INSTITUTO DE ENERGÍA ELÉCTRICA
FACULTAD DE INGENIERÍA
UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN JUAN

Curso: Protecciones de Sistemas Eléctricos de Potencia

Tema 5:
Protección de Transformadores

Por: Dr.-Ing. Eduardo Orduña

Tegucigalpa, Honduras, Septiembre de 2019

Protección de transformadores
Deben considerar…

- Protección contra perturbaciones de origen externo
  - *Sobretensiones de origen atmosférico (Rayos).*
  - *Desconexiones extemporáneas.*
  - *Cortocircuitos de origen diverso.*
  - *Sobrecargas.*

(Detectan anomalía externa y tratan de evitar que afecte al transformador).

- Protección contra defectos internos.
  - *Dieléctricos.*
  - *Eléctricos.*
  - *Electrodinámicos.*
  - *Térmicos.*
  - *Mecánicos.*

(Ante una anomalía tratan de minimizar daño)

- Detección de defectos incipientes
  - *Contactos defectuosos*
  - *Puntos flotantes*

(Detectar defecto incipiente para evitar su evolución)

CAUSAS DE LAS FALLAS

- **PERFORACIÓN DE LA AISLACIÓN**

La perforación de la aislación entre arrollamientos o entre arrollamiento y núcleo pude ser causada por:

- Envejecimiento de la aislación debido a al exceso de temperatura durante tiempos prolongados
- Aceite contaminado
- Descargas por efecto corona en la aislación
- Sobretensiones transitorias producidas por tormentas o maniobras en la red
- Esfuerzos en los arrollamientos debido a fallas externas con altas corrientes.

ENVEJECIMIENTO DE LA AISLACIÓN

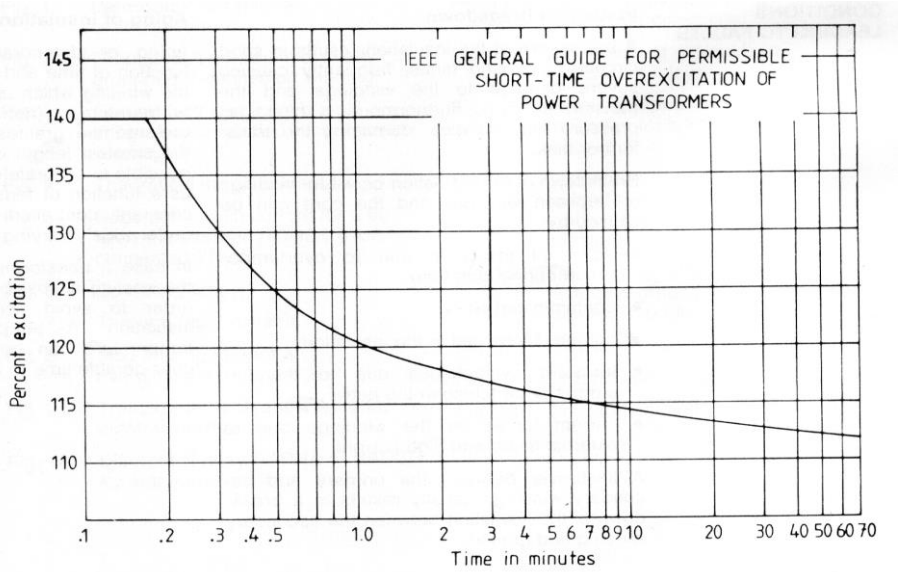
- El envejecimiento o deterioro de la aislación es una función del tiempo y la temperatura.
- No es posible predecir en forma precisa el tiempo de vida como una función de la temperatura y tiempo
- Una medida posible es mejorar el sistema de enfriamiento o reducir la carga para evitar un envejecimiento acelerado de la aislación.

SOBRECALENTAMIENTO DEBIDO A LA SOBREEXCITACIÓN

- De acuerdo a la norma IEC 76-1, los transformadores deben ser capaces de suministrar la corriente nominal para una tensión aplicada igual al 105% de la tensión nominal.
- Cuando un transformador se opera a tensiones muy elevadas o a frecuencias anormalmente bajas, su núcleo se sobreexcita.

Debe ser desconectado si la tensión es muy elevada o la frecuencia es demasiado baja.

Guía general de la IEEE para sobreexcitaciones admisibles los transformadores pueden resistir sobreexcitaciones solo por tiempos reducidos.



Sobreexcitación permisible de corto tiempo

- Las unidades transformador-generador normalmente están expuestas a condiciones de sobretensiones y subfrecuencias. Deben estar provistos luego con un relé de sobreexcitación que actúe cuando la relación entre la tensión y la frecuencia (V/Hz) se torna elevada.

CONTAMINACIÓN DEL ACEITE Y DISPERSIÓN

- Aceite: medio de aislación eléctrica y también de medio de refrigeración.
- El aceite debe cumplir con los requerimientos de la norma IEC 296.
- El testeo de la capacidad dieléctrica del aceite se realiza normalmente in-situ para obtener rápidamente un chequeo de la pureza del aceite.
- El nivel de aceite debe monitorearse; puede ocurrir una perforación de la aislación si el nivel es muy bajo.

ENFRIAMIENTO REDUCIDO

- Los sistemas de enfriamiento forzado deben estar supervisados, y debe activarse una alarma si el sistema de refrigeración se para.
- La temperatura del aceite puede ser medida en forma constante y puede tomarse acciones antes que el transformador se recaliente.

TIPOS DE FALLA Y REGÍMENES ANORMALES

Se pueden dividir en dos clases: *fallas externas y fallas internas*.

➢ Fallas externas

Ocurren fuera del transformador.
Estas fallas incluyen:

- ***Sobrecargas***:
  - causan un recalentamiento del trafo, pudiendo provocar daños en forma permanente. La constante de tiempo de sobrecalentamiento es sin embargo larga, y puede tomar horas de exposición hasta que la condición se torna de seriedad.
  - Una causa de sobrecarga puede ser la desigual distribución de cargas de transformadores en paralelo.

- ***Sobretensión***:
  - Transitorios electromagnéticos (factores climáticos). causan solicitaciones en los finales de espiras y con esto probables perforaciones. Dispositivos de descarga que están diseñados para tal propósito.

  - Transitorios debido a desbalances de potencias-frecuencia (maniobras).

- Condiciones de operación en emergencia, tal como pérdida repentina de carga en una porción del sistema que causa la elevación de la tensión (causa sobre-flujo en el transformador, incrementa las pérdidas en el hierro, resulta en un rápido recalentamiento del circuito de hierro del trafo, daños de la aislación de la laminación del hierro y aún de la aislación de los arrollamientos.

- ***Sub-frecuencia***:
  - es provocada también por grandes perturbaciones del sistema que causan desbalances entre la generación y la carga.
  - La condición es similar a la sobretensión en que se incrementa la corriente de excitación a frecuencias bajas.
  - Usualmente la relación de tensión/frecuencia no se permite que supere 1.1 pu., el cual se denomina volt/hertz límite.

- ***Cortocircuitos en el sistema externo***:
  - Fallas del sistema que son externas a la zona de protección del trafo.
  - Las elevadas corrientes de fallas externas causan también elevadas solicitaciones en los arrollamientos, con su máximo en el primer ciclo. Este corto tiempo hace casi imposible proteger al trafo contra tal solicitación.
  - La estrategia de protección para tales eventos es, por lo tanto, materia de diseño del transformador.

➢ Fallas internas

- Son fallas que ocurren dentro de la zona de protección del trafo. Incluye fallas externas que ocurren dentro de la zona que cubren los TI's.

- En general se dividen en dos grupos: fallas incipientes y fallas activas.

  Fallas incipientes: se desarrollan en forma lenta, pero que pueden evolucionar en fallas más serias si no se detecta la causa y se corrige. Pueden ser, sobrecalentamiento, sobre-flujo o sobre-presión.

  - ***Sobrecalentamiento*: debido a diversas condiciones como:**

    ✓ Conexión interna pobre ya sea en los circuitos eléctricos o magnéticos
    ✓ Pérdida de refrigerante.
    ✓ Bloqueo del flujo de refrigerante.
    ✓ Pérdida de ventiladores o bombas de enfriamiento.

  - ***Sobre-flujo***: ya se discutió anteriormente.

- ***Sobre-presión***: La sobrepresión en el tanque del trafo ocurre debido a la liberación de gases o productos que acompañan al calentamiento localizado debido a cualquier causa.

  - ✓ falla entre espiras puede producirse en forma lenta, liberando gases en el proceso, o calentamiento local que puede originar gases, provocando un aumento de presión, el cual puede desarrollarse repentinamente o lentamente durante un largo período de tiempo.

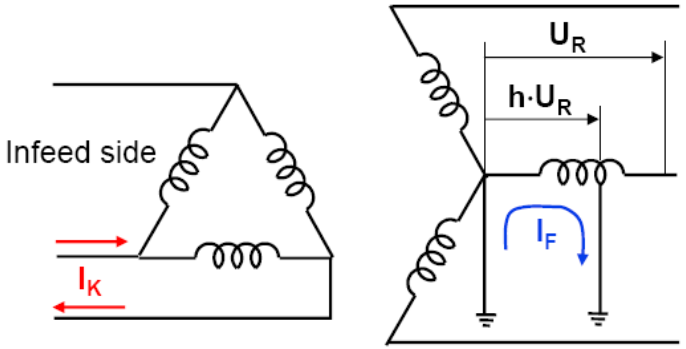
Fallas activas: Son fallas que ocurren en forma repentina y que requieren normalmente una rápida acción del sistema de protección para desconectar el transformador del sistema de potencia y limitar su deterioro.

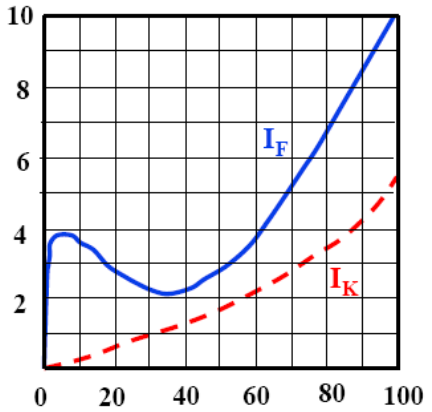
- Cortocircuitos en arrollamientos conectados estrella-triángulo, ya sea, puesta a tierra con impedancia, puesta a tierra directa o aislado
- Cortocircuitos en arrollamientos conectados en triángulo.
- Cortocircuitos fase-fase
- Cortocircuitos entre espiras
- Fallas del núcleo
- Fallas del tanque.

FALLAS A TIERRA EN UN ARROLLAMIENTO SECUNDARIO CONECTADO EN ESTRELLA A TIERRA SIN RESISTENCIA DE PUESTA A TIERRA

- La magnitud de la corriente de falla está determinada por la reactancia y la tensión entre el punto de falla y tierra.
- La reactancia decrece rápidamente para fallas aproximándose al neutro.
- Corriente de falla mayor para una falla cerca del neutro que para una falla a la mitad del arrollamiento.

In=corriente nominal

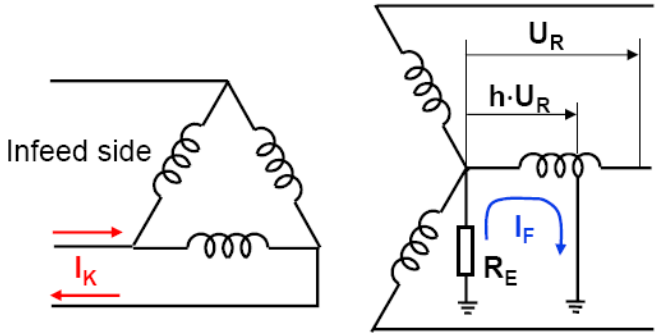


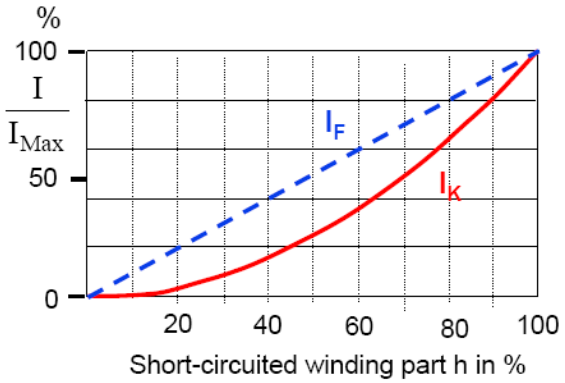


- Corriente del primario, para una falla a tierra entre 0-40% desde el neutro es menor a 1.5 x In. Un relé de sobrecorriente del lado primario no puede detectar fallas a tierra.

FALLAS A TIERRA EN UN ARROLLAMIENTO SECUNDARIO CONECTADO EN ESTRELLA A TIERRA A TRAVÉS DE UNA ALTA IMPEDANCIA DE PUESTA A TIERRA

- La corriente de falla está determinada aquí por la impedancia de puesta a tierra y la ubicación de la falla. La corriente del primario es aproximadamente proporcional al cuadrado de la fracción cortocircuitada del arrollamiento.





$$I_F = \frac{h \cdot U_R}{R_E}$$

$$I_K = \frac{h \cdot w_2}{w_1} \cdot I_F = h \cdot \frac{U_{2n}}{U_{1n} \cdot \sqrt{3}} \cdot I_F$$

$$I_K = h^2 \cdot \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot \frac{U_{2n}}{U_{1n}} \cdot \frac{U_R}{R_E}$$

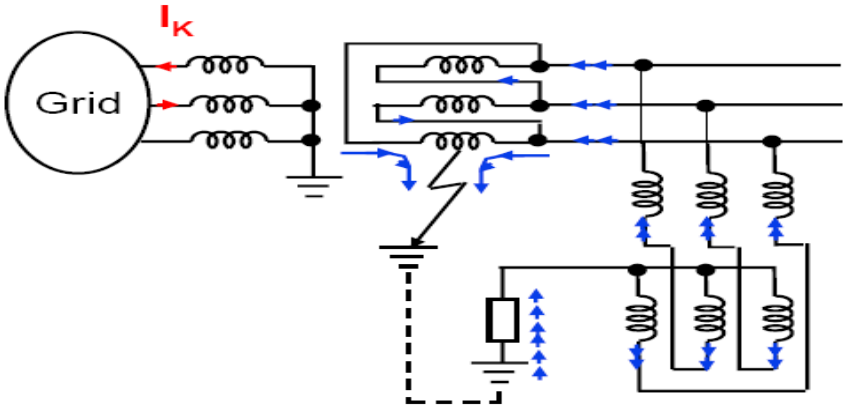
Corriente de falla a tierra en un arrollamiento en estrella puesto a tierra a través de una impedancia alta

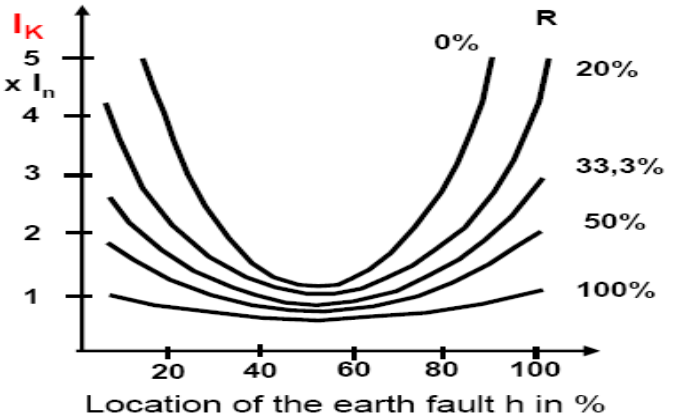
FALLAS A TIERRA EN UN ARROLLAMIENTO CONECTADO EN TRIÁNGULO

- La magnitud de la corriente de falla a tierra depende del sistema de puesta a tierra del sistema.

- La impedancia de falla de un arrollamiento conectado en triángulo es máxima para fallas en el punto medio del arrollamiento y puede llegar a ser entre 25% a 50%.

- Las corrientes de falla pueden ser, por lo tanto, iguales o menores que la corriente nominal cuando la impedancia de fuente no es despreciable.





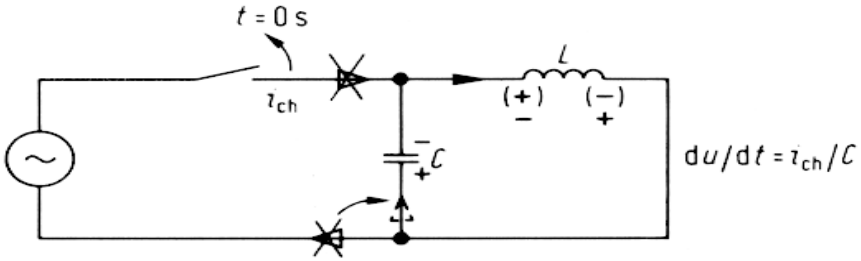
- Para fallas cerca del final de un arrollamiento, la corriente de falla alcanza el valor de la corriente de falla para una falla monofásica.

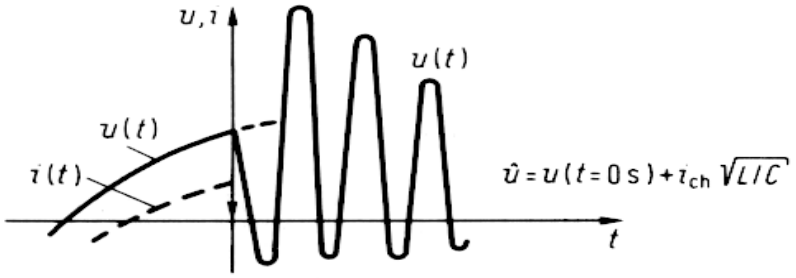
FALLAS ENTRE ESPIRAS

- Contacto metálico directo o descarga entre conductores dentro del mismo arrollamiento físico.

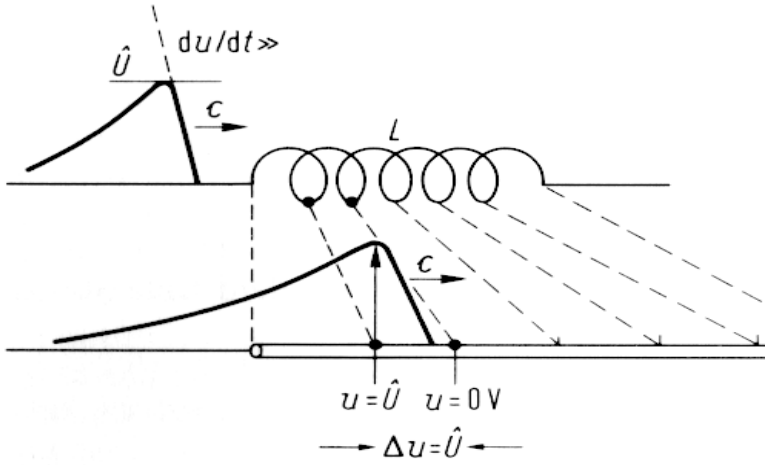
- Las fuerzas dinámicas por fallas en el sistema, pueden deteriorar la aislación y provocar una falla entre espiras (transformadores relativamente pequeños y viejos).

- Las espiras de entrada son a menudo expuestos a sobretensiones de alta velocidad de cambio: picos inductivos de sobretensión en el caso de desconexión de cargas inductivas de un trafo en vacío.



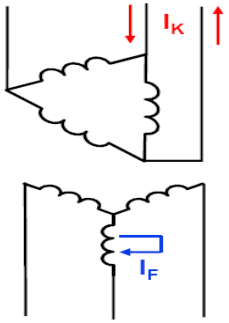


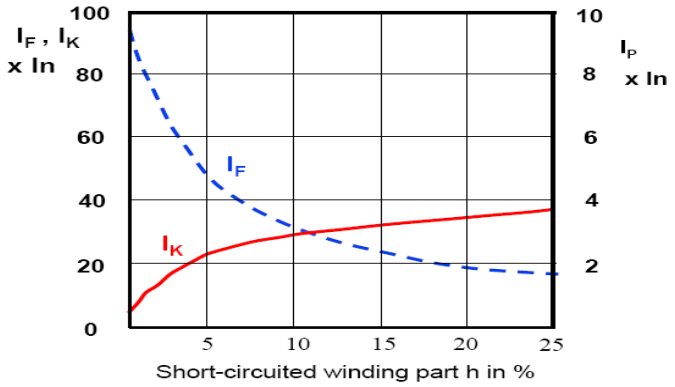
- Sobretensiones con una gran pendiente de cambio o frente de onda muy escarpado (sobretensiones atmosféricas y algunas sobretensiones de maniobra.



- Diferencia tensión longitudinal elevada y desigual a lo largo del arrollamiento que solicita fuertemente la aislación entre conductores vecinos (entre el 70% y el 80% de todas las fallas son contactos entre espiras.

- La falla puede producirse también a causa de descargas por efecto corona. La espira en cortocircuito actúa como un anillo en cortocircuito y conduce, debido a al acoplamiento de transformación entre el resto del arrollamiento y la parte den cortocircuito, a corrientes de fallas extremadamente altas. Las fuerzas resultantes pueden arrancar o aplastar el anillo.


I_K
I_F


I_F , I_K
x In
100
80
60
40
20
0
10
8
6
4
2
I_P
x In
I_F
I_K
5
10
15
20
25
Short-circuited winding part h in %

- Las fallas entre espiras que abarcan pocas espiras son dificultosas para detectar por medio de relés de corriente, dado que las corrientes en los terminales se incrementa muy poco (la corriente de falla es igual a la corriente nominal cuando se cortocircuitan del 2% al 4% de las espiras).

- La corriente en las espiras cortocircuitadas puede llegar a 50-100 veces la corriente nominal. Eso significa recalentamiento local, presencia de arco, descomposición del aceite y liberación de gas.

FALLAS FASE-FASE

- Cortocircuitos entre fases dan lugar a corrientes elevadas, limitadas solamente por la impedancia de fuente y la impedancia de dispersión del transformador.

FALLAS EN EL NÚCLEO

- Las laminaciones del núcleo del trafo se aíslan para evitar la circulación de corrientes de Eddy, cruzando el entre-hierro entre láminas adyacentes.

- Se aíslan las sujeciones que mantienen las láminas juntas para no permitir que las mismas causen un cortocircuito magnético a lo largo de la laminación.

- Cualquier sobre-calentamiento o sobre-flujo del transformador implica la posibilidad de causar un corto magnético (paso de corrientes de Eddy incrementarán gradualmente las pérdidas en el núcleo causando sobre-calentamientos localizados).

- Esta condición no afecta mayormente a las corrientes en terminales del trafo, haciéndola difícil de detectar (normalmente por relés de gases, daño importante para acompañado por emisión de gases e incremento de la presión del tanque por arriba del nivel del aceite.

FALLAS DEL TANQUE

- En transformadores inmersos en aceite, el refrigerante primario es el flujo de aceite alrededor del núcleo y bobinas del trafo.

- Ante pérdida de aceite, sobrecalentamiento y reducción del material aislante (efecto similar por el bloqueo de la circulación del refrigerante).

- Algunos trafos son refrigerados también por ventiladores externos cuyo aire enfría al aceite circulante. Fallas de tales ventiladores también pueden causar exceso de calentamiento.

DESCARGAS EN LOS BUSHING

- Las descargas en los bushings pueden ser del tipo atmosférico u otros fenómenos de descarga, que resulte en un camino de cortocircuito hacia el tanque que está puesto a tierra.

- Tales fallas, o fallas en conexiones externas del trafo, son detectadas por algunos, sino todos, tipos de esquemas de protección del trafo.

➢ SISTEMAS DE PROTECCIÓN

- La filosofía básica de los dispositivos de protección es diferente para fallas incipientes que para fallas activas.

- Objetivos de la protección:

  ✓ **Protección contra fallas activas**: aislación rápida del trafo fallado, así minimizar el efecto de la perturbación y también, minimizar el daño en el transformador (reparaciones largas y caras, peligro para el personal.

- ✓ **Protección contra fallas incipientes**: No requieren una rápida detección y aislación (se desarrollan en forma lenta, tiempo para la observación cuidadosa y testeo. Muchas veces estas fallas no son detectadas por lo relés dedicados a las fallas activas. Esto sugiere un equipo de protección suplementario dedicado a tal fin.

- ✓ Se utiliza normalmente relés de protección rápidos y confiables. Se recomienda que la protección provoque el disparo instantáneo de todos los interruptores del transformador en caso de falla interna (protección primaria), y que también desconecte el transformador en caso de cortocircuito externo, a modo de respaldo.

- ✓ Generalmente los transformadores con depósito de aceite estaán equipados de la siguiente manera:
  - Transformadores con potencia nominal mayor a 5 MVA:
    - Relé detector de gas (Relé Buchholz, ver más adelante)
    - Protección contra sobrecargas (relé térmicos o sistemas de monitoreo de la temperatura)
    - Protección de sobrecorriente
    - Protección contra fallas a tierra
    - Protección diferencial (protección principal ante fallas internas)
    - Relé de presión para el compartimiento del conmutador del TAP
    - Relé de monitoreo del nivel de aceite

- Transformadores de potencia nominal menor a 5 MVA:
  - Relé detector de gas (Relé Buchholz)
  - Protección contra sobrecarga
  - Protección de sobrecorriente
  - Protección contra fallas a tierra

- Transformadores que pueden estar expuestos a sobretensiones:
  - Debe incluirse protección contra sobreexcitación

➢ **OTROS TIPOS DE PROTECCIONES**

APLICACIÓN DE RELÉS DE SOBRECORRIENTE

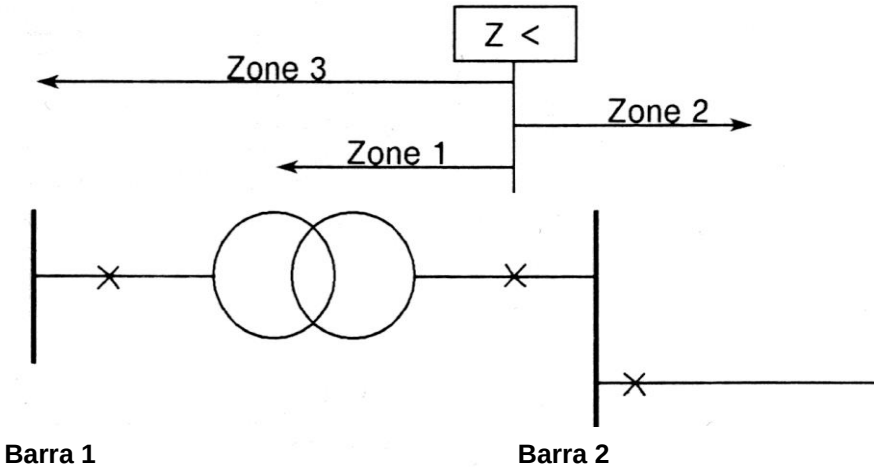
- Su función es normalmente hacer de back up del relé diferencial y de los relés de protección del lado de carga del transformador. También pueden ser la protección principal en caso de que no se utilice protección diferencial.

- Normalmente se utilizan unidades 51 temporizadas con unidades 50 instantáneas para el caso de corrientes de cortocircuito muy elevadas.

APLICACIÓN DE RELÉS DE DISTANCIA

- A veces utilizado en lugar de los relés diferenciales como protección principal del transformador y al mismo tiempo puede actuar como protección primaria o back up de las barras.

- Alcance y la dirección de actuación de un relé de distancia ajustado en:
  - ✓ Alcance de zona 1 a 70-80% dentro del transformador
  - ✓ Alcance de zona 2 cubriendo la barra 2 en forma reversa
  - ✓ Alcance de zona 3 a través del transformador cubriendo la barra 3



Transformador protegido por un relé de distancia

PROTECCIÓN DIFERENCIAL

Introducción

La protección diferencial es 100 % selectiva y opera solo para faltas dentro de su zona protegida. El límite de la zona protegida está definida por la ubicación de los transformadores de corriente. Además, no precisa coordinar con otras protecciones, debido a esto, la operación es instantánea.
Por lo cual, la protección diferencial es adecuada para protección principal.

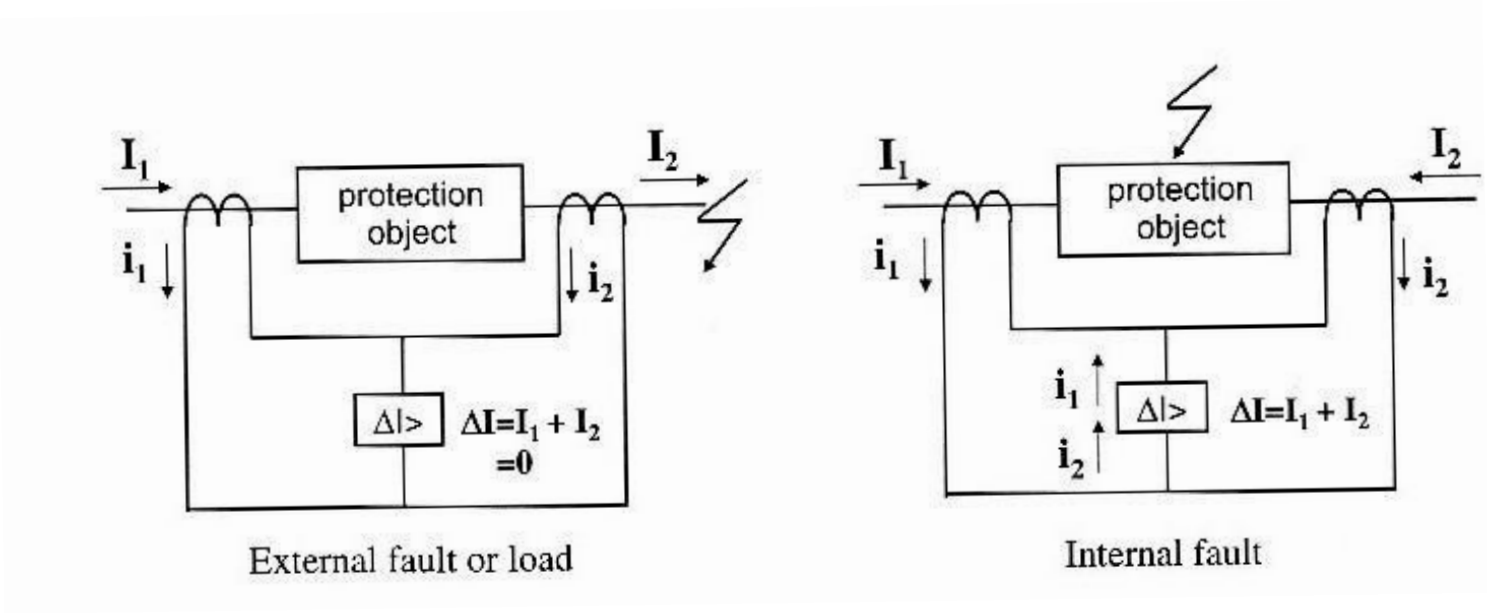
La protección diferencial se basa en la comparación de corrientes. Para mantener la estabilidad frente a faltas externas, para lo cual se precisa dimensionar en forma adecuada y ajustarse la relación de los transformadores de corriente. Debido a los costos, la protección diferencial debe tolerar la saturación de los transformadores de corriente.

Principio de operación

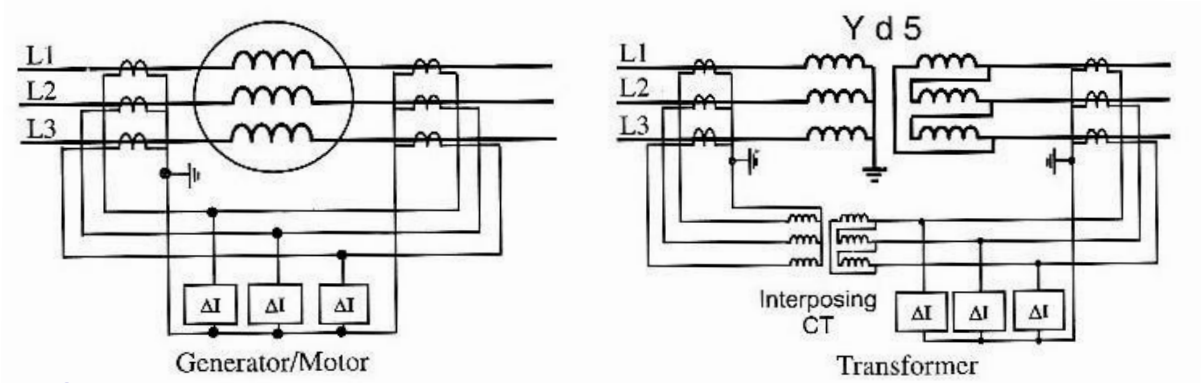
La protección diferencial de corriente compara los valores medidos de corriente en magnitud y ángulo. Esto es posible por comparación de valores instantáneos como por comparación de fasores.

En cada caso la medida se basa en la ley de Kirchoff, la suma vectorial de las corrientes entrando o saliendo de un nodo debe ser cero en todo instante.

Es la forma más simple y común de aplicación de la función diferencial. El principio de medida se muestra en la siguiente figura:



Este principio de operación se utiliza en: líneas y cables de trasmisión, generadores, motores y transformadores. Cuando se utiliza esta función para proteger un transformador de potencia, se necesita corregir los ángulos y módulos de los vectores a comparar.

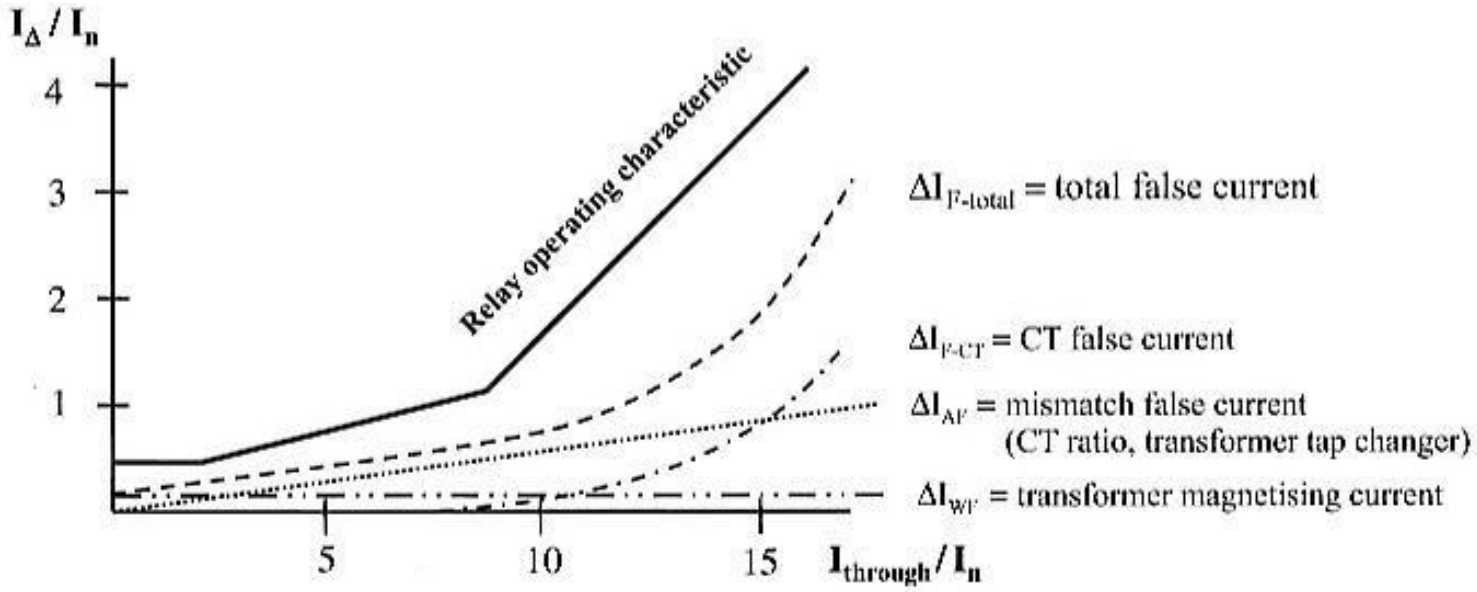


Protección diferencial por porcentaje (biased stabilized)

- En la práctica, una corriente diferencial siempre existe como resultado de los errores introducidos por los transformadores de corriente.
- Este error es proporcional a la corriente que circula por el transformador de corriente. En caso que la corriente que circule por el mismo sea una corriente de falta, el transformador de corriente puede saturar, por lo cual la corriente diferencial aumenta.
- Los reguladores bajo carga de los transformadores de potencia, también pueden causar una corriente diferencial porque la relación da transformación cambió.

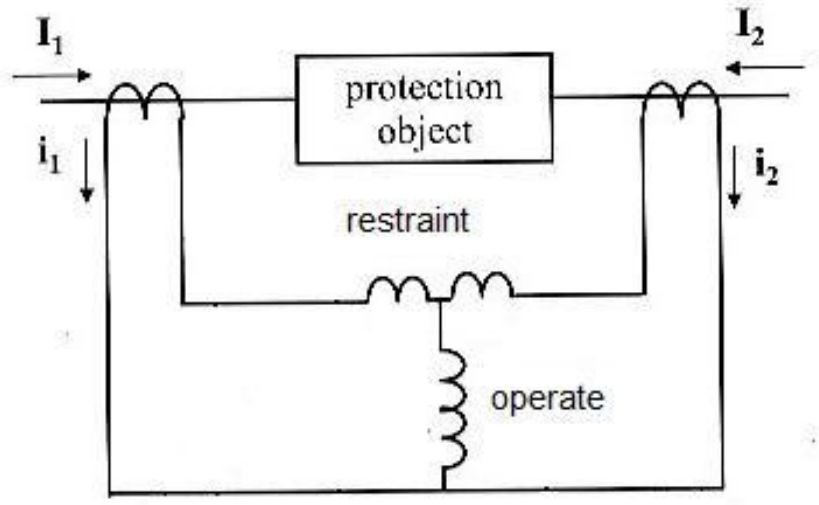
Protección diferencial por porcentaje (biased stabilized)

En la siguiente figura se muestra la corriente diferencial (I_Δ), en relación a la corriente a través del equipo protegido ($I_{through}$), durante la operación normal (carga) o faltas externas.



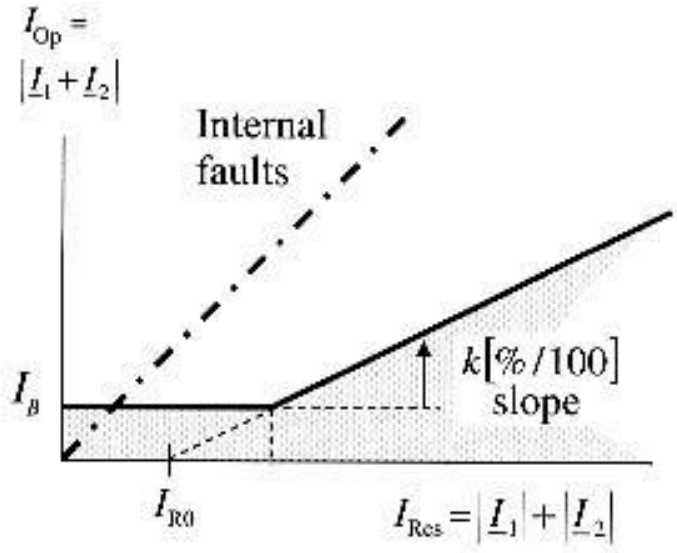
False differential current during load and external faults with adapted relay characteristic

Para que opere correctamente, la corriente de operación debe aumentar cuando la corriente que circula por el equipo protegido aumenta. Esto proporciona sensibilidad para corriente de faltas pequeñas, y estabilidad para corrientes de carga grandes o cuando se saturan los transformadores de corriente.



La estabilidad se proporciona con la siguiente corriente de restricción: $I_{res} = |I_1| + |I_2|$, que corresponde a la suma de las corrientes. La corriente de operación es: $I_{Op} = |I_1 + I_2|$, que corresponde a la diferencia entre las corrientes.

En la siguiente figura se muestra la característica de operación:



(1) $|I_1 + I_2| > k(|I_1| + |I_2| - I_{R0})$

(2) $|I_1 + I_2| > I_B$

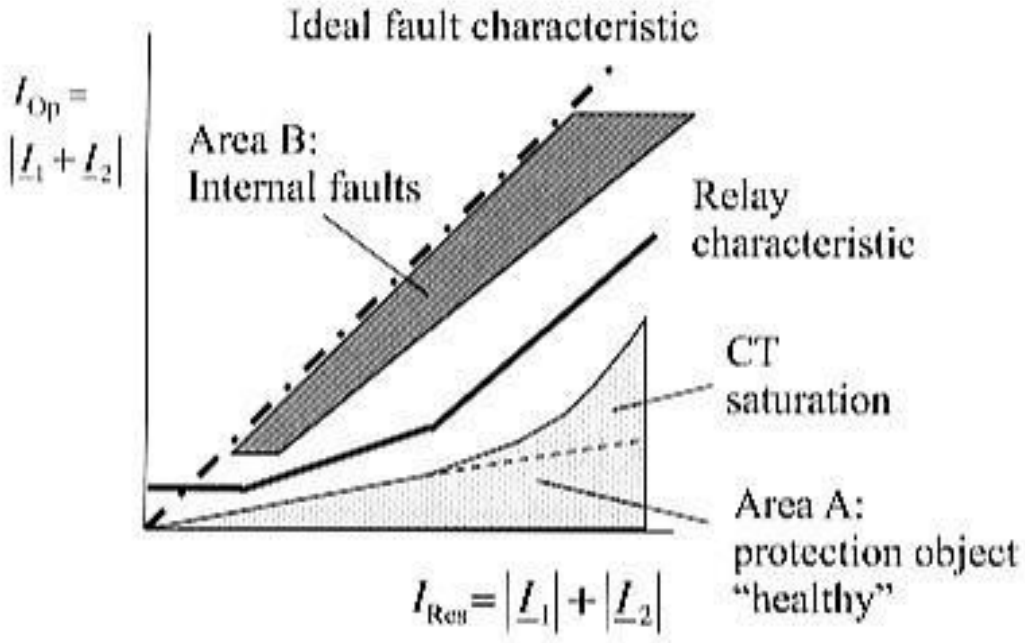
Criterio de operación: $I_{Op} > kI_{res} \Rightarrow |I_1 + I_2| > k(|I_1| + |I_2|)$.

En la protección diferencial se pueden distinguir dos zonas:

Zona A: Equipo protegido sin falta Idealmente, no hay corriente diferencial. En caso de corriente de carga o en el evento de una falta externa, solo hay corriente de restricción. Los errores en los transformadores de corriente, como el regulador bajo carga generan una corriente diferencial que es proporcional a la corriente que circula por el equipo protegido. El area A se define como la zona del equipo protegido sin falta.

Zona B: Equipo protegido con falta Idealmente una falta en el equipo protegido se representa por la línea a 45°. Debido a los errores en los transformadores de corriente y la corriente de carga, la relación I_{Op}/I_{res} es menor que 1, por lo cual las falta internas aparecen por debajo de la línea a 45°.

Protección diferencial

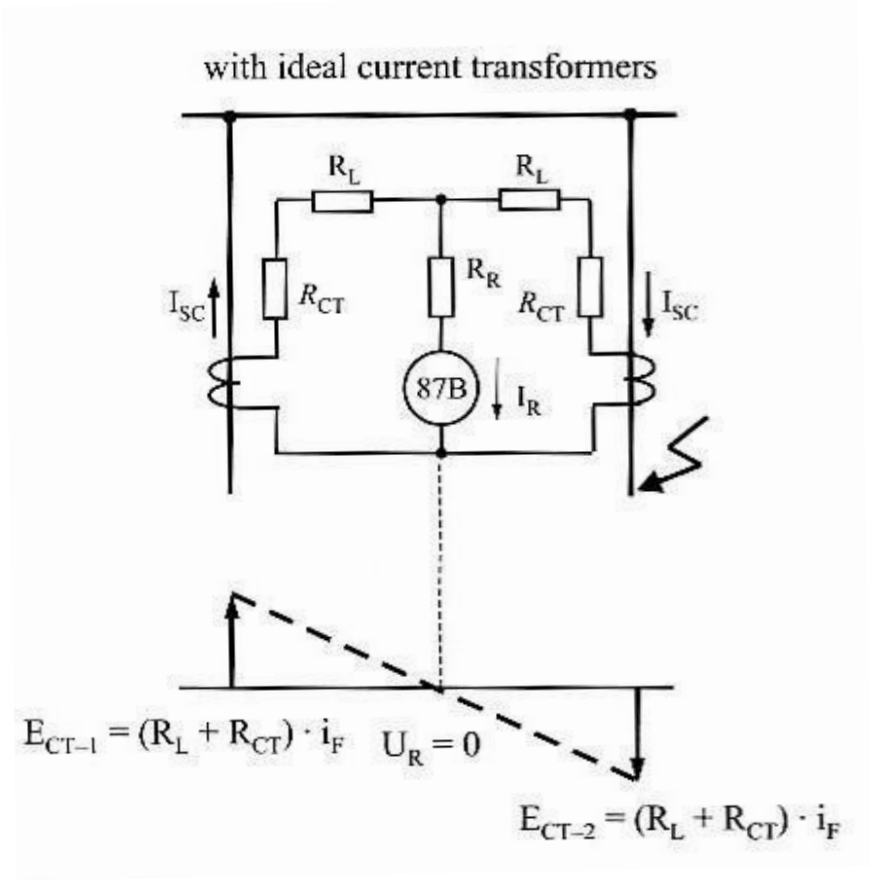


I_{Op}/I_{Res}-diagram of the differential protection

Protección diferencial

Protección diferencial de alta impedancia:

Para explicar este principio, se asume un equipo a proteger que tiene 2 corrientes.



PROTECCIÓN DIFERENCIAL DE ALTA IMPEDANCIA

Principio de operación:

Los secundarios de los transformadores de corriente se conectan como en el caso de la protección diferencial por corriente. La protección diferencial se conecta en paralelo, y se compone de una resistencia alta en serie con un relé de sobrecorriente muy sensible.

Idealmente, la tensión en la ubicación del relé es muy pequeña, para las corrientes de carga y para las faltas externas, si la resistencia secundaria del transformador de corriente R_{CT} y la resistencia del cableado R_L son iguales en ambos lados.
Todos los transformadores de corriente deben tener la misma relación.

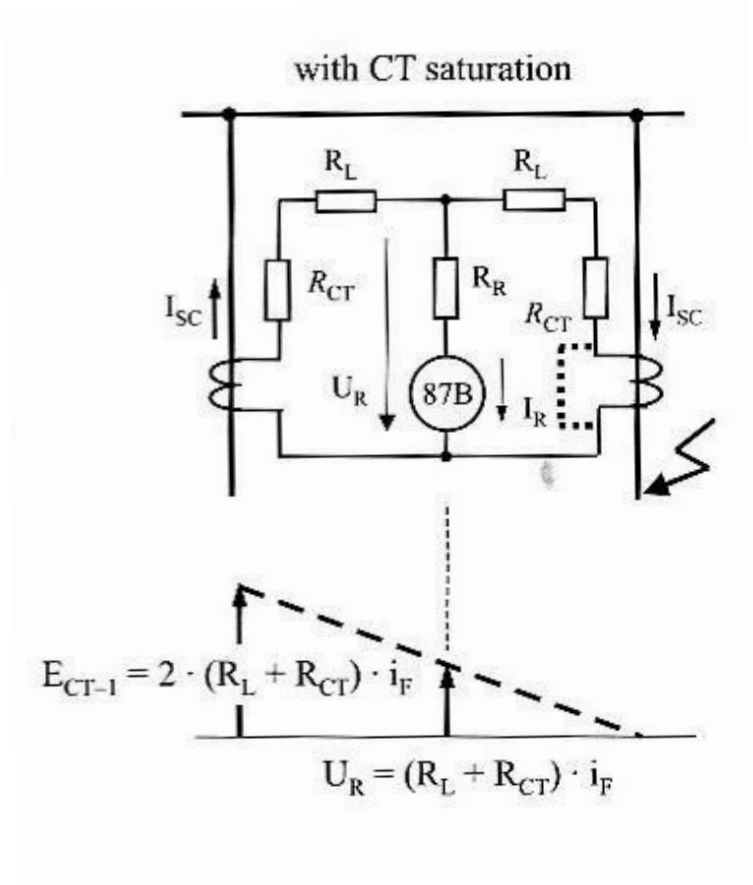
PROTECCIÓN DIFERENCIAL DE ALTA IMPEDANCIA

Estabilidad durante faltas externas:

En el caso de saturación de un transformador de corriente, el punto donde la tensión es cero se mueve. Asumiendo el peor caso, donde un transformador de corriente está completamente saturado, mientras que el otro transforma la corriente sin saturación.

El transformador saturado puede simplemente sustituirse por la resistencia secundaria interna (R_{CT}). Además, la resistencia en serie con el relé es mayor que la resistencia de los cables (R_L) y la resistencia secundaria interna del transformador de corriente (R_{CT}).

PROTECCIÓN DIFERENCIAL DE ALTA IMPEDANCIA



La tensión aplicada en la serie del relé y la resistencia es: $U_R = i_F \cdot (R_L + R_{CT})$
$\Rightarrow$ se ajusta el relé de manera que la tensión de operación $U_{op} > U_R$.
Para calcular el ajuste se debe utilizar la corriente de falta externa i_F mayor.

PROTECCIÓN DIFERENCIAL DE ALTA IMPEDANCIA

Tensión de saturación del transformador de corriente:

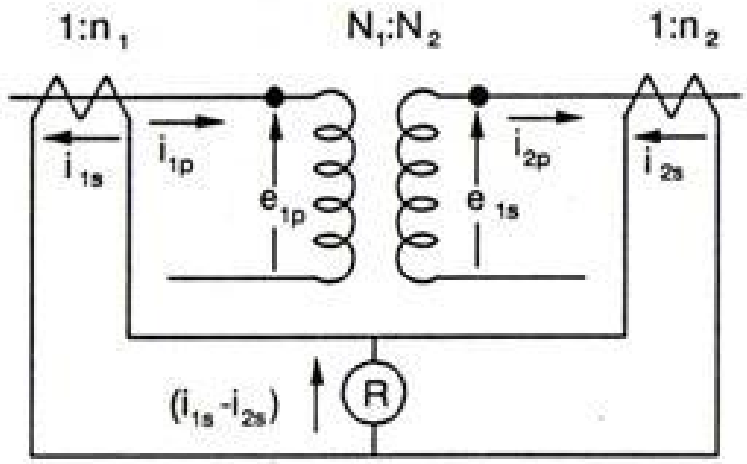
Los transformadores de corriente pueden saturar durante faltas internas, debido a la resistencia alta. Por lo cual, los transformadores de corrientes deben cumplir con ciertos requerimientos para que el relé pueda operar. Basado en la teoría, la tensión de saturación de los transformadores de corriente debe ser por lo menos 2 veces la tensión de operación ajustada, para poder operar con seguridad.

$\Rightarrow U_{KN} \geq 2 \times U_{op}$

PROTECCIÓN DIFERENCIAL DE TRANSFORMADOR

La protección diferencial aplicada a los transformadores de potencia suministran un disparo rápido y selectivo para faltas internas al transformador o para faltas entre el transformador de potencia y los transformadores de corriente.

La protección diferencial se aplica para transformadores de potencia superior a 1MVA y para unidades superiores a 5MVA es un standard.



Differential relay connections

PROTECCIÓN DIFERENCIAL DE TRANSFORMADOR

Además, esta protección consta de varias funciones complementarias:

- estabilidad frente a las corrientes de energización
- estabilidad frente a las corrientes de sobreexcitación
- adaptación de la relación de transformación y el ángulo

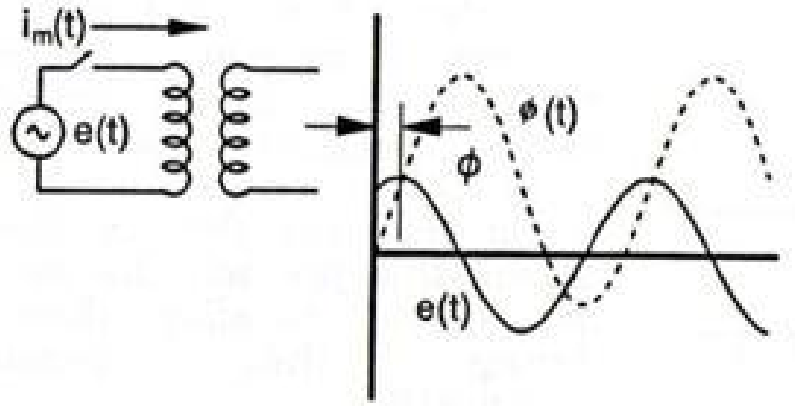
ENERGIZACIÓN

La corriente de magnetización de un transformador entra por el primario y no sale por el secundario ni el terciario, por lo que representa para el relé diferencial una condición semejante a una falta interna En régimen normal de operación esta corriente tiene valores del 2 al 5 % de la corriente nominal del transformador.

Este problema origina la aparición de armónicos, particularmente de orden 2, ya que la corriente magnetizante los contiene en alta proporción. Por lo tanto, mediante un filtro adecuado puede obtenerse una señal de restricción proporcional.

ENERGIZACIÓN

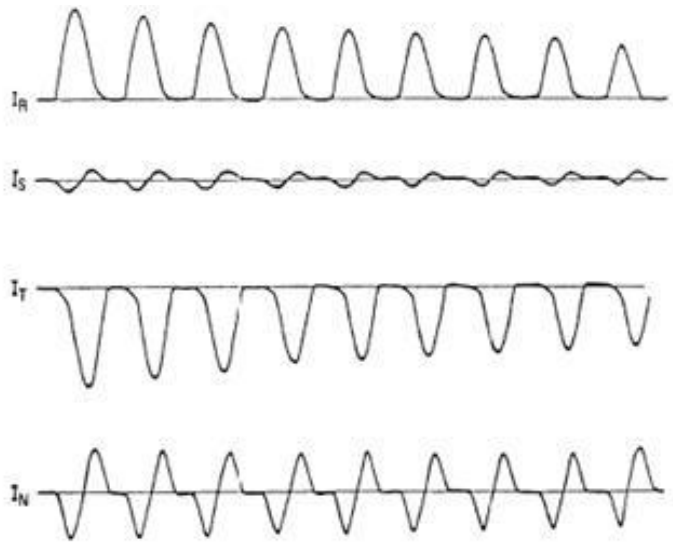
Consideramos la energización de un transformador sin carga, como se muestra en la siguiente figura. Sea la tensión de la fuente:
$e(t) = E_{max} \cdot cos(\omega t - \varphi)$
Si despreciamos las resistencias en el circuito, el flujo en el núcleo del transformador está dado por: $\phi(t) = \phi_{max} \cdot sen(\omega t - \varphi) + \phi_{max} \cdot sen\varphi$



Transformer core flux linkages upon energization at angle ϕ from maximum

ENERGIZACIÓN

En la figura se muestra la forma de onda típica de la corriente de magnetización en cada fase y por el neutro. La corriente de magnetización tiene un contenido alto de armónicos.

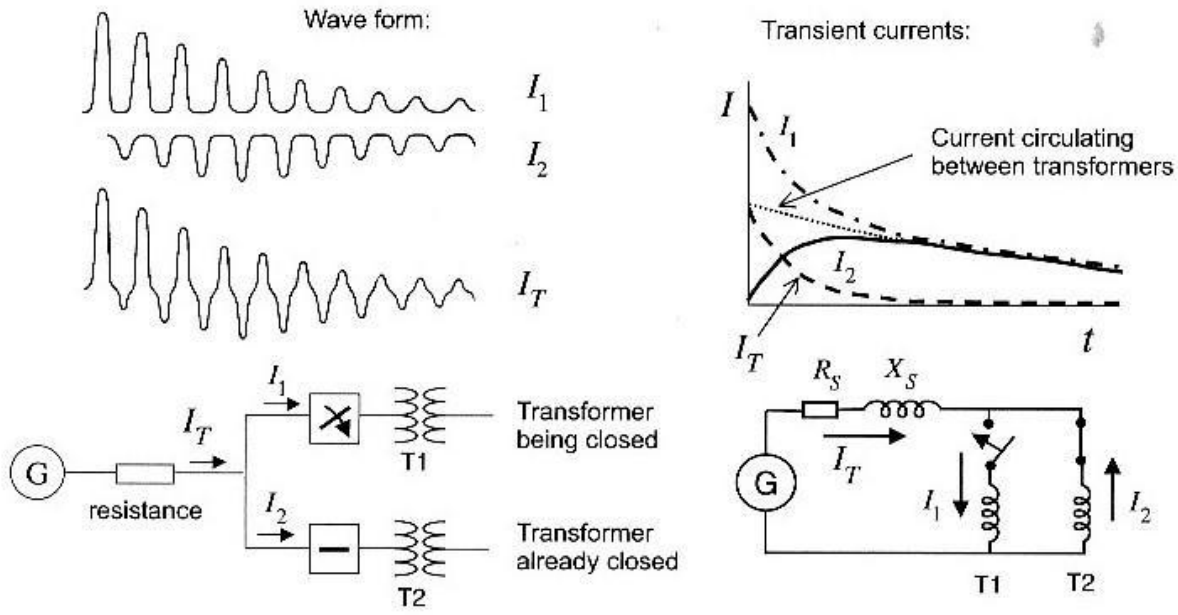


Magnetizing currents

ENERGIZACIÓN

Energización simpatética:

Cuando dos transformadores son conectados en paralelo, se observa que cuando se energiza el segundo opera la protección diferencial del que está en servicio. La razón de esta operación es la corriente de energización simpatética, que es resultado de la corriente de energización del transformador que se está energizando.



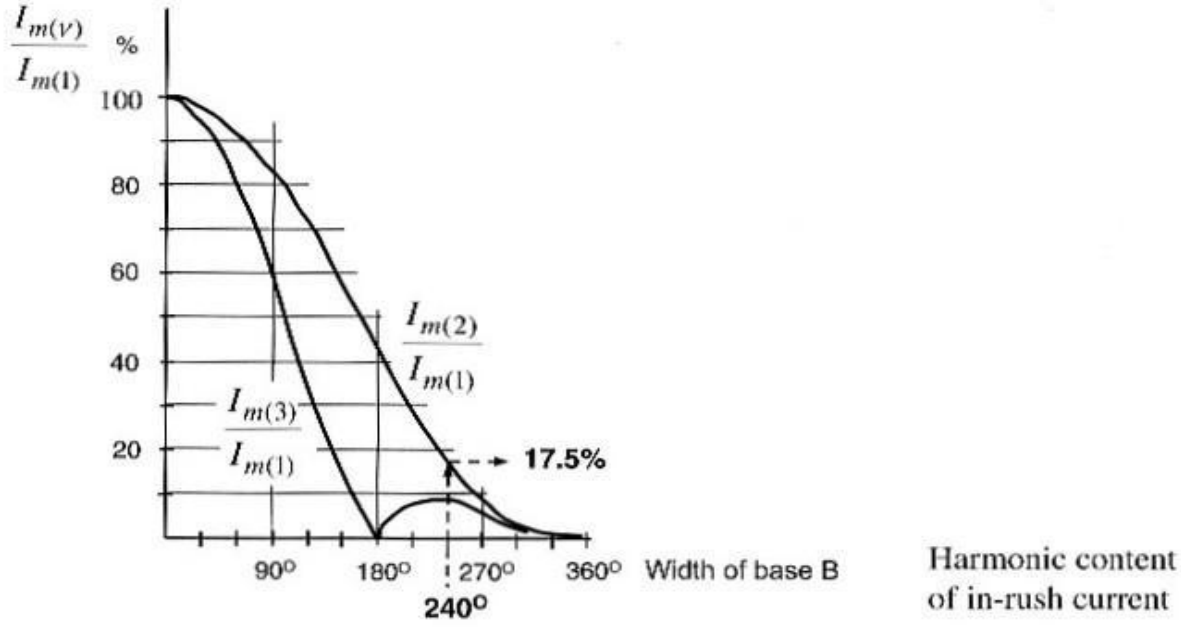
Sympathetic in-rush current

ENERGIZACIÓN
Bloqueo frente a las energizaciones

Por lo tanto, el relé diferencial debe ser capaz de discriminar entre corriente de falta interna y corriente de magnetización. Una de las técnicas más usada es la utilización de los armónicos de la corriente diferencial como base para la retención o inhibición del relé.

Este bloqueo se basa en la medida de la componente de 2do armónico con relación a la componente fundamental. Se bloquea el disparo si la relación entre: $\frac{I_{100Hz}}{I_{50Hz}}$ supera cierto valor de ajuste.

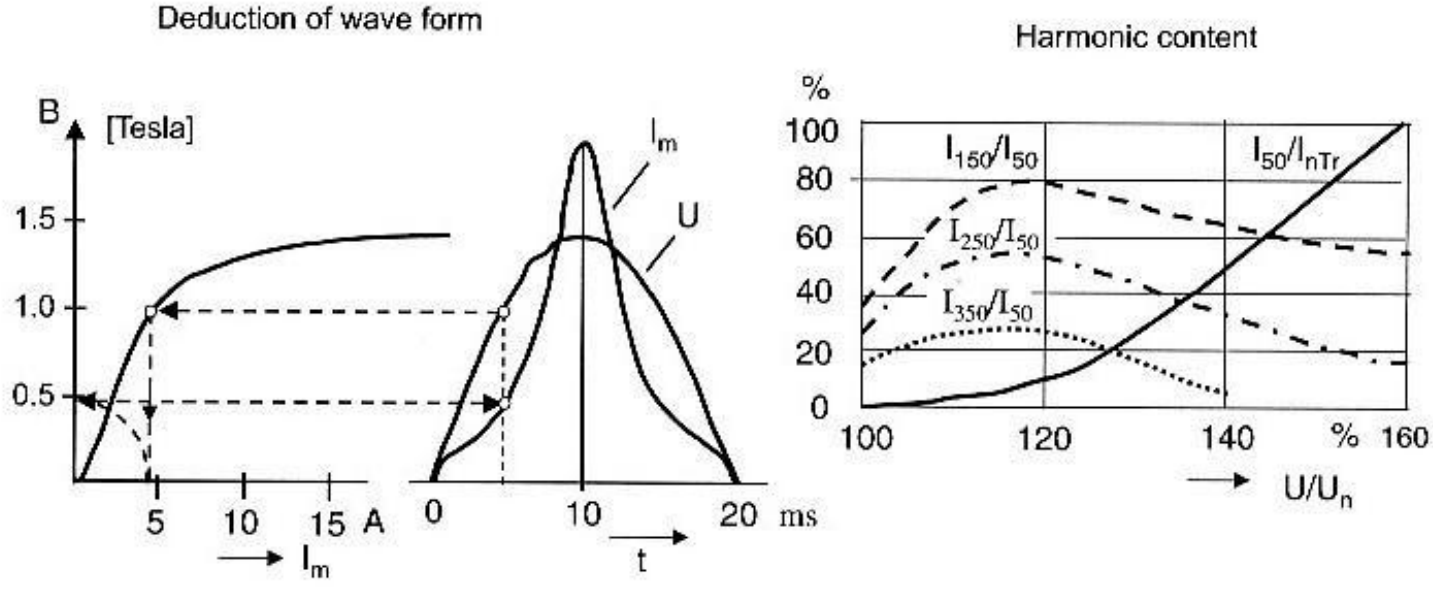
Componente de armónicos en la corriente de energización:



SOBREEXCITACIÓN

Cuando un transformador opera con sobretensiones, la corriente de magnetización se incrementa. La forma de onda de esta corriente se distorsiona a medida que el punto de trabajo es más cercano al codo de la curva de saturación del núcleo del transformador. A medida que se distorsiona, aumenta el contenido de armónicos en la corriente.

El aumento de la corriente de magnetización aparece como una corriente diferencial en la protección, provocando la operación de la protección.



Magnetising current in the event of transformer over-fluxing

SOBREEXCITACIÓN

Bloqueo por sobreexcitación

Por lo tanto, el relé diferencial debe ser capaz de discriminar entre corriente de falta interna y corriente de magnetización debido a una sobreexcitación.

Una de las técnicas más usada es la utilización de los armónicos de la corriente diferencial como base para la retención o inhibición del relé.

Este bloqueo se basa en la medida de la componente de 5to armónico con relación a la componente fundamental. Se bloquea el disparo si la relación entre: $\frac{I_{250Hz}}{I_{Hz}}$ supera cierto valor de ajuste.

TRANSFORMADOR TRIFÁSICO DE DOS ARROLLAMIENTOS:

La conexión de los relés diferenciales de porcentaje para transformadores de dos arrollamientos debe ser tal que garantice su operación para todas las faltas internas a la zona protegida, y su bloqueo para cualquier otra condición de operación, incluyendo faltas externas. Para ello es necesario que la corriente que llega a una de las bobinas de restricción sea igual a la que sale, para cada fase del relé.

Esto sugiere dos pasos para la conexión correcta del relé diferencial:

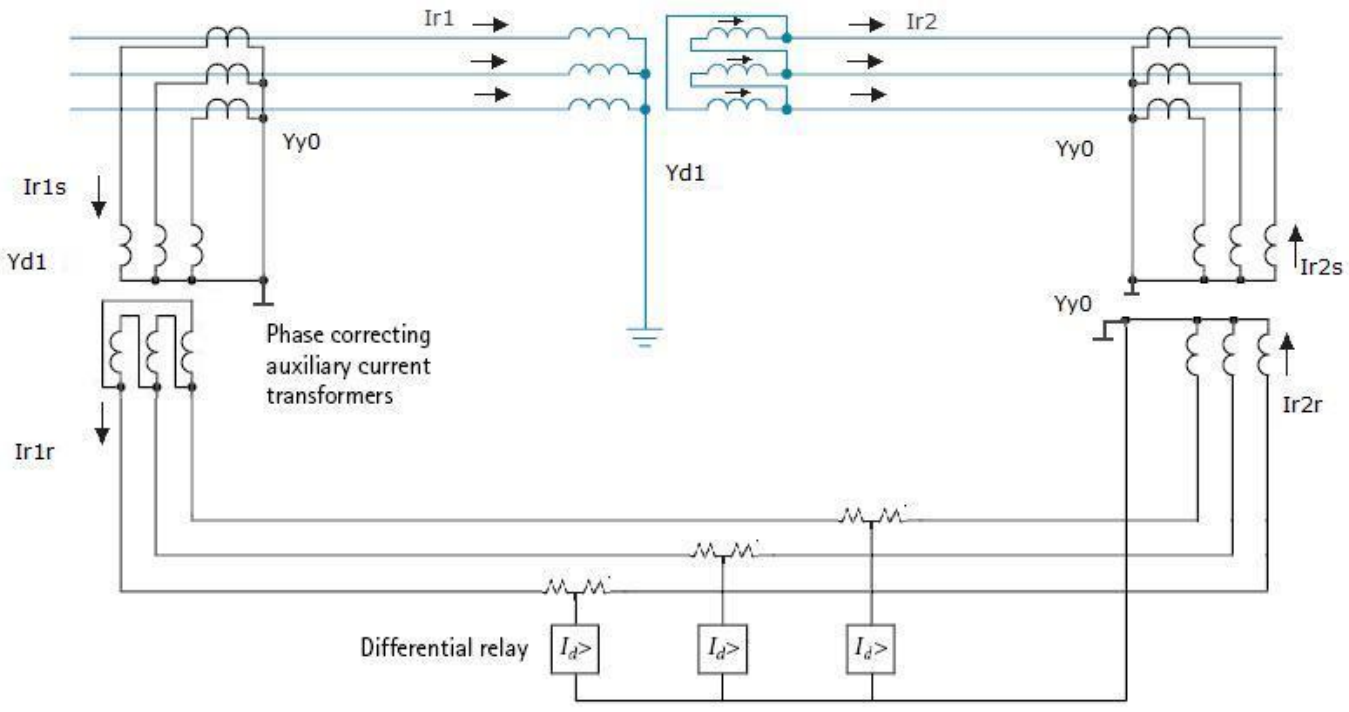
- compensar el desfasaje entre las corrientes primarias y secundarias (generalmente usando conexión en triángulo): para asegurarse que las corrientes que llegan al relé están en fase.
- ajuste de la relación: seleccionar taps en los relés para minimizar la diferencia de las corrientes que circula para la bobina de operación.

En los relés electromecánicos, se realizaba mediante la conexión de transformadores de corriente auxiliares.
En los relés numéricos, se realiza mediante ajustes en el relé.

Desfasaje:

Para compensar el desfasaje de corrientes en transformadores Yd, se debe conectar un grupo de transformadores de corriente en triángulo y otro en estrella. Cualquiera de los dos grupos se puede conectar en triángulo, pero es recomendable conectar en triángulo el grupo de transformadores de corriente del arrollamiento en estrella.

Ejemplo de conexión:

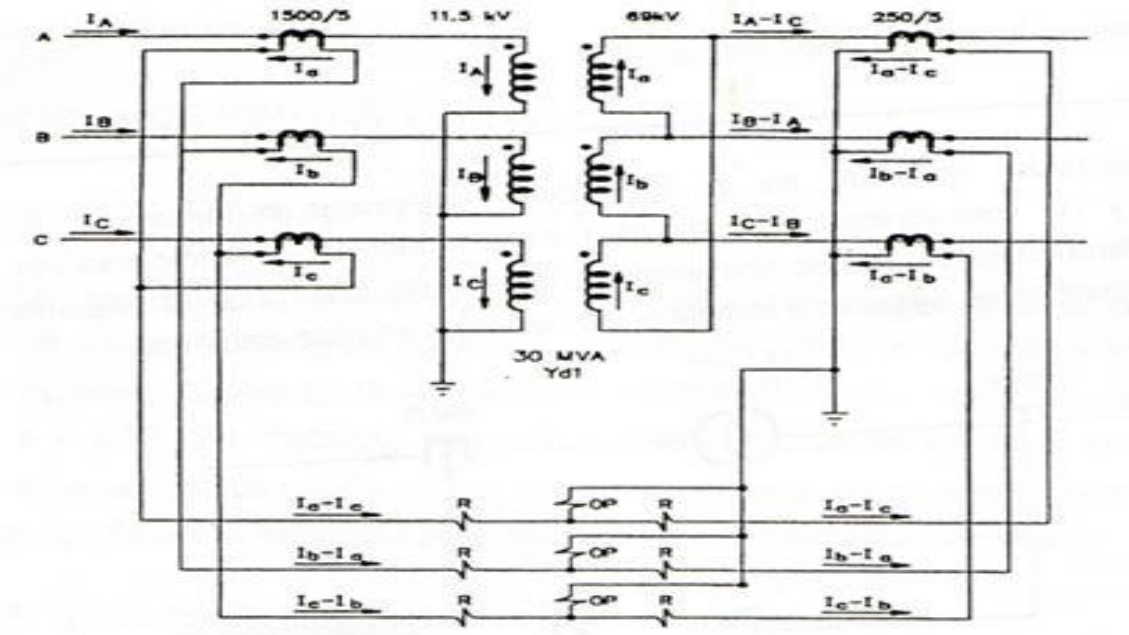


EJEMPLO DE CONEXIÓN

Conexión de un relé para un transformador de 2 arrollamientos:

Se considera un transformador de 30MVA, 11.5/69 kV, Yd1.
Determinar la relación de transformación y la conexión del los transformadores de corriente requeridos para ajustar el relé diferencial.
Deben utilizarse transformadores de corriente con relaciones normalizadas.
Se utiliza un relé diferencial de porcentaje, y los taps de corriente disponibles son: 5.0 /(5.0 - 5.5 - 6.0 - 6.6 - 7.3 - 8.0 - 9.0 - 10.0)A.

La figura muestra el esquema trifásico de conexiones. Se muestran que las corrientes de restricción del lado estrella y del triángulo están en fase.



EJEMPLO DE CONEXIÓN

Las corrientes nominales de carga de cada arrollamiento son:

- $I_{carga}(69kV) = \frac{30MVA}{\sqrt{3} \cdot 69kV} = 251A$
- $I_{carga}(11{,}5kV) = \frac{30MVA}{\sqrt{3} \cdot 11{,}5kV} = 1506A$

La relación de transformación son: del lado de 11.5kV: 1500/5A; y del lado de 69kV: 250/5A.

Finalmente, se eligen los taps correspondiente en el relé. Con las dos relaciones elegidas, las corrientes en los arrollamientos del relé, para las condiciones nominales, son:

- $I_{rele}(69kV) = 251 \frac{5}{250} = 5{,}02A$
- $I_{rele}(11{,}5kV) = 1506 \frac{5}{1500} = 5{,}02Ax\sqrt{3} = 8{,}69$
- $\Rightarrow$ se selecciona el tap 5/5 A del lado de 69kV y 5/9 A del lado de 11kV.

EJEMPLO DE CONEXIÓN

Determinación de la pendiente:

El ajuste de la pendiente de los relés diferenciales se lleva a cabo con el objetivo de asegurar que no habrá una operación incorrecta debido a las diferencias en las corrientes de las bobinas de restricción causado por las relaciones de los transformadores de corriente y la operación de los cambios del tap bajo condiciones de carga.

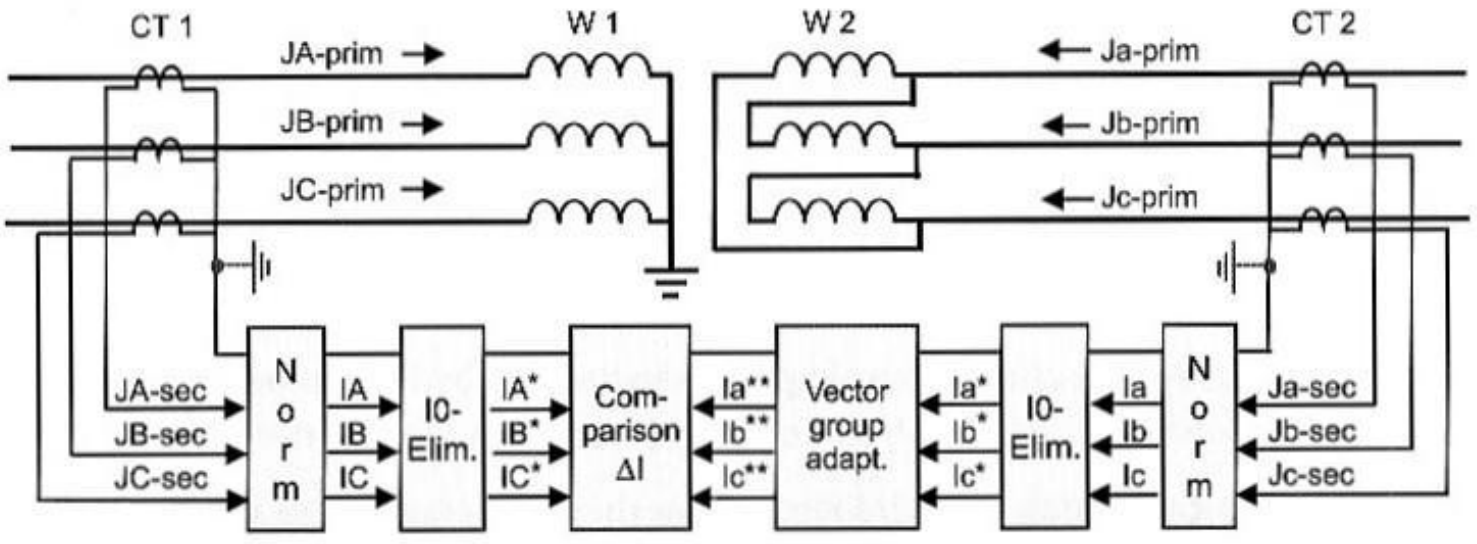
Se ajusta la pendiente y la corriente de umbral en función de la magnitud de la corriente de magnetización en condiciones normales, los errores introducidos por los transformadores de corriente y del rango de regulación bajo carga.

EJEMPLO DE CONEXIÓN

Ejemplo: Relé numéricos:

En los relés numéricos no es necesario la utilización de transformadores auxiliares para compensar la relación y desfasaje.

La siguiente figura es un ejemplo de como se implementa en los relés numéricos:

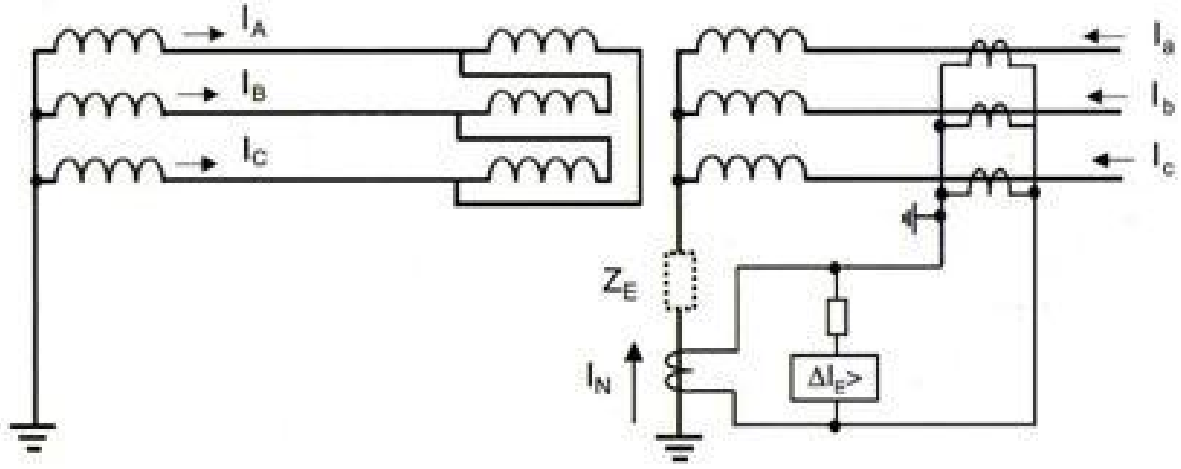


Numerical current adaptation for the comparison

PROTECCIÓN PARA FALTAS A TIERRA:

Los transformadores con neutro puesto a tierra en forma rígida o a través de una resistencia, pueden ser equipados con diferentes tipos de relés para faltas a tierra.

El relé diferencial restringido de alta impedancia para faltas a tierra, solo puede operar para faltas dentro de la zona de protección. La figura muestra la conexión de este tipo de relé para arrollamiento en estrella. El relé es sensible y confiable y se obtiene una alta velocidad de operación.



Application of the HI restricted earth-fault protection

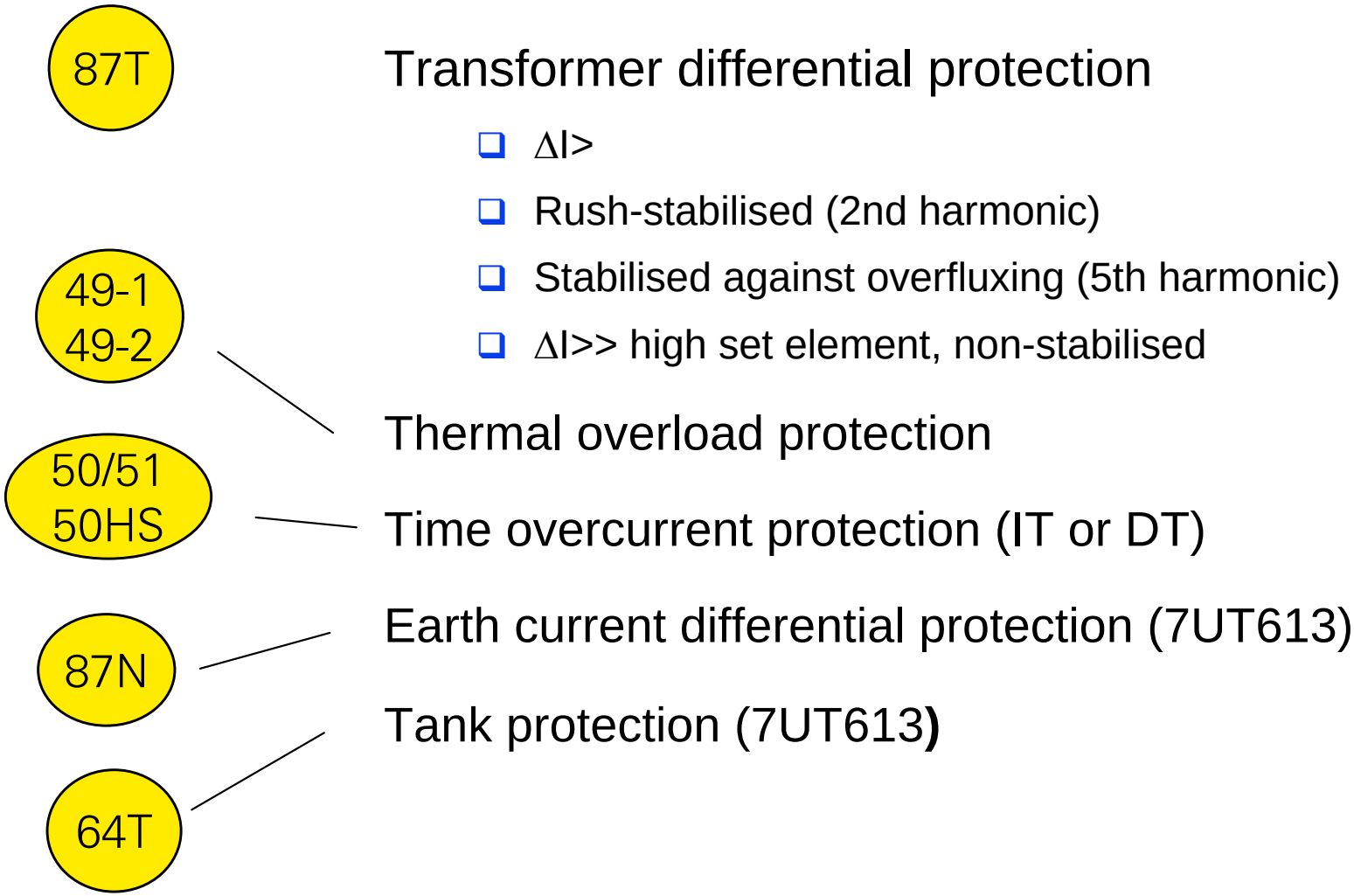
PROTECCIÓN PARA FALTAS A TIERRA:

La corriente, que proviene de los transformadores de corriente de fase, está balanceada con la corriente que proviene del transformador de corriente conectado en el neutro.

falta interna: las corrientes de los transformadores de corriente tienen direcciones opuestas, y se produce una tensión elevada en los extremos del relé de alta impedancia. La tensión de saturación de los transformadores de corriente debe ser al menos el doble de la tensión de operación del relé.

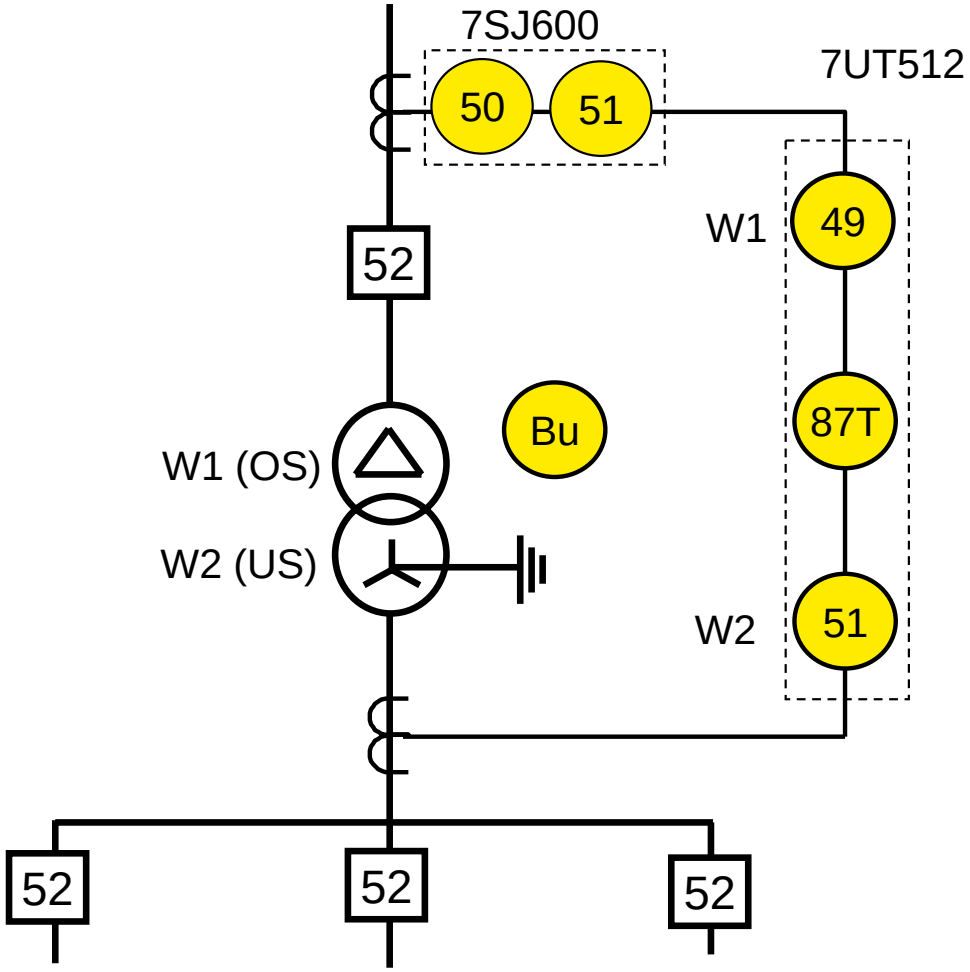
falta externa: la corriente circula entre los transformadores de corriente. El relé es luego estable para todas las faltas externas, aún cuando uno de los transformadores de corriente saturará.

7UT6
Integrated protection functions

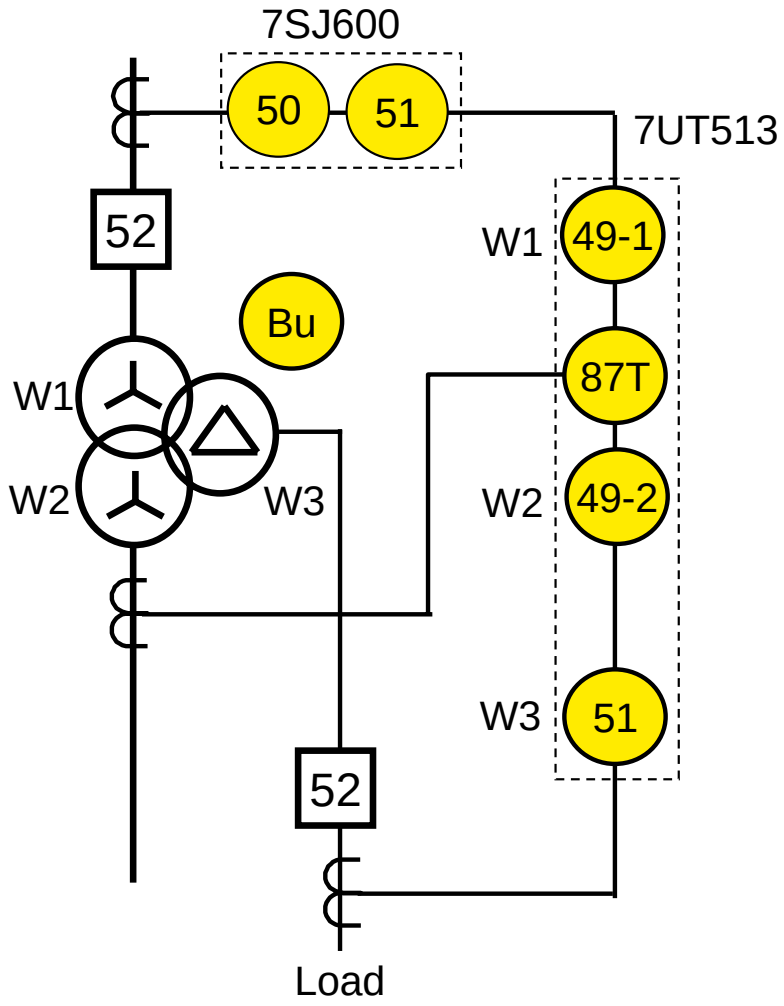


Application examples

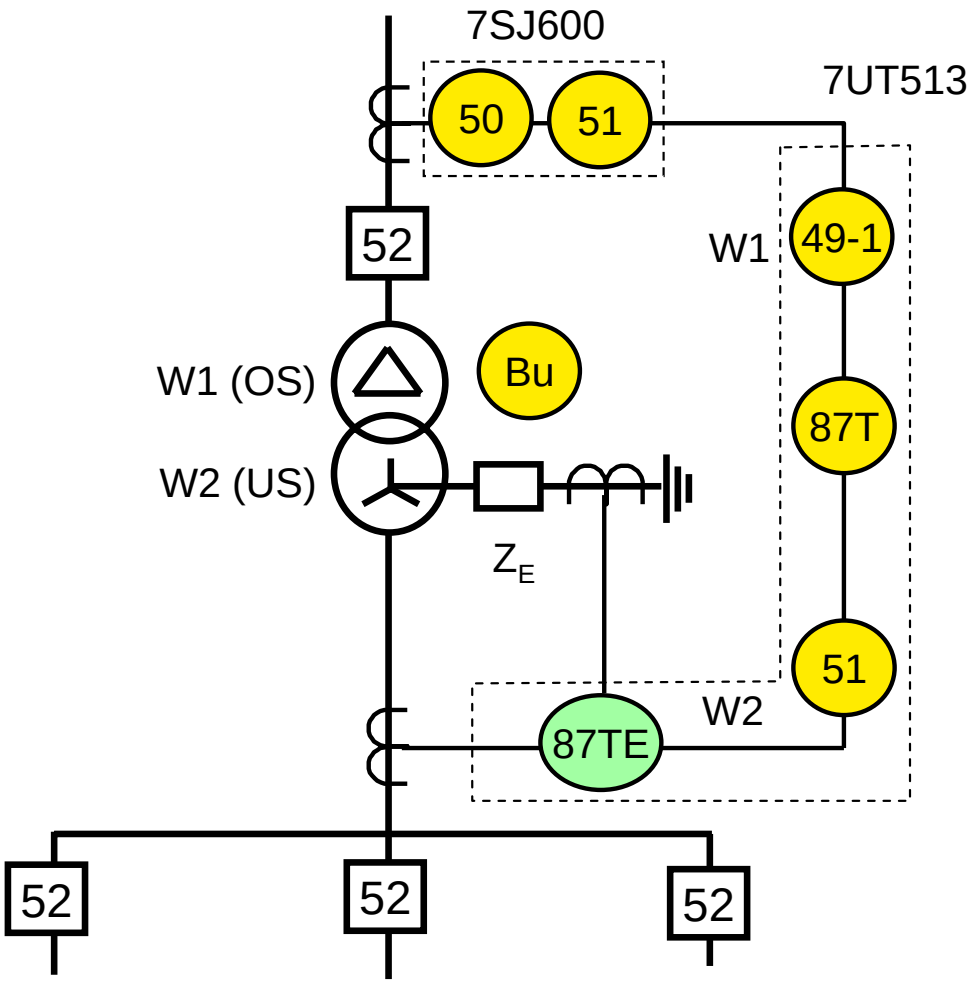
Protection of a two winding transformer



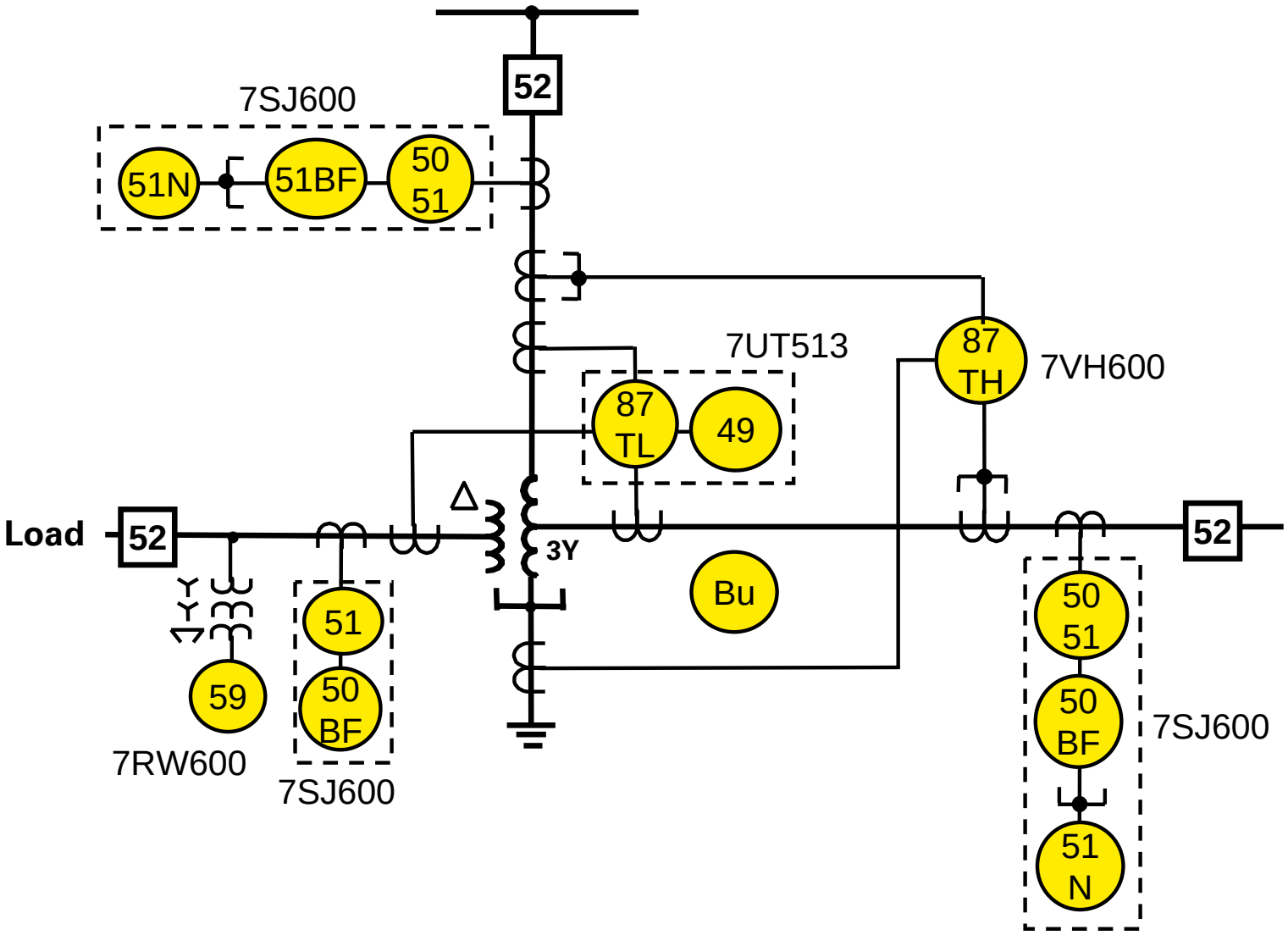
Protection of a three winding transformer



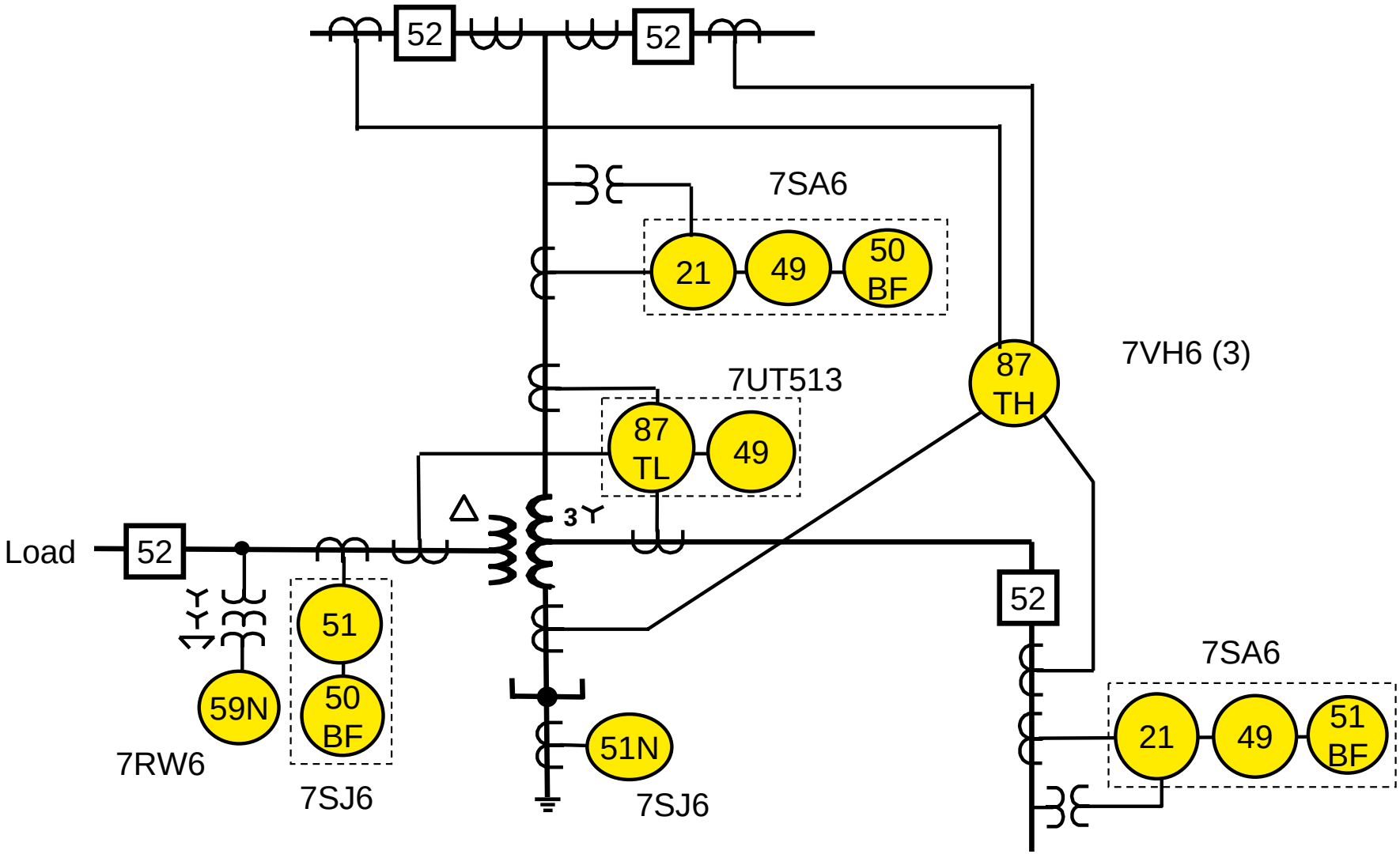
Restricted earth fault protection for a two winding transformer



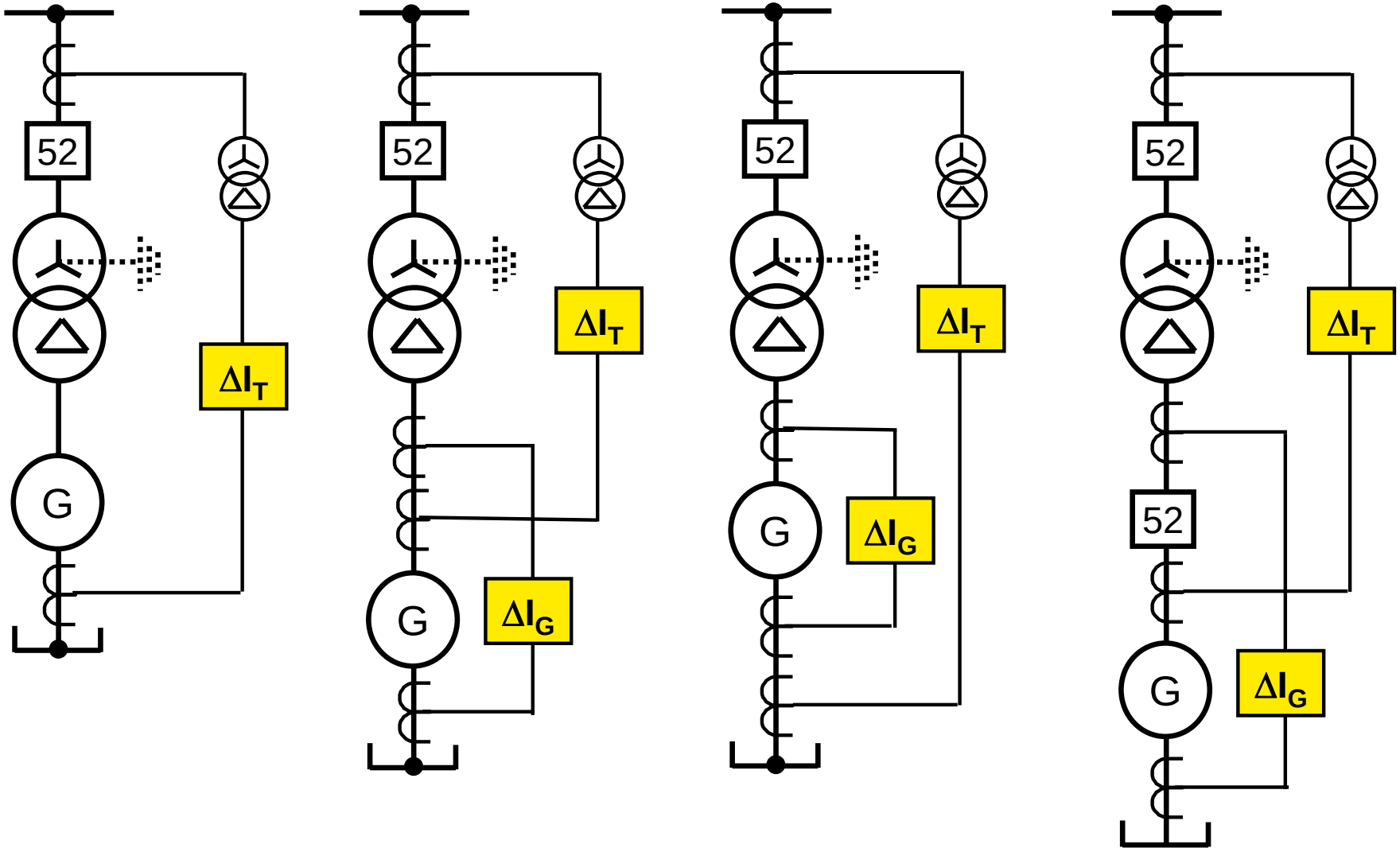
Protection of an autotransformer



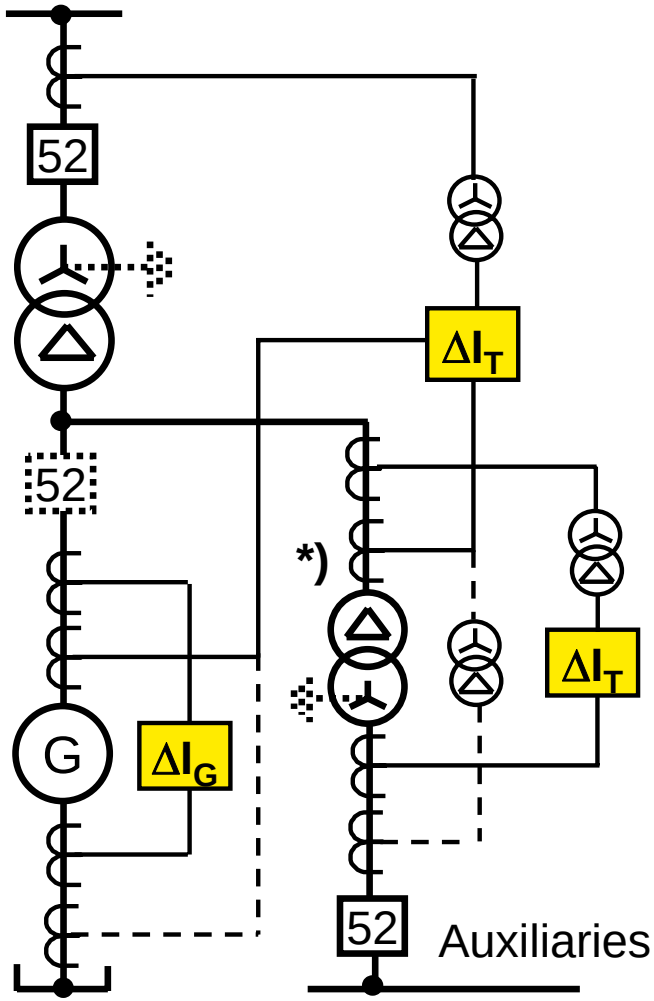
Protection of a large transformer bank



Differential protection of generation units

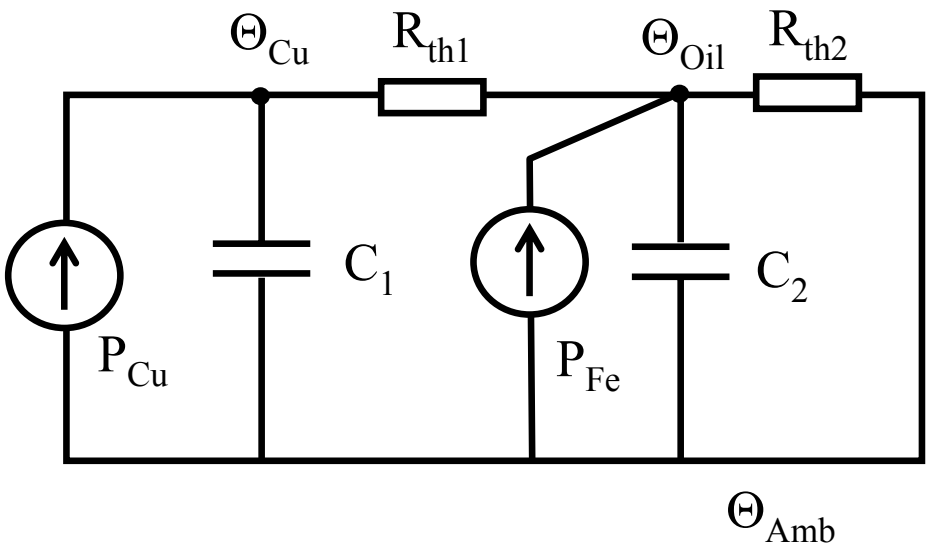


Differential protection of generation units (2)



*) same ratio as generator CTs

Thermal protection of transformers



Legend:

P_{Cu}: Winding losses ($I^2 \cdot R$)

P_{Fe}: Core and tank losses

R_{th1}: Thermal resistance Copper-Oil

R_{th2}: Thermal resistance Oil-Air (cooling medium)

C_1: Winding thermal capacity

C_2: Thermal capacity of Oil, Core and tank

Θ_{Cu}: Winding copper temperature

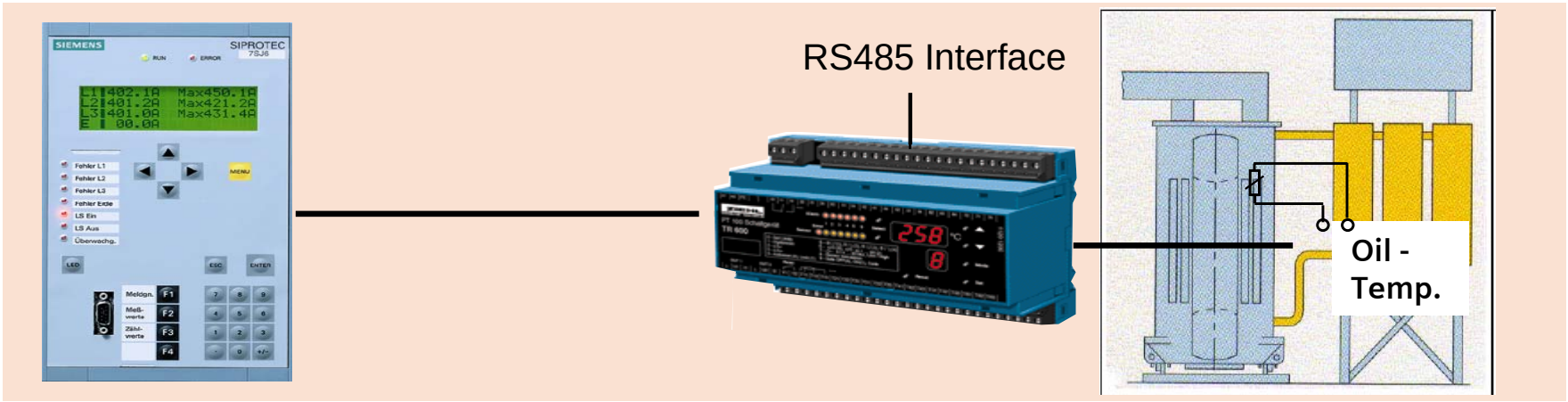
Θ_{Oil}: Oil temperature

$\Theta_{Amb.}$: Ambient temperature

Lifetime of insulation depends on the winding Hot-spot temperature.

6 ^{O}C higher temperature increases the aging of the insulation by the factor 2!

7SA6: Temperature monitoring



- Two thermo-devices can be connected to the serial service interface
- Monitoring of up to 12 measuring points (6 per thermo-device)
- One input is reserved for hot spot monitoring (measurement of oil temperature)
- Thermistors: Pt100, Ni100 or Ni120

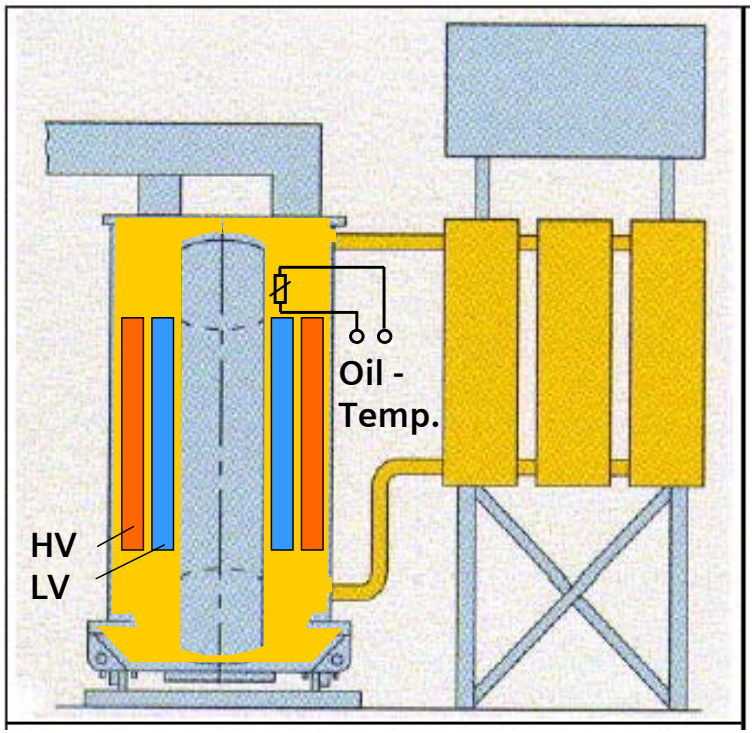
The the upper oil temperature is directly measured by the use of thermoelement.
The hot spot temperature is calculated by the relay using the thermal model Cu-Oil:

$$\frac{d\Theta_{Cu}}{dt} = \frac{1}{\tau_{Th}} \cdot \left(\frac{I}{Ir}\right)^2 - \frac{1}{\tau_{Th}} \cdot \left(\Theta_{Cu} - \Theta_{Oil}\right)$$

I = actual transformer current
Ir = rated transformer current
τ_{th} =time constant of the winding

7UT6: Temperature monitoring with hot spot calculation (1)
Example: Natural cooling

SIEMENS



$$\Theta_h = \Theta_O + H_{gr} \cdot k^Y$$

Θh= hot spot temperature

Θh= oil temperature

H_{gr}=hot-spot-to-oil temperature gradient

k= load factor I/In

Y= winding exponent

Aging rate:

$$V = \frac{\text{Aging at } \Theta_h}{\text{Aging at } 98°C} = 2^{(\Theta_h - 98)/6}$$

98° is reference for the aging of Cellulose insulation

Mean value of aging during a fixed time interval:

$$L = \frac{1}{T_2 - T_1} \cdot \int_{T_1}^{T_2} V \cdot dt$$

7UT6: Temperature monitoring with hot spot calculation (2)
Example: Natural cooling

Thermal Meter - 22.09.2003 - Differential 7UT61 / 7UT612 / 7UT...

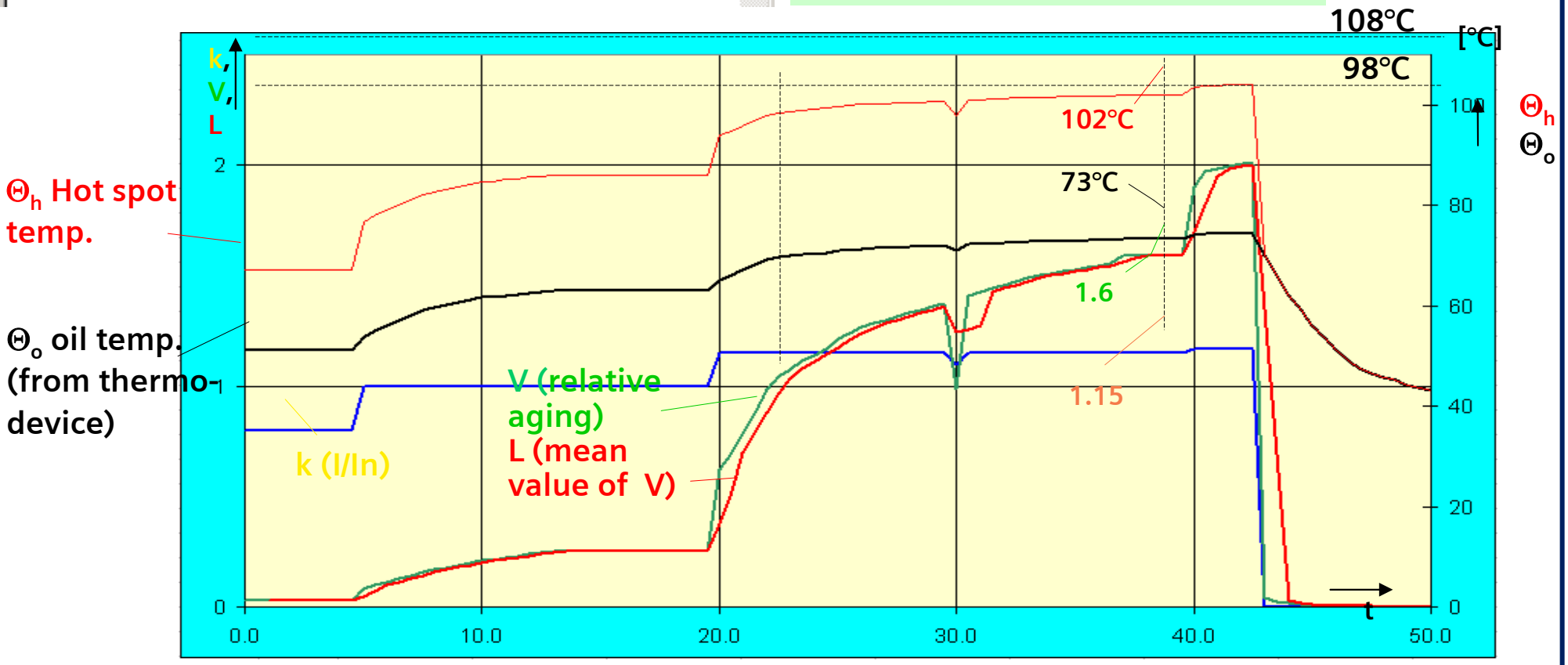
Number	Measured value	Value
01060	Hot spot temperature of leg 1	102 °C
01061	Hot spot temperature of leg 2	102 °C
01062	Hot spot temperature of leg 3	102 °C
01063	Aging Rate (L)	1.6
01066	Load Reserve to warning level	-10 %
01067	Load Reserve to alarm level	5 %

RTD-Box Measuring Values - 22.09.2003 - Differential 7UT61 / 7UT...

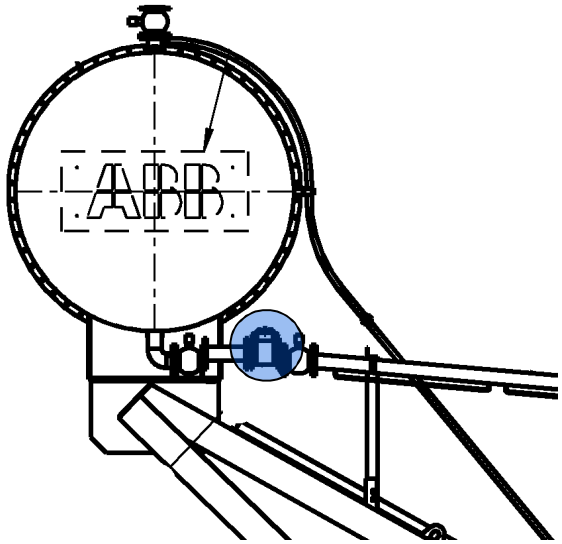
Number	Measured value	Value
01068	Temperature of RTD 1	73 °C

$$\Theta_h = \Theta_o + H_{gr} \cdot k^Y \approx 73 + 23 \cdot 1.15^{1.6} = 102°C$$

$$V = 2^{(\Theta_h - 98)/6} = 2^{(102-98)/6} \approx 1.6$$



Relé Buchholz



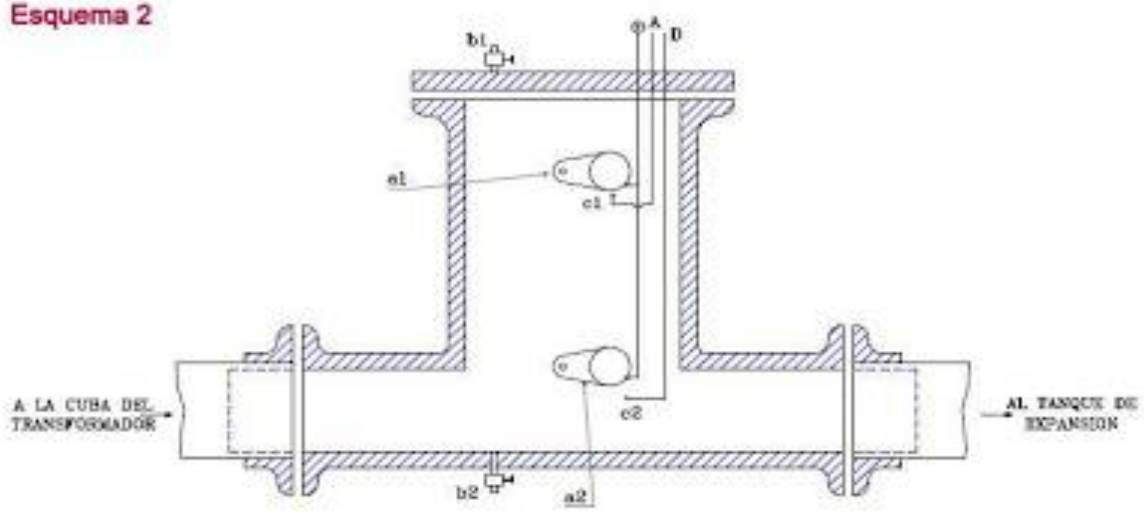
Buchholz relay

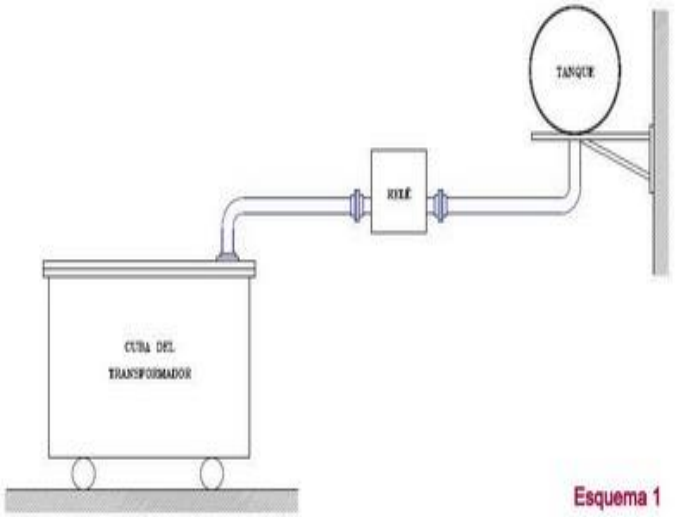
- Se instala en la conducción de aceite entre cuba y depósito de expansión
- Es la protección propia más importante del transformador
- Se considera una protección primaria de la máquina
- Es muy rápida
- Es muy simple conceptualmente
- Detecta una falta interna por variación brusca del volumen de gases en el aceite
- Se ve afectada por problemas mecánicos, que pueden dar lugar a disparos intempestivos.
- Exige una cuidadosa puesta en servicio (purga de gases)
- Requiere de mantenimiento, al tratarse de un elemento mecánico
- No necesita fuentes auxiliares de tensión

RELÉ BUCHHOLZ

- ✓ Se aplica en el caso de elevación muy rápida de la presión y detección de gas en cubas de trafos inmersos en aceite.
- ✓ Se instala en la pipeta de conexión entre la cuba y el tanque de expansión, y responde a fallas de arco interna y descomposición lenta de materiales aislantes.

Esquema 2





Esquema 1

- ✓ El relé actúa ya sea por ondas de presión o por acumulación de aceite, o por pérdida de aceite por debajo del nivel del relé. Existen contactos separados para alarma y disparo.

- ✓ Los gases que pueden producirse en el interior de la cuba **suben por el caño** en el cual está instalado el relé Buchholz (esquema 1) quedando atrapado en este.

- ✓ La caja del relé está llena de aceite conteniendo los **flotadores a1 y a2 móviles**. Cuando por causa de un defecto se producen **pequeñas burbujas de gas**, éstos se elevan en la cuba hacia el tanque de expansión y son captadas por el relé y almacenados en la caja cuyo nivel de aceite **baja progresivamente**. El flotador superior se inclina y cuando la cantidad de gases es suficiente, cierra los contactos (**c1**) que alimenta el **circuito de alarma**.

- ✓ Si por la importancia del defecto haya una formación tumultuosa de gas, **cae el flotante a2 cerrándose c2** y produciéndose el **desenganche del transformador**.

- ✓ En caso de deterioro de gran magnitud que de lugar a un arco en el interior de la cuba, se producirá un flujo violento de aceite hacia el tanque de expansión que cerrará el contacto c2 **sacando el transformador de servicio** en acción rápida de manera tal de que el transformador no se averíe por la **sobrecarga**.

- ✓ El relé también actúa cuando el nivel de aceite desciende por debajo de un límite determinado.

- ✓ Grifo **b1** que permite la **salida de los gases** acumulados en la caja. Otro grifo **b2**, permite comprobar que los contactos flotadores y conexiones se hallan en buen estado.

- ✓ El relé detecta **cortocircuitos entre espiras, entre arrollamiento y núcleo y entre arrollamientos, interrupción de una fase, sobrecargas excesivas, pérdidas de aceite, etc**. La gran ventaja de este relé es su **elevada sensibilidad** para advertir deterioros o fallas incipientes.

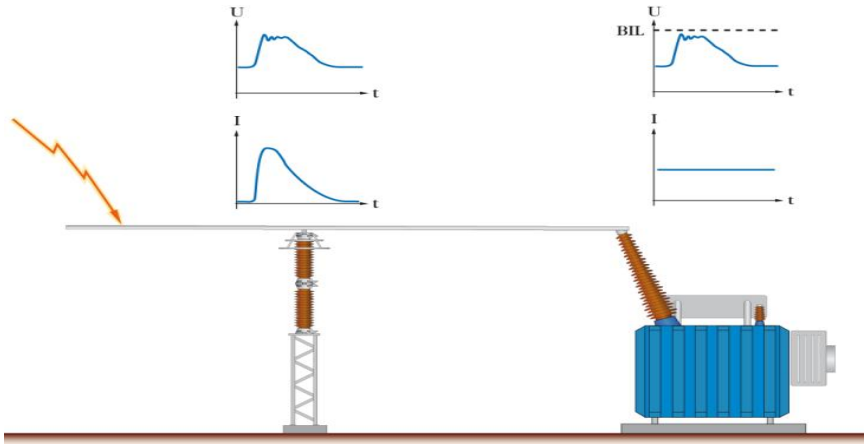
- ✓ Las características de los gases acumulados en el Buchholz puede dar una idea del tipo de desperfecto y en que parte del transformador se ha producido. El color de los gases puede brindar también idea de la naturaleza del desperfecto:

    - Gases de color **blanco** provienen de la destrucción del **papel**
    - Gases **amarillos** de la destrucción de piezas de **madera**
    - Humos **negros o grises** provienen de la **descomposición del aceite**
    - Gases **rojos** del aislamiento de los **bobinados**.

- ✓ Una **mirilla** en el relé permite observar los gases debiéndose observar el color de los mismos a los pocos minutos de aparecida la avería, dado que luego desaparece.

Autoválvulas

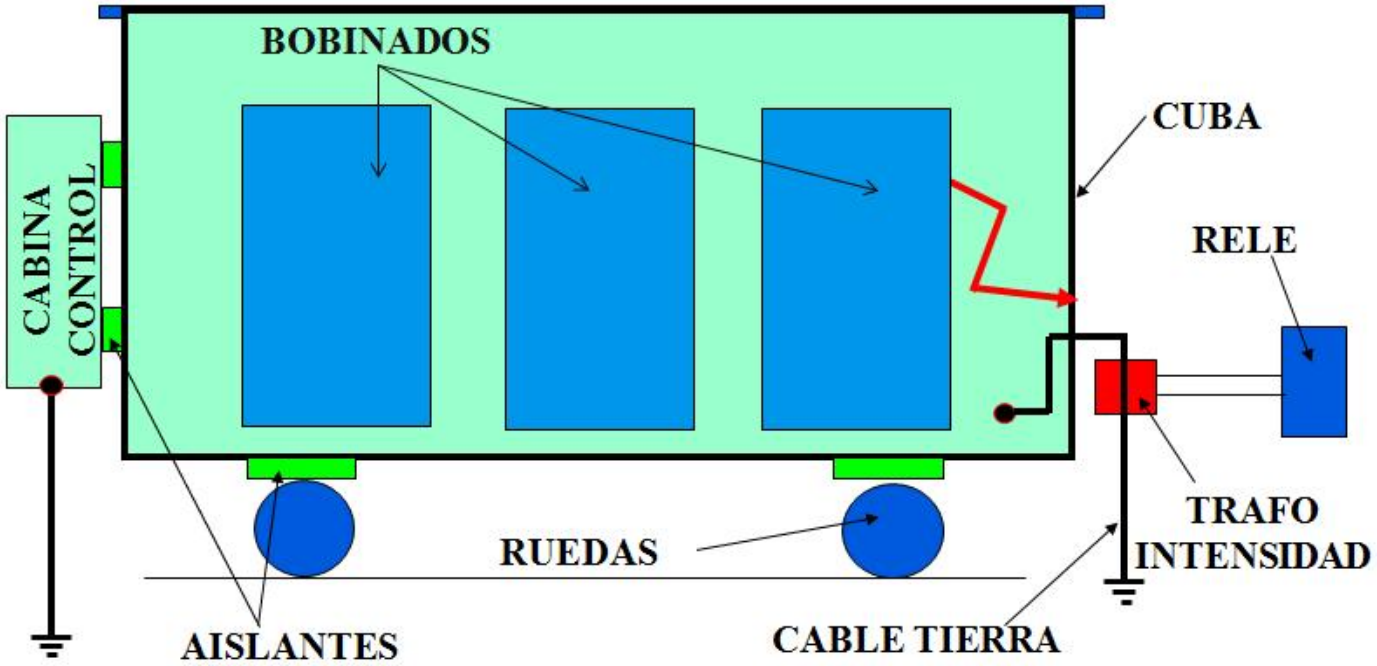
- Protegen al transformador frente a sobretensiones:
  - Caida de rayos
  - Maniobras de operación
- Dirige la corriente a tierra, manteniendo la tensión al nivel de protección
- Vuelve a su estado original para operar nuevamente
- De acuerdo a la coordinación de aislamiento
- Situación lo más próxima al transformador
- Montaje sobre bases aislantes.
- Contador de descargas



Protección contra defectos internos

PROTECCIÓN MASA-CUBA DETECTA:

- **Faltas o descargas a tierra**

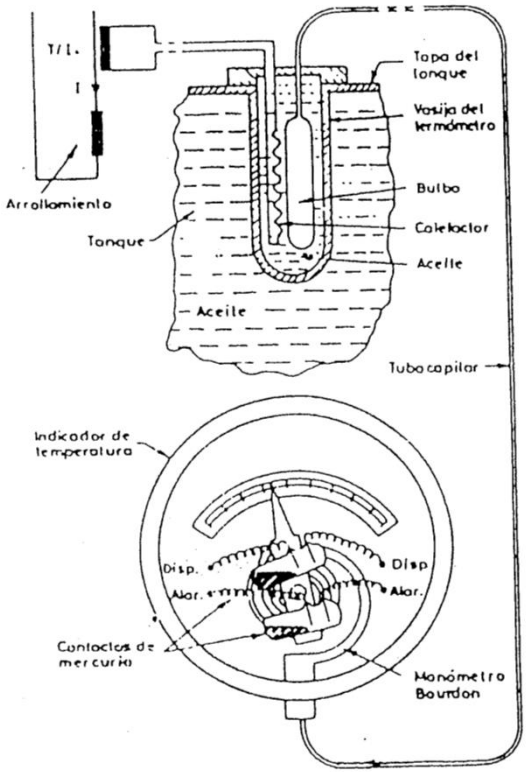


Nota:

El transformador debe estar aislado de tierra, bien mediante calzos aislantes interpuestos entre las ruedas y railes ó por placas aislantes montadas entre la base de la cuba y las ruedas.

Detección de sobrecargas

- Termómetros (aceite)
  - *Termómetro en tapa*
- Imágenes térmicas (arrollamientos)
  - Con compensación de corriente para simular la temperatura de los arrollamientos.
- Sondas de medida directa
  - Generalmente instalados en puntos críticos de bobinado o transformador

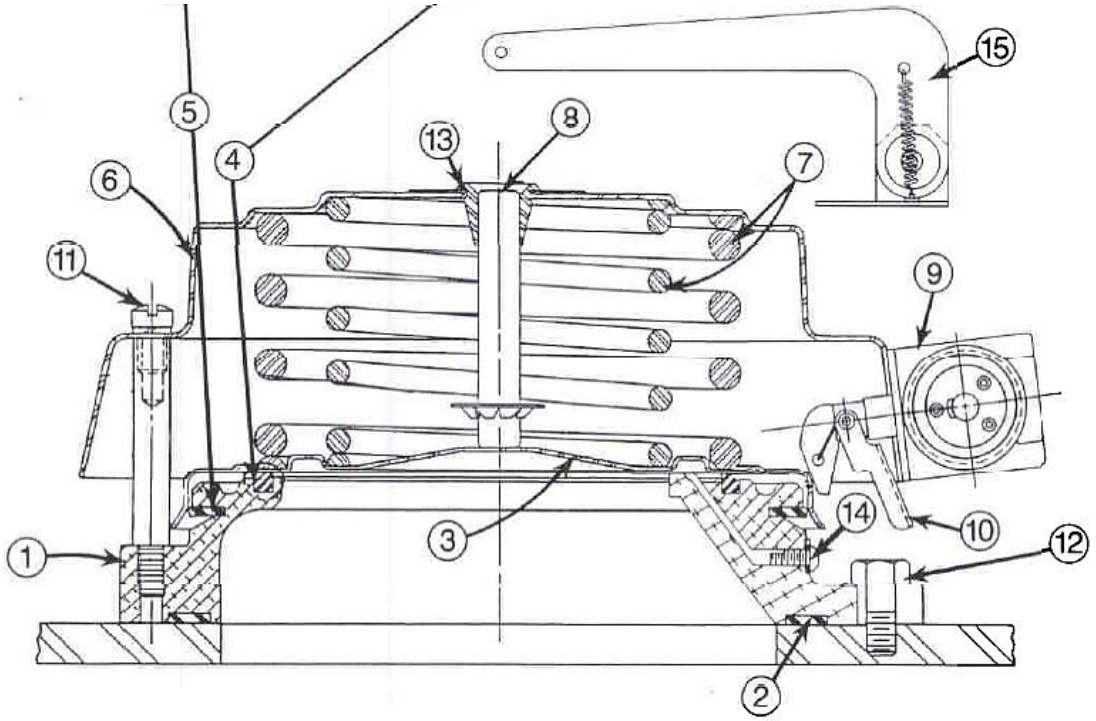


Protección contra defectos internos

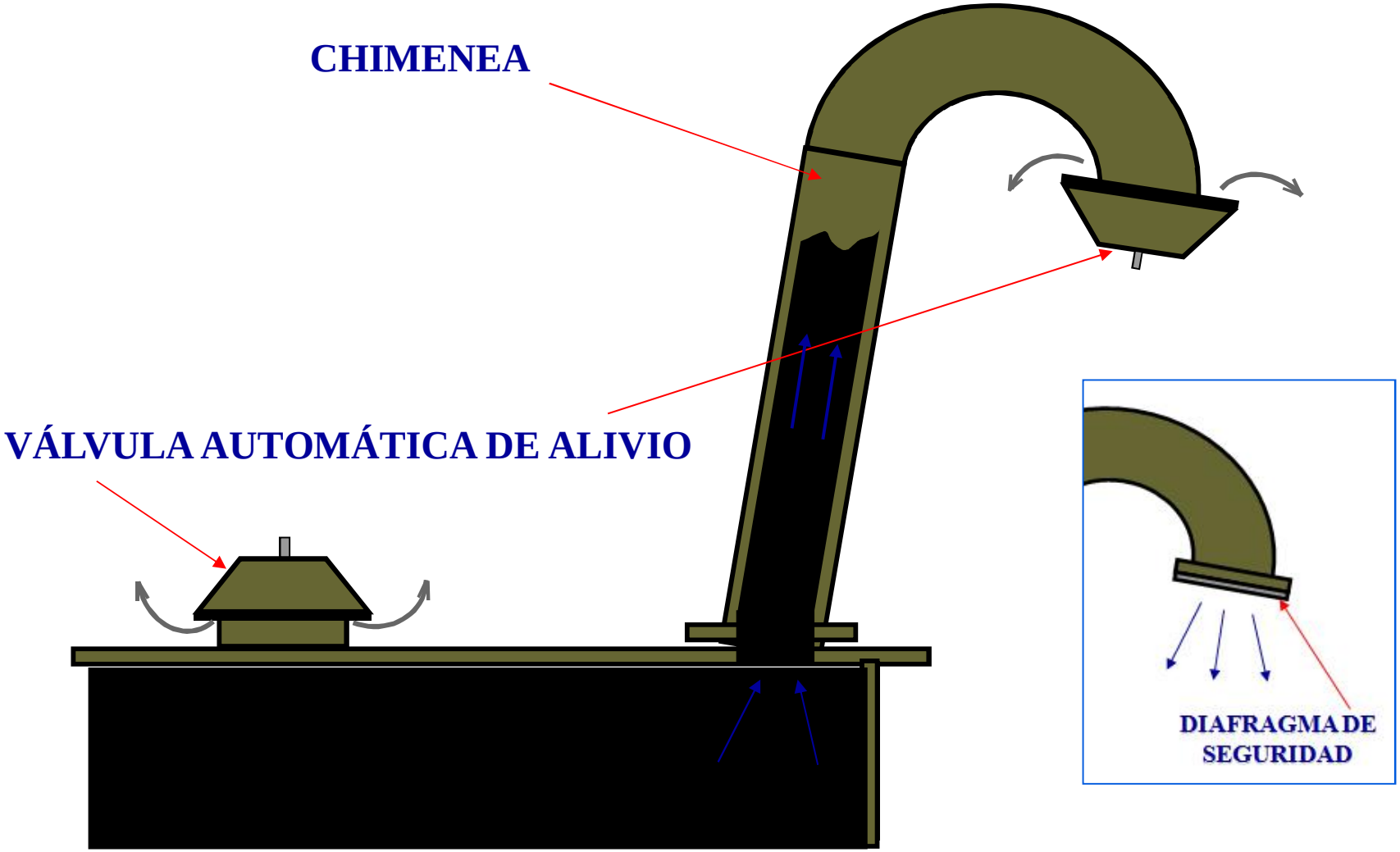
OTRAS PROTECCIONES:

- CHIMENEAS DE EXPLOSIÓN
- VÁLVULAS AUTOMÁTICAS DE ALIVIO
- SISTEMAS DE PRESERVACIÓN DE ACEITE:
  - A presión constante en contacto con el aire
  - A presión constante sin contacto con el aire
  - A presión variable (sellados)
- Nivel magnético
- PROTECCIÓN CONTRA INCENDIOS

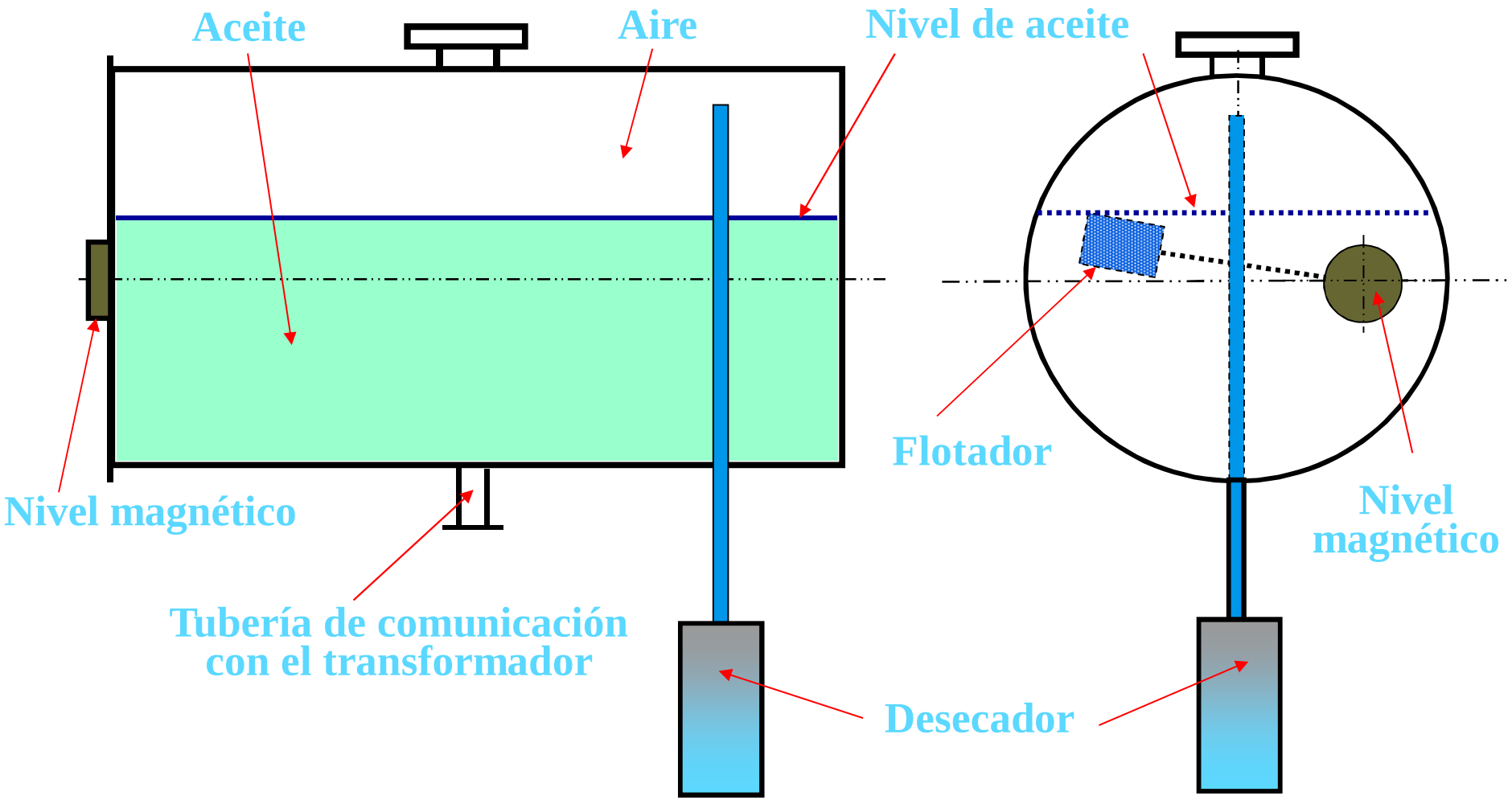
Válvula de alivio



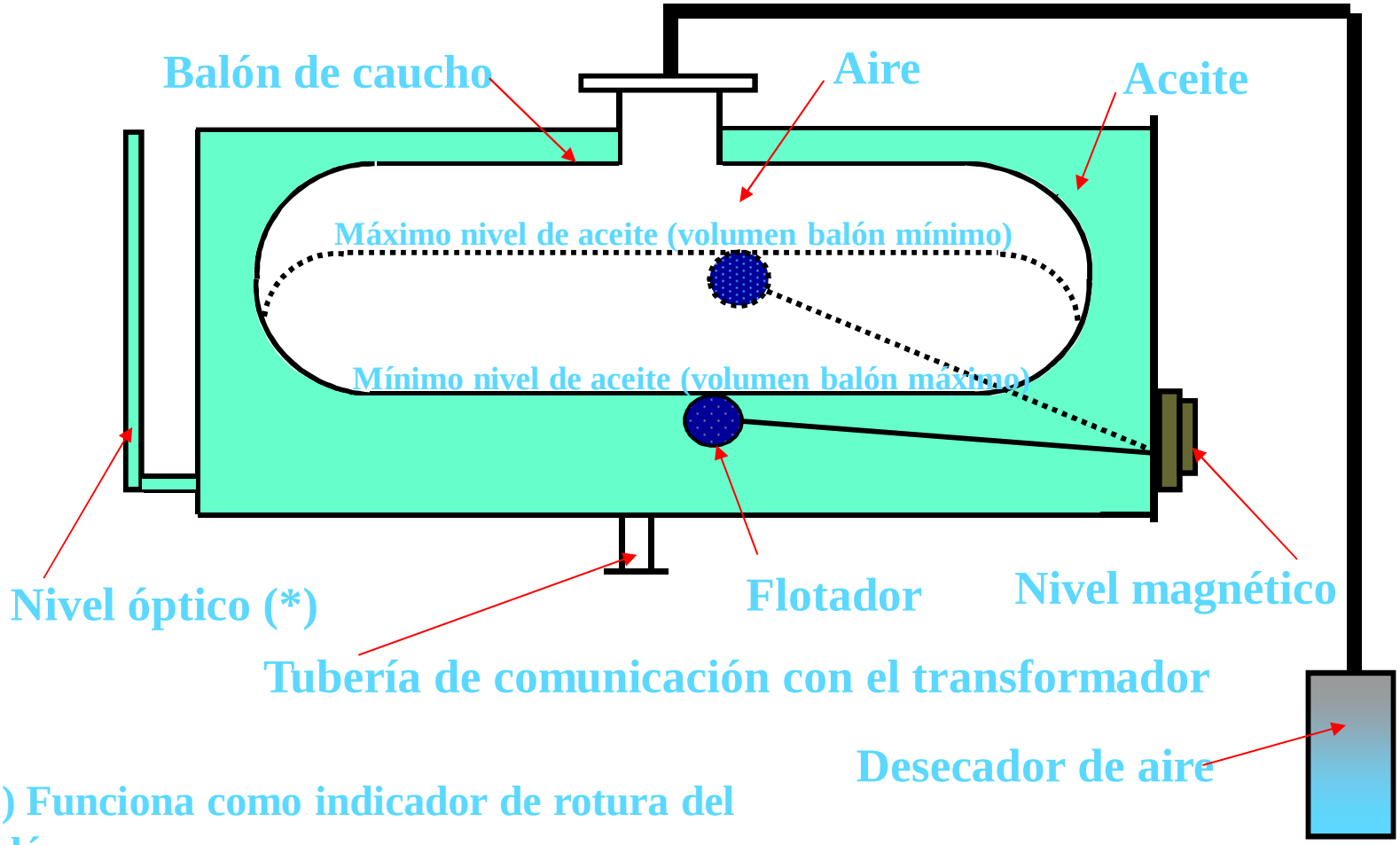
Chimenea de sobrpresión



Sistema de preservación de aceite
Al aire



Sistema de preservación de aceite
Transformador sellado



(*) Funciona como indicador de rotura del balón

Indicador de nivel
Nivel magnético