (T_1).
- 1 Interconexión cuba/tierra (T_c).
- 1 Relé instantáneo de máxima intensidad (R).
- Relés intermedios de disparo y señalización.

Si Z_C , Z_t y Z_r son las impedancias de la cuba, de su interconexión a tierra y del circuito de alimentación del relé respectivamente, cuando se produce un defecto a masa en el transformador la corriente I_d dará origen a una corriente en el relé, cuyo valor es:

$$I_r = \frac{Z_C}{Z_C + Z_r + Z_t} \cdot I_d \quad (1)$$

Una corriente de cortocircuito a tierra I_{cc} en la instalación, se podría transferir a la tierra de cuba del transformador, originando una corriente I_r en el relé:

$$I_r = \frac{Z_c}{Z_c + Z_r + Z_t} \cdot I_{cc} \quad (2)$$

de donde:

$$\frac{I_r}{I_{cc}} = \frac{Z_c}{Z_t} \cdot \frac{I_d}{I_{cc}} \quad (3)$$

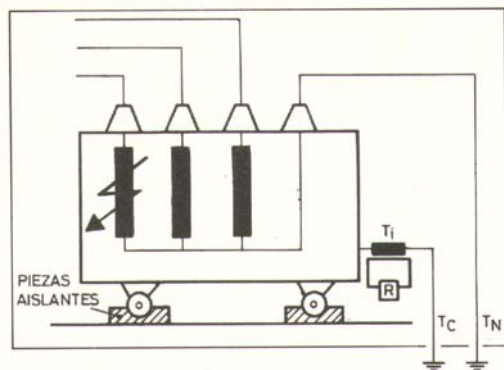


Fig. 15. Protección de cuba

Deduciéndose de esta expresión que los defectos externos I_{cc} no deberán dar lugar a corrientes de funcionamiento en el relé, se trata, por tanto de elevar considerablemente la impedancia Z_c , en la práctica se suelen aislar las salidas (ruedas, etc.) del transformador con relación al terreno con lo que limitaremos mucho el valor de I_r .

Así mismo, la expresión (3) nos pone de manifiesto, la necesidad de no interconectar la tierra de neutro con la tierra de cuba, debido a las elevadas I_{cc} circulantes que provocarían desconexiones intempestivas en la instalación.

BIBLIOGRAFIA: Artículo publicado por Andrés Granero en la revista MEI, Junio de 1.992.

