4.0 Protección de transformadores de potencia

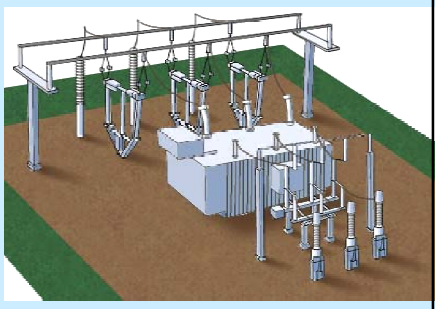
Protección de transformadores

- Generalidades.
- Protección diferencial de transformadores.
- Protección de transformadores con relés de sobrecorriente.
- Detección mecánica de fallas en un transformador.
- Detección térmica de condiciones anormales en un transformador.

Generalidades

Introducción

- El costo de reparar transformadores defectuosos puede ser grande y demás pérdidas que ello conlleva, sumado a ello los problemas de operación, se justifica el empleo de dispositivos de protección muy veloces y de gran sensibilidad, particularmente en los de mayor tamaño.

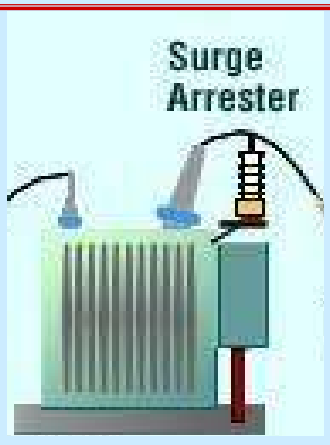


Introducción

- Las fallos internos en un transformador frecuentemente involucran una magnitud de corriente de falla que es relativamente baja comparada con la nominal del transformador.
- De allí la necesidad de alta sensibilidad y velocidad para obtener una buena protección.

Introducción

- Los transformadores con moderna protección contra sobretensiones son generalmente más confiables.



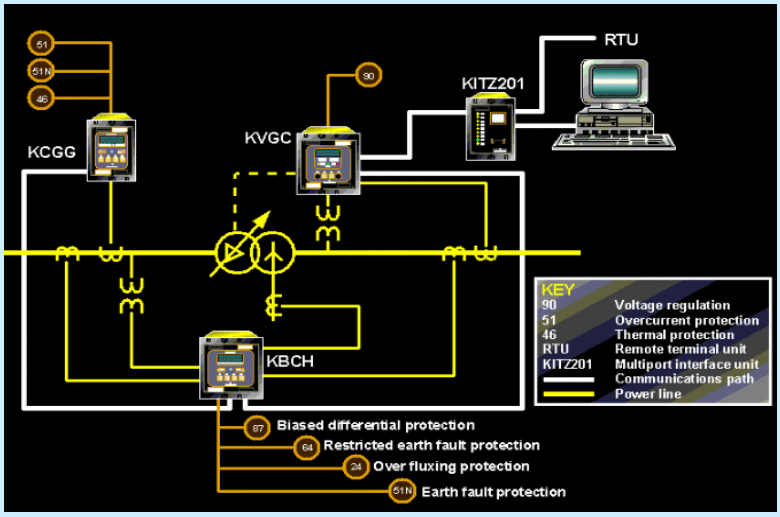
Introducción

- No hay una norma que se sigue para proteger todos los transformadores, e incluso para transformadores idénticos que tengan aplicaciones diferentes.
- La mayoría de instalaciones exige un análisis de la ingeniería para determinar el mejor esquema y el más rentable.

Introducción

- **Más de un esquema es técnicamente factible, las diferentes alternativas ofrecen diferentes grados de sensibilidad, velocidad, y selectividad.**
- **El plan seleccionado deberá, mantener al mínimo:**
  - **Los costos de reparación.**
  - **El costo de pérdida de producción.**
  - **Los factores adversos en la estabilidad del sistema.**
  - **El período de indisponibilidad del equipo dañado.**

Introducción



Introducción

- En la proteccción de transformadores, es necesario considerar una protección de respaldo.
- La falla de un relé o de un interruptor durante la falla de un transformador puede causar que el daño se agrave en el transformador.
- Cuando la fallas se extiende debido al no aclaramiento de la protección del transformador, los relés de línea remota u otros relés de protección pueden operar.

Introducción

- La protección a aplicar debe evitar que el sistema integral puede ser afectado.
- Algunos eventos son de baja probabilidad de ocurrencia pero grandes efectos, una diversidad de opinión en el grado de protección requerido podría esperarse.

Tipos de fallas en los transformadores

- Pueden agruparse en seis categorías:
  - Fallas en los devanados.
  - Fallas en el cambiador de tomas.
  - Fallas en los bushing.
  - Fallas en el tablero.
  - Fallas en el núcleo.
  - Fallas diversas.

Causas de fallas en los devanados

- Defecto de aislamiento entre espiras.
- Sobretensiones por descargas atmosféricas, de maniobra, etc.
- Humedad.
- Fallas externas (provoca daño en el aislamiento).
- Sobrecalentamiento.
- Rotura del devanado.
- Deterioro.
- Inapropiado fijación de espiras.
- Aterramientos.
- Fallas fase a fase.
- Defectos mecánicos.

Fallas en cambiador de tomas

- Mecánicos
- Eléctricos
- Contactos.
- Conductores.
- Alineamientos.
- Sobrecalentamiento.
- Cortocircuitos.
- Fuga de aceite.
- Falla externa.

Fallas en el bushing

- Envejecimiento, contaminación, y fisuras.
- Descargas debido a animales.
- Descargas debido a sobretensiones.
- Humedad.
- Bajo nivel de aceite.

Fallas en el tablero

- Pérdidas de conexiones.
- Conductores abiertos.
- Conexionado.
- Humedad.
- Aislamiento insuficiente.
- Desajuste.
- Cortocircuitos.

Fallas en el núcleo

- Falla en el aislamiento del núcleo.
- Laminaciones en cortocircuitos.
- Pérdida de pernos, tuercas, cuñas.

Estadística de fallas

- Fallas en devanados 51%.
- Fallas en cambiador de tomas 19%
- Fallas en bushing 9%.
- Fallas en tableros 6%.
- Fallas en el núcleo 2%.
- Fallas diversas 13%

Características

1. El cambio en la magnitud de corriente en terminales del transformador puede ser reducida, Por ejemplo: Al tener un número limitado de espiras en cortocircuito.
2. Cuando un transformador es energizado la corriente magnetizante inicial (INRUSH) solo circula en el primario y es varias veces la corriente nominal.
3. Estas y otras consideraciones requieren un cuidadoso análisis para obtener la característica del relé más apropiado.

Protección diferencial

Protección diferencial

- **PRINCIPIO :**

  Se basa en la discriminación por comparación.

- **ZONA DE PROTECCIÓN :**

  Delimitada por la ubicación de los TC´s.

- **SE EMPLEA :**

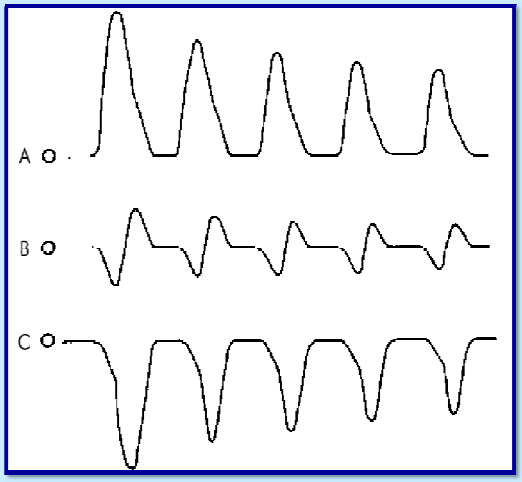
  Para detectar fallas internas y en las conexiones que se encuentran dentro de la zona de protección.

Protección diferencial

INCLUYE :

- ***Elementos de filtrado*** **(que eviten la operación debido a la INRUSH que dura de 4 a 5 ciclos). Esta corriente se considera de 8-12 veces la I_N.**
- ***Elementos de frenado*** **(que compensen los errores de los TC´s, el cambio de la posición de los TAP´S), provocando que la sensibilidad se reduzca a medida que aumenta la corriente de carga o la falla externa.**

Forma de onda típica de INRUSH

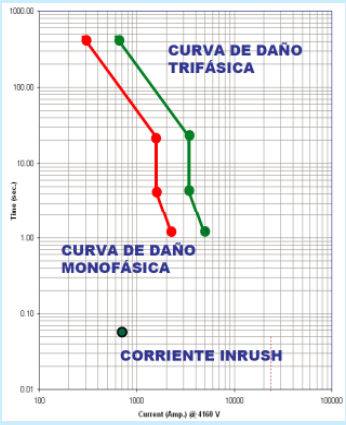


Corriente de Inrush o Energización

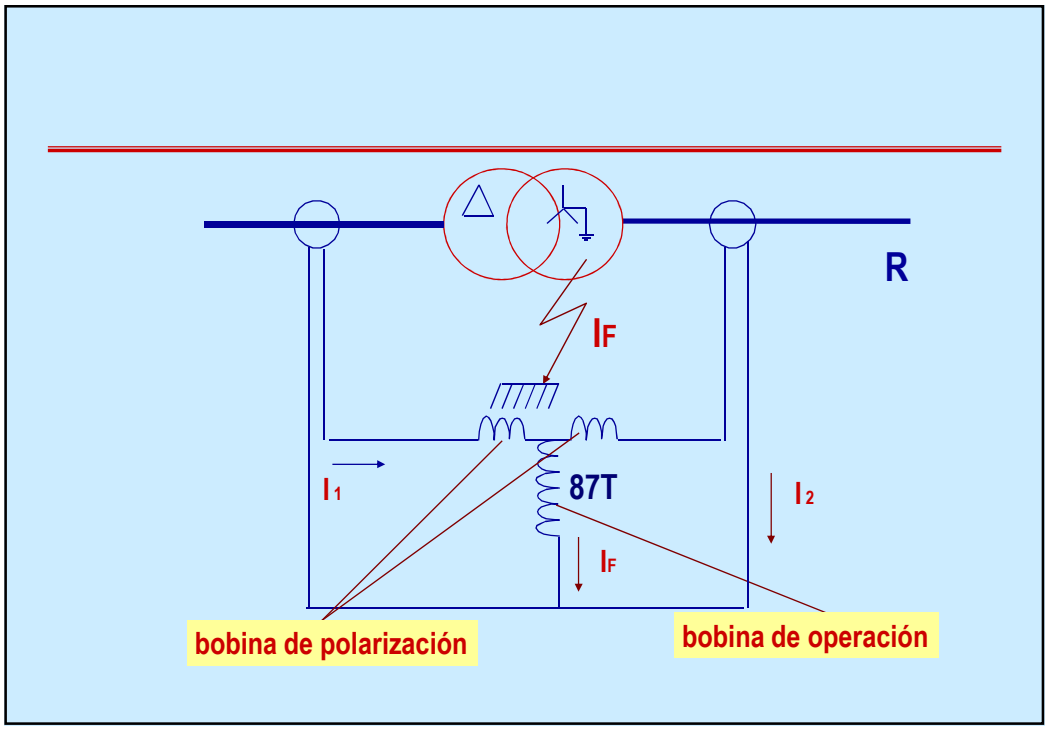
Se representa mediante un punto, el cual aproxima el efecto de la corriente de inrush sobre la operación de los dispositivos de protección asociados.

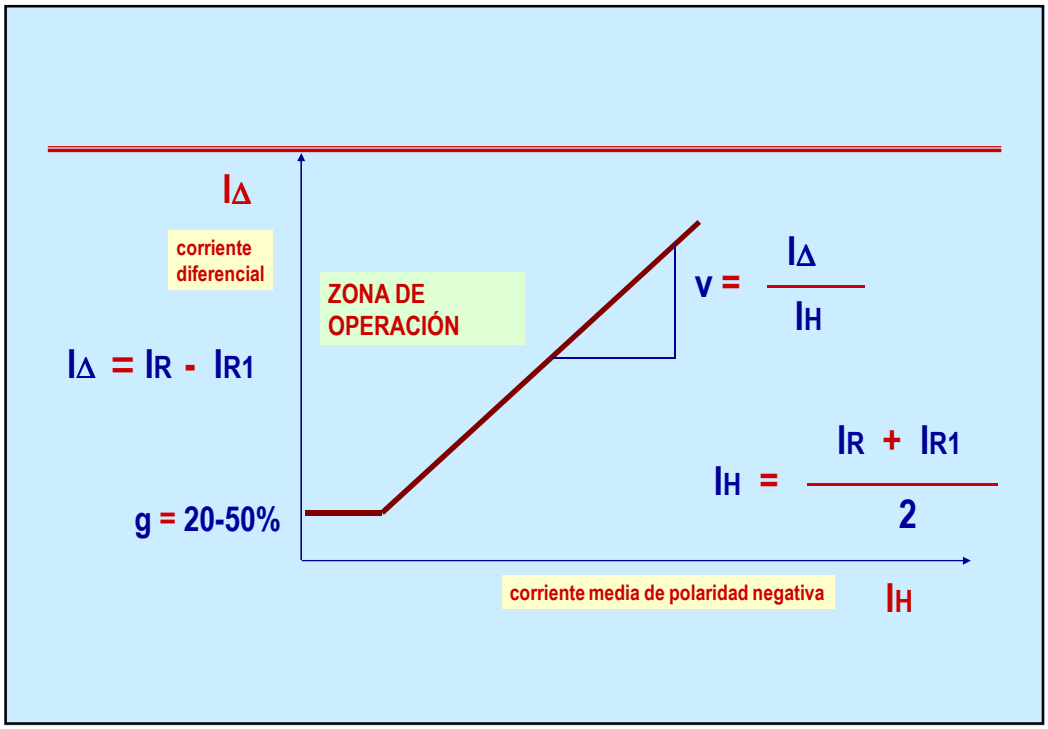
La corriente de "Inrush" dependerá de la capacidad del Tx y generalmente se dibuja en 0.1 s y puede ser estimada de la siguiente manera:

kVA	Corriente Inrush
500 - 2500	8 x In
> 2500	(10 – 12) x In



Nota: Es recomendable obtener el dato del Tx por el fabricante. Esto se hace imprescindible para TX´s de diseño especial o de muy alta tensión.


R
IF
I1
87T
I2
IF
bobina de polarización
bobina de operación


IΔ
corriente diferencial
ZONA DE OPERACIÓN
v = IΔ / IH
IΔ = IR - IR1
IH = (IR + IR1) / 2
g = 20-50%
corriente media de polaridad negativa
IH

Protección diferencial

- **ELEMENTOS DE FILTRADO**: normalmente se trata de elementos que responden a los armónicos 2do y 5to .
  - *El 2do armónico es característico de la INRUSH.*
  - *El 5to armónico aparece en caso de sobreexcitación de la máquina.*
- **DESEABLE**, que a partir de cierto nivel de el frenado por 5to armónico desaparezca, ya que una fuerte sobreexcitación tiende a producir una avería.

TRANSFORMADORES DE POTENCIA

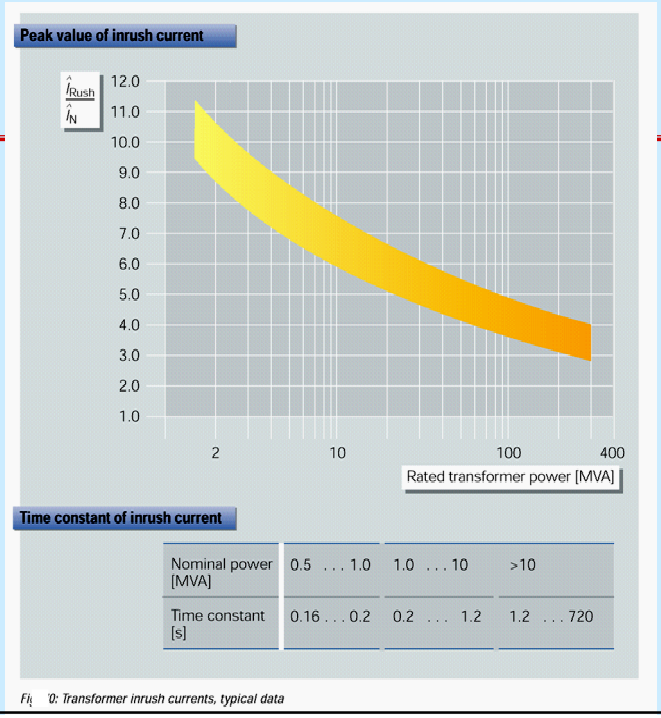


Fig. 10: Transformer inrush currents, typical data

TRANSFORMADORES DE MT / BT

P (kVA)	I_{peak}/I_n	Time cnst (ms)
50	15	100
100	14	150
160	12	200
250	12	220
400	12	250
630	11	300
800	10	300
1000	10	350
1250	9	350
1600	9	400
2000	8	450

Fig. *making currents relative to the rated current (peak value) in oil filled transformers.*

Protección diferencial

- Circunstancias que **dificultan** la aplicación de la protección diferencial:
  - Las corrientes del primario y secundario son de distinta magnitud.
  - Los TC´s, al emplear distintas relaciones de transformación, no logran compensar esa diferencia.
  - El grupo de conexión introduce un desfasaje entre la corriente primaria y la secundaria.
  - Si los TC se conectan en estrella no pueden compensar este desfasaje.

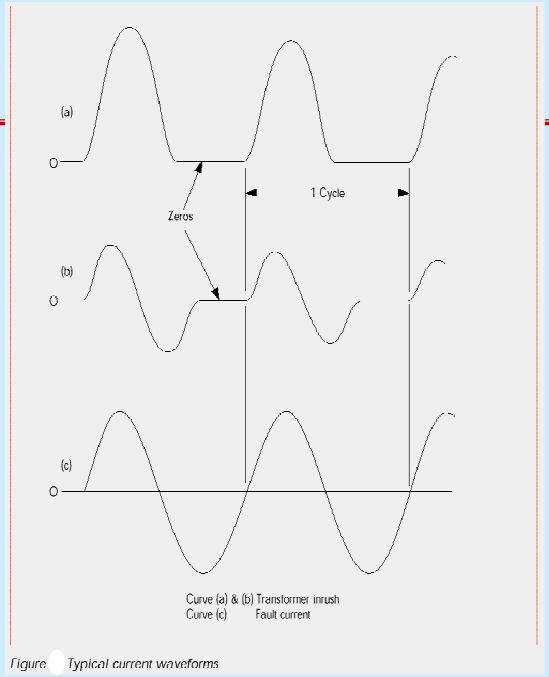
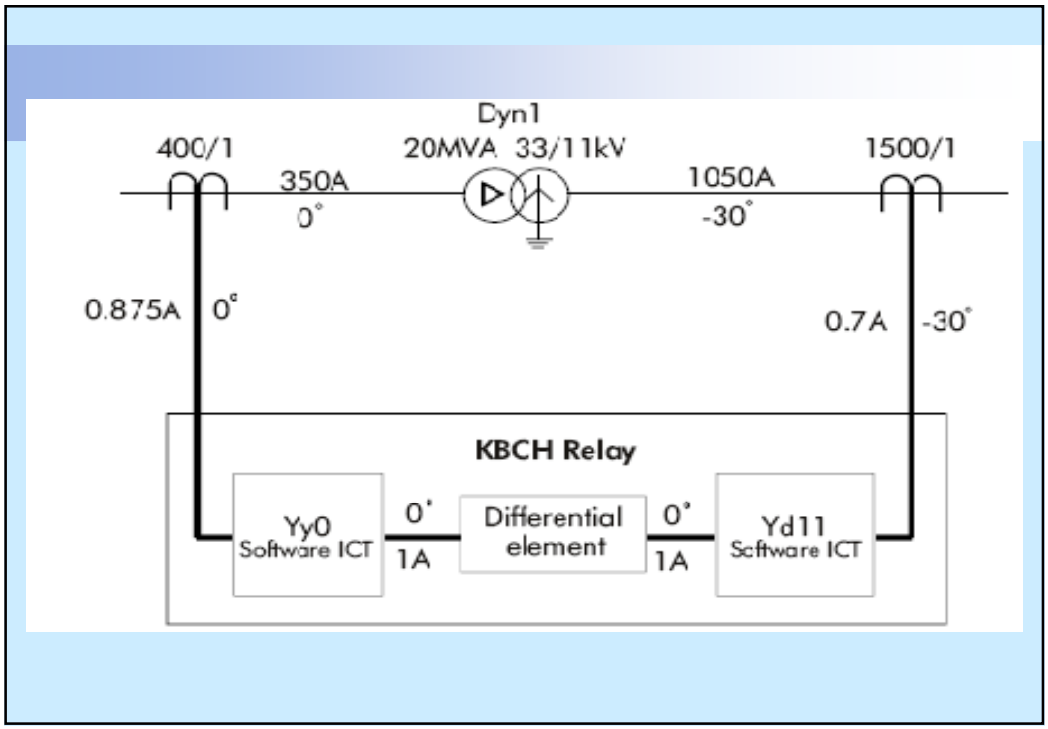
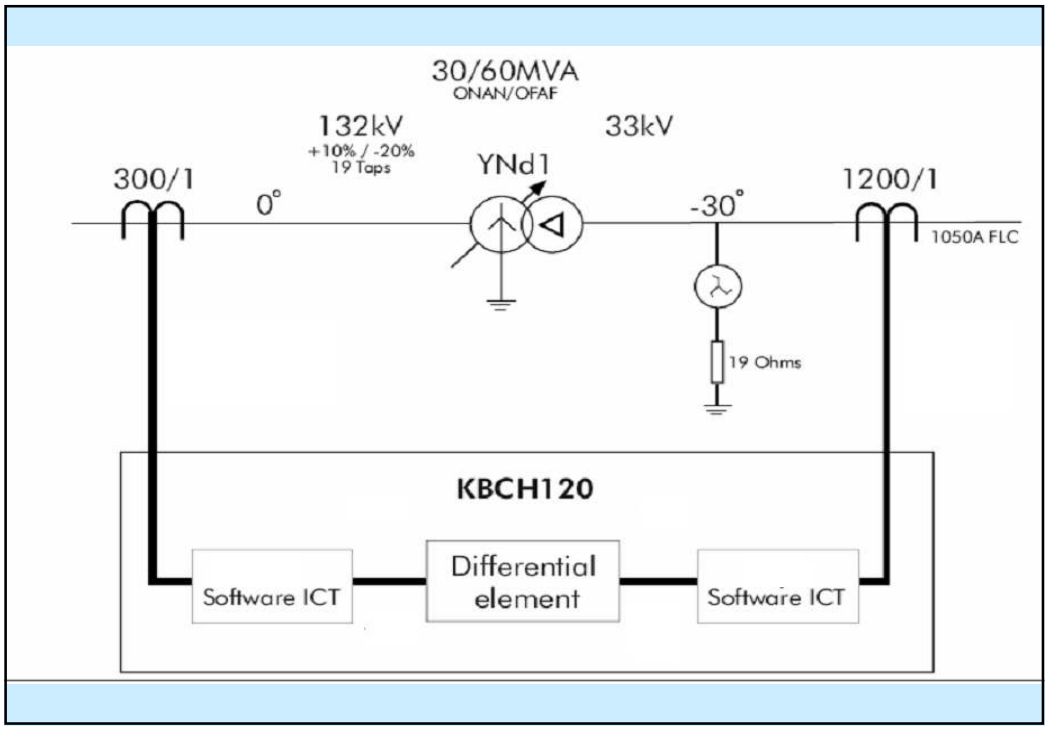


Figure Typical current waveforms

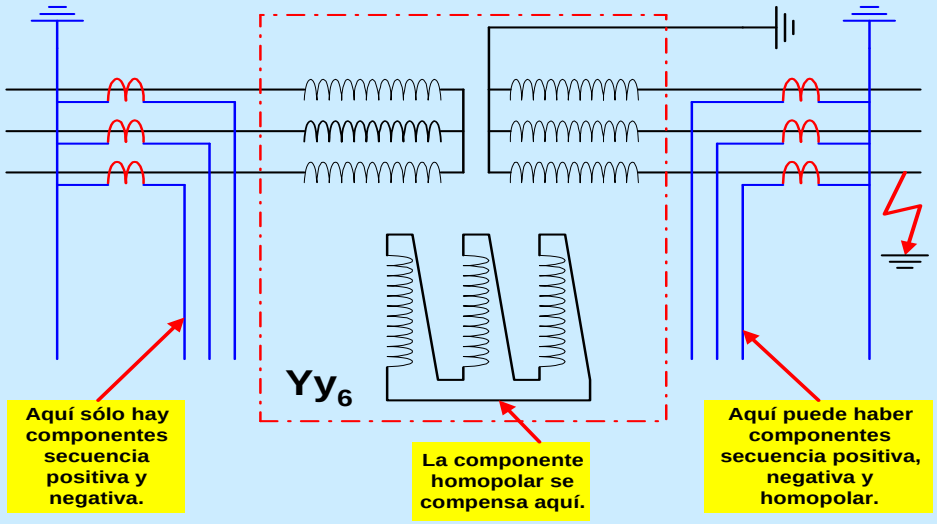
Protección diferencial

- Es afectada por la corriente de inserción o fallas externas mayores, de la componente continua de las corrientes de cortocircuito.
- El ajuste del relé diferencial deberá tener en cuenta el efecto del cambio de posición de los TAP's (si existe)
- Si sólo uno de los arrollamientos puede dar falla a tierra, será preciso filtrar las componentes homopolares.


Dyn1
400/1
20MVA 33/11kV
1500/1
350A
0°
1050A
-30°
0.875A
0°
0.7A
-30°
KBCH Relay
Yy0
Software ICT
0°
1A
Differential
element
0°
1A
Yd11
Software ICT


30/60MVA
ONAN/OFAF
132kV
+10% / -20%
19 Taps
33kV
YNd1
300/1
0°
-30°
1200/1
1050A FLC
19 Ohms
KBCH120
Software ICT
Differential
element
Software ICT

Distribución de las componentes homopolares

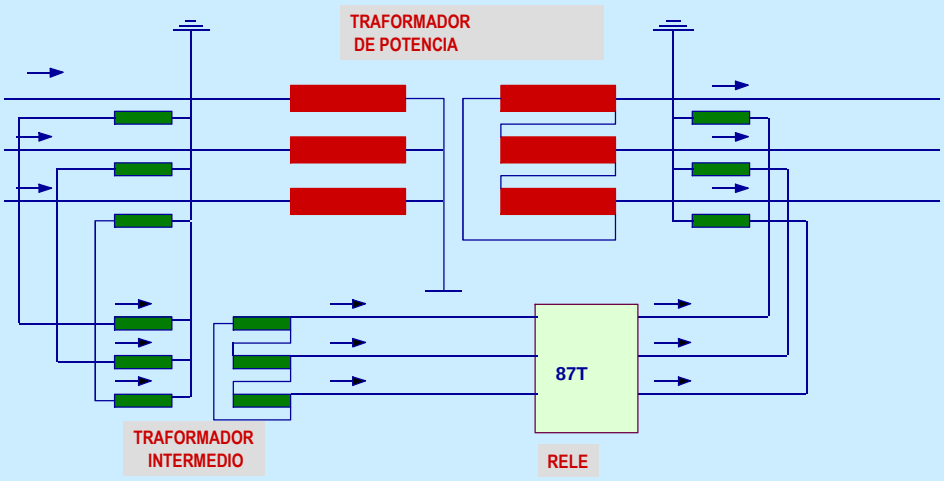


Protección diferencial

- **Compensación del desfasaje :**

  Para salvar la dificultad del desfasaje angular entre las corrientes del primario y del secundario, se introduce en el circuito, transformadores auxiliares intermedios, que también compensarán las diferencias de magnitud.

Protección diferencial



Análisis de estabilidad de la protección ante falla externa

- En este análisis se determinan las máximas corrientes a través de los transformadores de corriente simulando fallas externas, tanto en el lado de alta como en el lado de baja del transformador y se evalúa el impacto que podrían tener sobre las protecciones en el caso que se presente saturación bajo estas condiciones. Para hacer esto se debe disponer de las curvas de saturación de los CT's y demás características de estos

Análisis de estabilidad de la protección ante falla externa

- Normalmente, la gran mayoría de los relés diferenciales aplican una ecuación con la cual se verifica la estabilidad de la protección ante falla externa y esta expresión varía de acuerdo con el diseño mismo del relé diferencial.

Cálculo de factores de compensación

- Para el caso en el cual las relaciones de transformación de los CT's asociados con la protección diferencial no sean iguales, es necesario compensar mediante factores o CT's de interposición auxiliares de tal manera que en estado estable la corriente diferencial que circula por la bobina del relé, aún sin falla interna, sea minimizada.

Pendiente

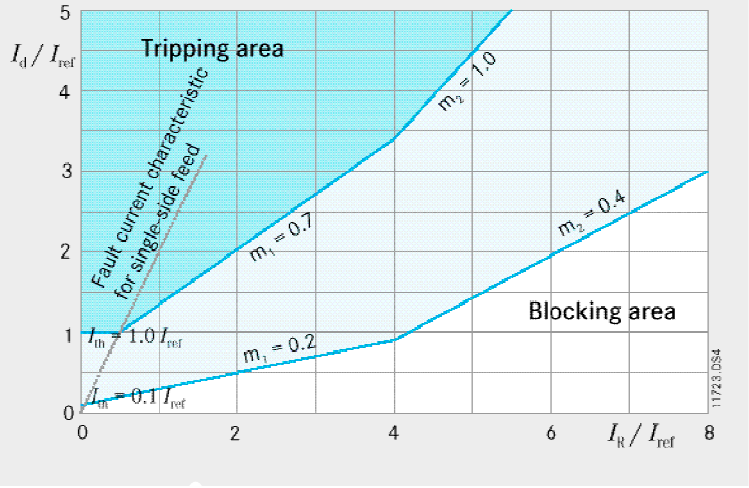
- La pendiente del relé diferencial, en la mayoría de los casos debe tener componentes que consideren los siguientes factores:

$$P = \%T + \%eCT + \%er + MS$$

Pendiente

Donde:

- P: Pendiente pocentual del relé
- %T: Máxima franja de variación del cambiador de tomas (arriba o abajo)
- $\%e_{CT}$: Máximo error de los CT para la clase de exactitud especificada
- $\%e_{R}$: Máximo error esperado de relación de transformación entre la relación de transformación del transformador y la de los CT.
- MS: Margen de seguridad: Mínimo 5%.



2 Tripping characteristics of the differential protection for three-phase symmetrical infeed

Selección de la corriente diferencial de umbral

- Para elegir el umbral de ajuste más adecuado para la protección diferencial del transformador, se realizan fallas externas monofásicas y trifásicas y se determinan las corrientes diferenciales que circularán por el relé para cada una de ellas.

Selección de la corriente diferencial de umbral

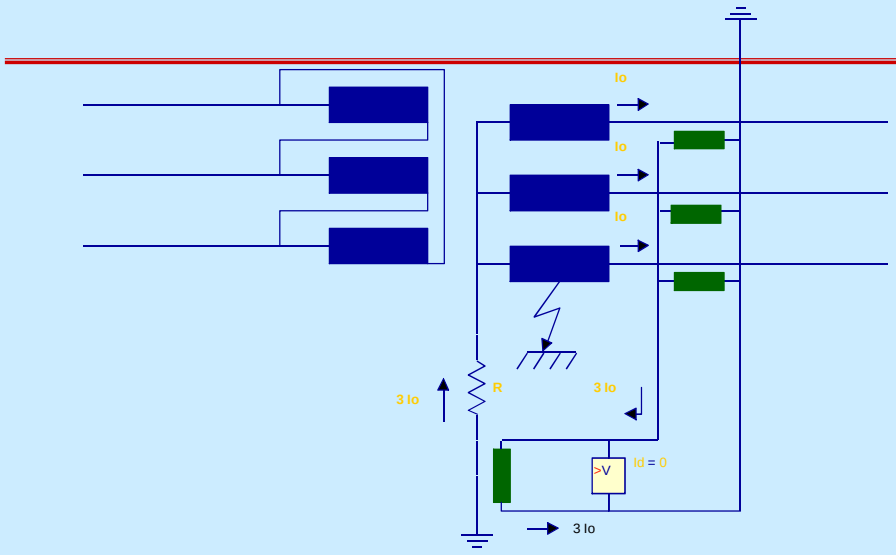
- La corriente diferencial de umbral se ajusta a un valor por encima de la máxima corriente obtenida en las simulaciones con un margen de seguridad que garantice su estabilidad ante fallas externas.

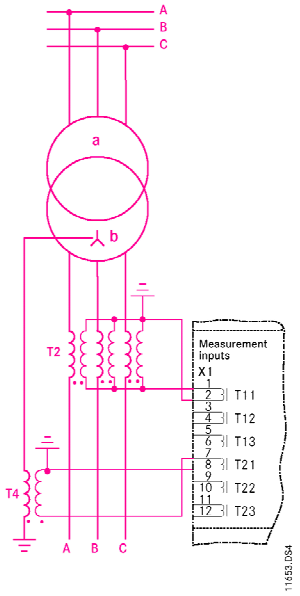
Protección diferencial de neutro

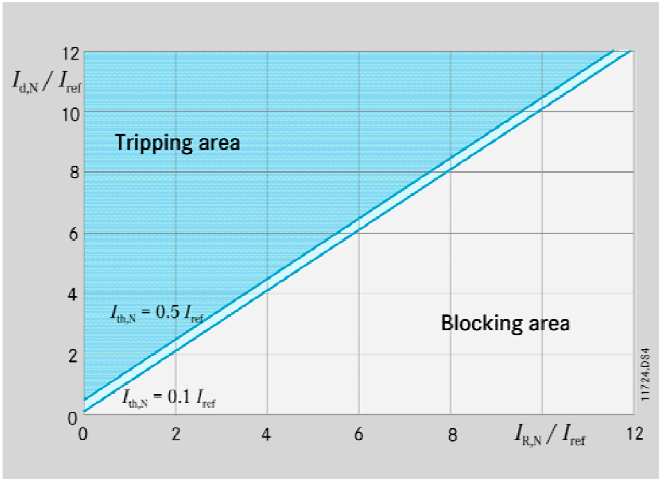
- **EMPLEA :** un relé voltimétrico por tener buena sensibilidad.
- **VENTAJAS :**
  - No es afectada por fallas externas, por las corrientes de inserción (INRUSH) o por sobrecargas.
  - No es afectada por los cambios de la posición de los TAP´s.
  - Permite ajustes más sensibles.

Protección diferencial de neutro

- DESVENTAJAS :
  - No detecta fallas entre espiras.
  - Al igual que las otras protecciones, tiene un limite de sensibilidad, de forma que no es posible detectar fallas muy próximas al neutro







3 Tripping characteristics of the ground differential protection (Br.: restricted earth fault protection)

Protección de sobrecorriente.

Protección de sobrecorriente

- En transformadores de potencia, se utiliza como protección de respaldo de la protección diferencial y para fallas externas.
- Sólo se utilizan como protecciones principales en los transformadores cuando el costo de la protección diferencial no se justifica.

Criterios para el ajuste

- estos ajustes no se pueden asignar arbitrariamente sino que se deben corroborar con un estudio de cortocircuito que garantice que exista coordinación con los relés de protección de elementos del sistema adyacentes al transformador.

Protección de fases

- Cuando se requiere la sobrecarga del transformador y para permitir la buena operación del relé, $I_S > I_{SOBRECARGA\ ESPERADA}$.
- El valor de arranque se recomienda tomarlo como un 130% $I_{N\text{-}TRAF}$ (en refrigeración forzada) y
  el TMS y la curva se determina de acuerdo con el estudio de cortocircuito.

Protección de fases

- La recomendación de 130% surge de la ventaja que ofrece la capacidad de sobrecarga del transformador en estado de operación normal y, en especial, cuando se presentan situaciones de contingencia en donde se requiere la sobrecarga de líneas y transformadores.

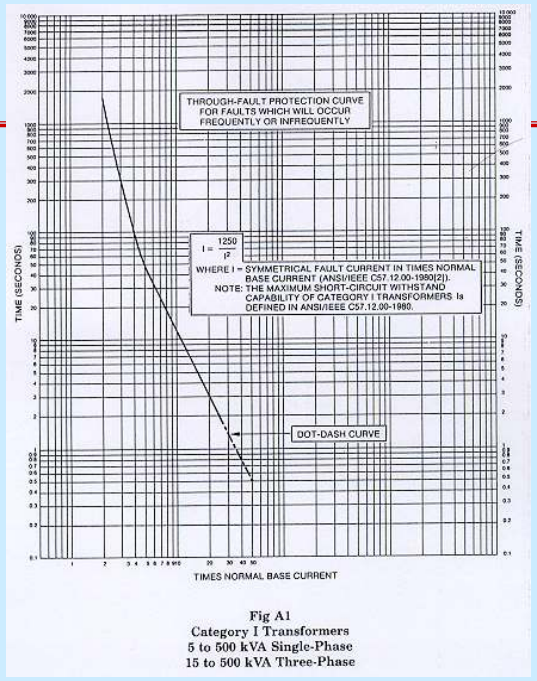


Fig A1
Category I Transformers
5 to 500 kVA Single-Phase
15 to 500 kVA Three-Phase

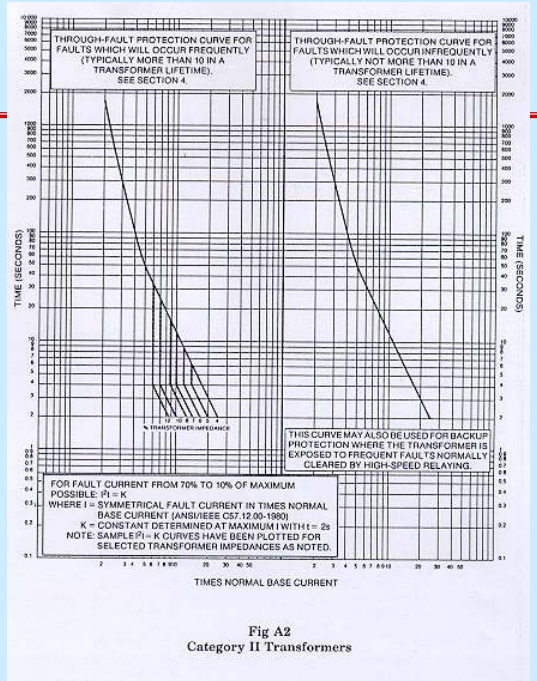


Fig A2
Category II Transformers

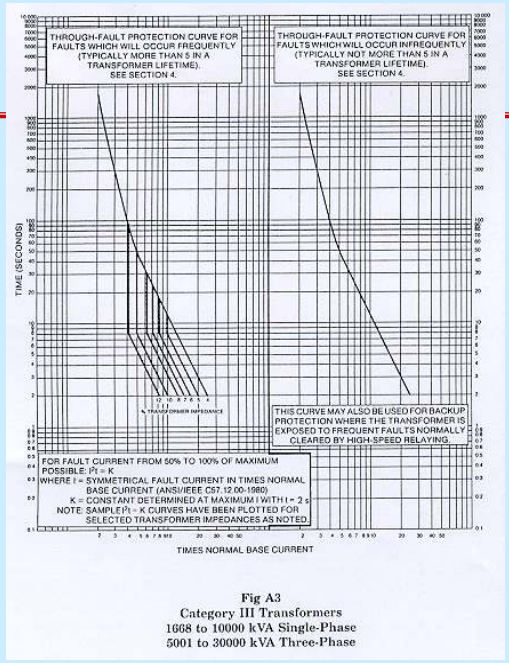


Fig A3
Category III Transformers
1668 to 10000 kVA Single-Phase
5001 to 30000 kVA Three-Phase

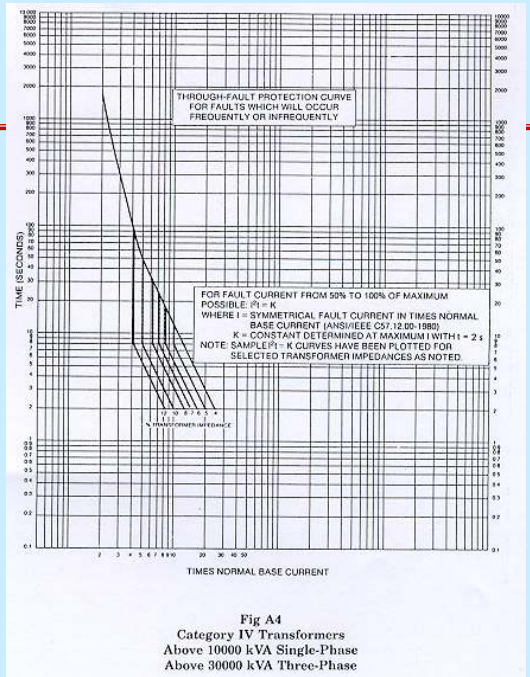


Fig A4
Category IV Transformers
Above 10000 kVA Single-Phase
Above 30000 kVA Three-Phase

Protección de fases

- De acuerdo con la norma ANSI/IEEE C37.91 es aceptable un ajuste del 200% al 300% de la mínima capacidad del transformador según su placa de características. De acuerdo con lo anterior, un ajuste del 130% de la Inominal en la máxima capacidad del transformador es aproximadamente equivalente al 217% de la Inominal en la mínima capacidad.

Protección de fases

- Para los relés de sobrecorriente de fases se hace un análisis integral, es decir, se simulan fallas bifásicas aisladas en puntos cercanos al transformador, tanto por el lado de alta como por el lado de baja y se observan las magnitudes de las corrientes por todos los relés para las diferentes fallas, se establece un ajuste primario para cada uno de los relés de sobrecorriente de fases y se verifica la coordinación entre ellos

Protección de fases

- Esta metodología se debe aplicar en generación máxima para ajustar los relés en el punto donde es más difícil coordinarlos.
- Además se debe verificar que el ajuste obtenido del relé (dial y curva característica) se ubique por debajo de la curva de soportabilidad del transformador, para garantizar que el equipo no sufrirá daño.

Sobrecorriente de fase instantánea

- No es recomendable el uso de la unidad instantánea para protección de transformadores ya que se pueden presentar operaciones indeseadas ante corrientes de energización o por fallas en otros niveles de tensión.

Sobrecorriente de fase instantánea

- Cuando esta unidad se utiliza, su ajuste debe ser superior a la máxima corriente subtransitoria asimétrica para una falla en el lado de baja tensión del transformador.
- Así mismo, la unidad instantánea se debe ajustar en un valor superior a la corriente “inrush” del transformador, para evitar disparos inadecuados.

Protección de falla a tierra

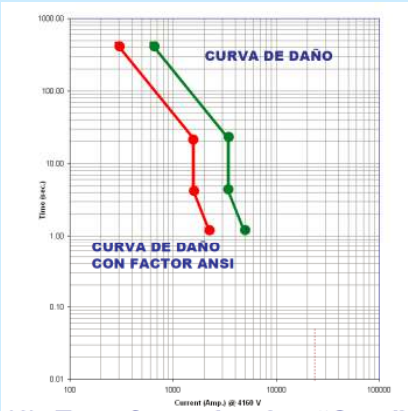
- El valor de arranque de los relés de sobrecorrientes de tierra se recomienda en un valor del 40% de la corriente nominal del transformador.
- El TMS y la curva se determinan de acuerdo con el estudio de corto circuito.

Protección de falla a tierra

- Para el ajuste de los relés de sobrecorriente de tierra, se simulan fallas monofásicas francas y de alta impedancia (30 Ω ó 50 Ω) en varios puntos del sistema (varios niveles de tensión del transformador).

Factor ANSI según la Conexión del Transformador

Tipo de Conex.	Falla 3 Φ	Falla 2 Φ	Falla 1 Φ	Factor Ansi
Δ Δ	1.00	0.87	N/A	0.87
Δ Y	1.00	1.15	0.58	0.58
Δ Y	1.00	1.15	N/A	1.00
Y Y	1.00	1.00	N/A	1.00
Y Y	1.00	1.00	1.00	1.00
Y Y (1)	1.00	1.00	0.67	0.67
Y Y (2)	1.00	1.00	N/A	1.00



(1): Transformador tipo "Core"

(2): Transformador tipo "Shell"

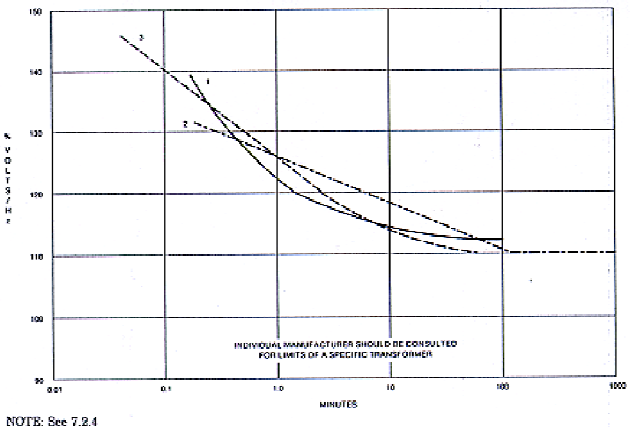
Protección de sobreexcitación

Causas :

- Sobretensiones.
- Reducción de la frecuencia.

Efectos :

- El aumento del flujo, motiva un aumento en las pérdidas en el núcleo.
- Los pernos del núcleo, pueden alcanzar rápidamente una temperatura peligrosa que dañe su propio aislamiento e incluso dañar el aislamiento de las bobinas.



NOTE: See 7.2.4

Fig 13
Transformer Overexcitation Limits of Three Manufacturers

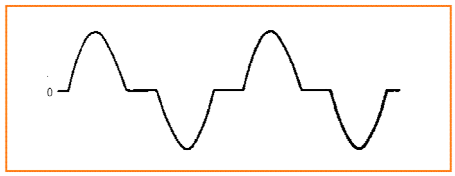
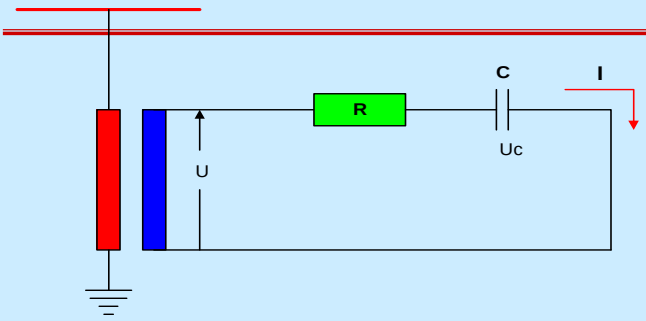


Figure 13. Magnetising current with transformer overfluxed.

Protección de sobreexcitación

Principio de funcionamiento :

- Se sabe que la relación U/f debe permanecer constante a fin de que no se tenga sobreexcitación.
- En el esquema mostrado, Uc es proporcional a (U/f).
- Normalmente, el relé dispone de 2 salidas temporizadas. Los tiempos usuales son de 2 a 5 s para la alarma y de 5 a 30 s para el disparo.

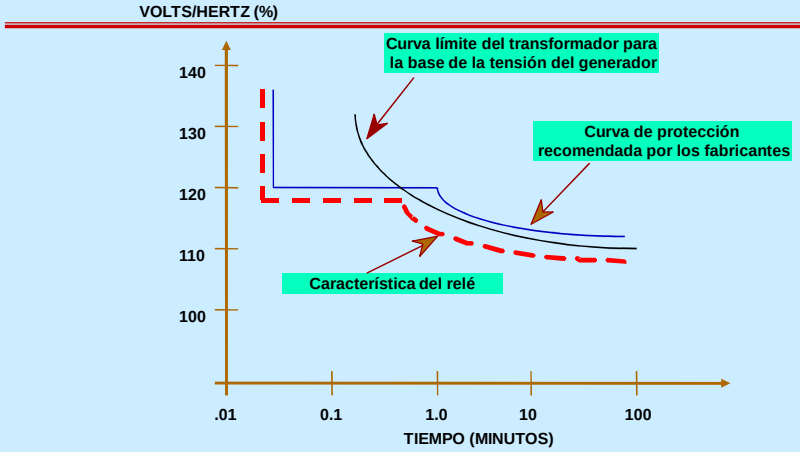


R >> Xc

I = U/Z aprox= U/R

Uc = Xc . I = U/(2¶ f C . R) = K (U / f)

ESQUEMA DE PRINCIPIO DE PROTECCION CONTRA SOBREEXCITACION



Protección de sobretensión

Se emplea :

En especial, para aquellos transformadores asociados a redes poco malladas, en las que existe una posibilidad notable de sobretensiones permanentes.

Ajuste :

Se acostumbra emplear un relé con dos ajustes:

- Con el ajuste menor, se dispara en un tiempo de 5-20s.
- Si se supera el ajuste mayor el disparo es instantáneo.

Detección mecánica de fallas en el transformador

Detección mecánica

- Hay dos métodos de detección de fallas en el transformador, estos métodos son:

1. La acumulación de gases debido a la descomposición lenta del aislamiento del transfromador o aceite.
2. Incremento de aceite en el tanque o presiones de gas causadas por las fallas internas en el transformador.

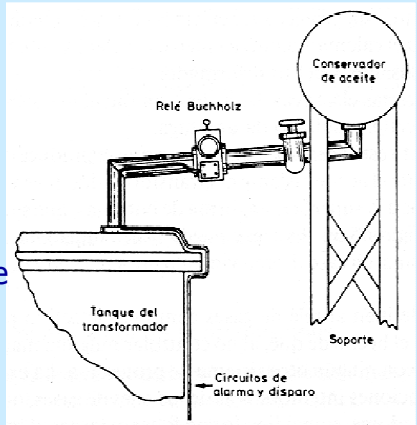
Relés

- Los relés que usan estos métodos son valiosos suplementos a los relés diferenciales u otros relés.
- Estos relés pueden ser más sensibles para detectar fallas internas que los relés dependientes de magnitudes eléctricas, y así puede ser muy valiosos minimizando al mínimo los daños en el transformador por defectos internos.

Protección Buchholz

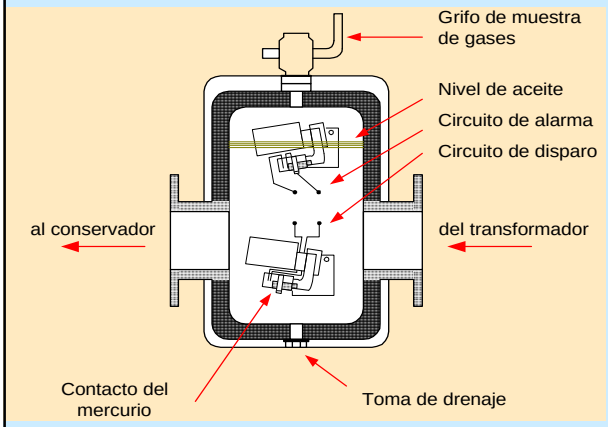
DETECTA : Averías internas en el transformador y en el tanque de expansión (muy sensible).

- Rotura de conductores.
- Contactos defectuosos (falso contacto en los conmutadores de tomas).
- Calentamiento del núcleo (en cualquier punto por cortocircuito entre planchas).



b) Situación del relé Buchholz en un transformador

Protección Buchholz



DETECTA

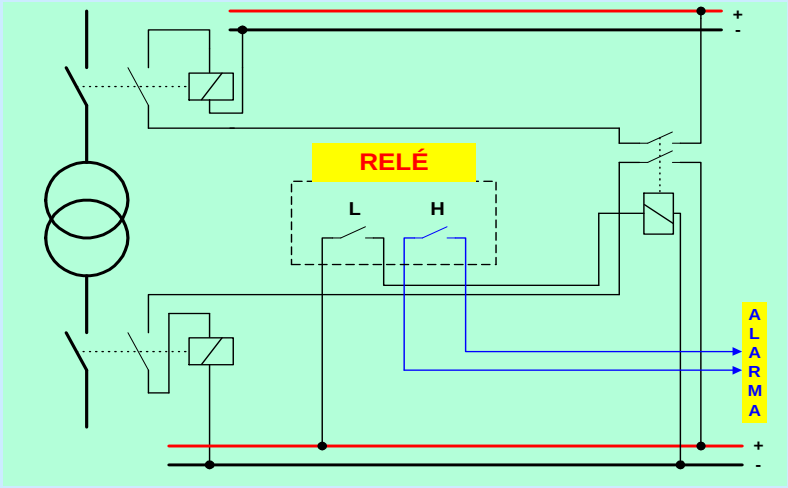
- Sobrecarga en los bornes pasatapas (parte interna).
- Variaciones del nivel de aceite (resultado de pérdida de refrigerante).

Protección Buchholz

FUNCIONAMIENTO :

- Basado en el arco que produce la avería.
  - *Descompone térmicamente el aceite*
  - *Provoca un desprendimiento de gas, que sube a la superficie en forma de burbujas, que se acumula en el cubículo.*
- El gas hace funcionar una de las boyas (alarma)
- En caso de una violenta presencia de gas, se provoca el disparo por la acción de la segunda boya.

CONEXIONES DEL RELÉ BUCHHOLZ



L = CONTACTO DE DISPARO H = CONTACTO DE ALARMA

Protección Buchholz

- Se emplea : generalmente en los transformadores con potencias nominales superiores a los 315 kVA, "selectivo por excelencia".
- Esta provisto : de 2 ventanas de inspección destinadas a verificar el nivel de aceite, la velocidad con que se acumula el gas y el color.
- EJEMPLO:
  Un gas blanco o amarillo indica aislamiento quemado.
  Gas negro o gris indica aceite disociado.

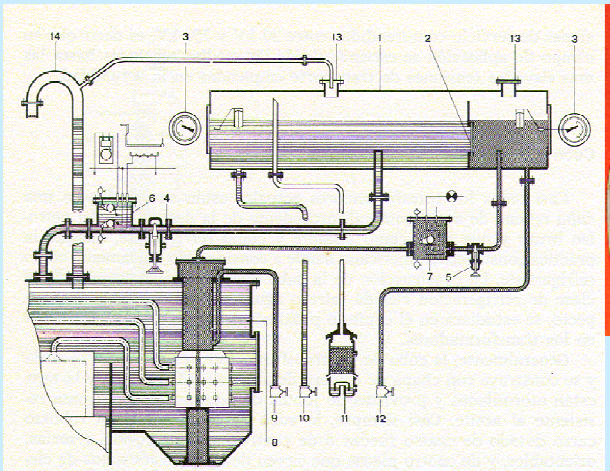
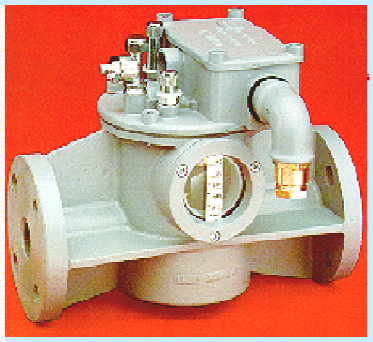


Fig. 337.—Dibujo esquemático de los accesorios de un transformador con aislamiento de aceite: 1—Depósito conservador de aceite. 2—Filtro. 3—Indicador magnético de nivel de aceite. 4-5—Válvulas de parada. 6—Relé Buchholz. 7—Recuperador de gas. 8—Cámara de ruptura del conmutador de tomas. 9—Válvula de desagüe de aceite sucio. 10—Válvula de purga y de llenado del compartimiento principal. 11—Desecador de aire. 12—Válvula de purga del compartimiento de regulación. 13—Tubería de llenado. 14—Tubo de seguridad.



Protección Buchholz

SIN EMBARGO : la naturaleza de las fallas solo puede precisarse mediante un análisis de los componentes del gas. Así por ejemplo la presencia de :

- H_2 y C_2H_2.- indica arco a través del aceite entre las partes constructivas de la máquina.
- H_2, C_2H_2 y CH_4.- indica arco con destrucción de aislante tipo fenólico. Por ejemplo el empleado en el conmutador de tomas.

Protección Buchholz

- H_2, C_2H_4, CO_2 y C_3H_6.- indica un punto caliente en el arrollamiento.
- H_2, CH_4 y C_2H_4.- indica un punto caliente en el núcleo.

- El relé cuenta en la parte superior con una llave o válvula para la toma de muestras.
- MONTAJE : para garantizar el paso libre a las burbujas, este tipo de relé exige algunas condiciones de montaje que se resumen en la figura siguiente.

Valores de ajuste referenciales :

VOLUMEN DE GAS DETECTADO POR ALARMA

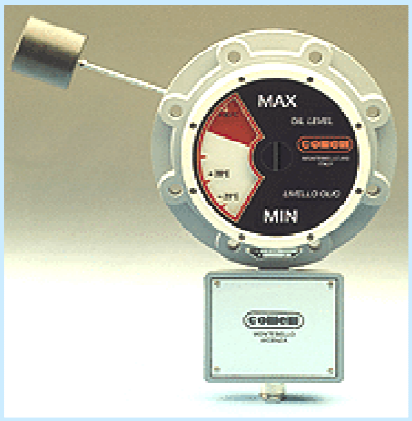
S_N (MVA)	ϕ de la tubería	Rango de Ajuste cm^3	Ajuste Normal
< 1	2,5 cm	100-200	110
1 - 10	5,0 cm	185-215	210
> 10	7,5 cm	220-280	280

Velocidad del aceite para el disparo

S_N (MVA)	ϕ de la tubería	Rango de Ajuste cm/s	Ajuste Normal
< 1	2,5 cm	75-125	90
1 - 10	5,0 cm	80- 135	100
> 10	7,5 cm	95 - 155	110

Relé detector de gas

- Sólo puede usarse en los conservadores del transformador, convencional o sellado
- Este relé detecta a menudo la evolución de gas para arcos menores antes que el daño se extienda a devanados o núcleo.



Relé detector de gas

- Este relé puede detectar calentamientos debido a altas resistencias de empalmes o altas corriente circulantes entre laminaciones.
- Esencialmente, el relé detector de gases es un imán tipo indicador de nivel de líquido con un flotador operando en una cámara llena de aceite.

Relés de presión

- Los relés basados en el incremento de presión se aplican a transformadores sin tanque conservador. En estos transformadores el tanque no está totalmente lleno de aceite, si no por lo general contiene además un gas noble. El relé se coloca en la parte superior del transformador y tiene en su interior un elemento que corresponde al incremento de la presión en el gas o el aceite, y provoca el cierre de un contacto.

Relés de presión

- El relés es sensible a fallas pequeñas tiene una característica de tiempo inverso, con tiempos de operación comprendidos entre unos 10 y 600 ms, dependiendo de la magnitud de la falla, Por lo general se dispone que el relé provoque la desconexión del transformador.

Detección térmica de anormalidades

Causas de sobrecarga

- Los transformadores se pueden sobrecalentar debido a:

1. Alta temperatura ambiente.
2. Falla en el sistema de enfriamiento.
3. Falla externa no aclarada prontamente.
4. Sobrecarga.
5. Condiciones anormales del sistema, como baja frecuencia, sobretensión, corriente no sinusoidal o desbalance de tensiones de fase.

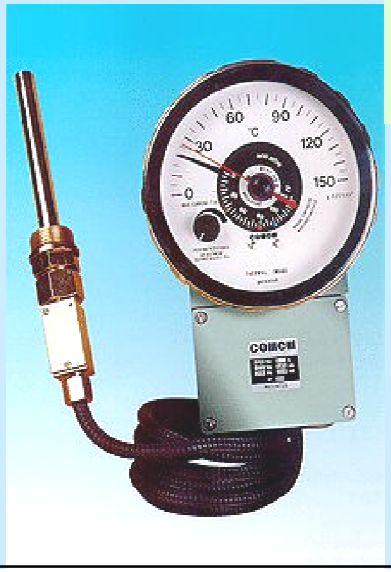
Efectos de la sobretemperatura

1. El sobrecalentamiento acorta la vida útil del aislamiento, dependiendo del garado de temperatura y de su duración.
2. Una severa sobretemperatura puede resultar en un inmediata falla del aislamiento.
3. Una severa sobretemperatura puede enceder el retrigerante del transformador si se supera su temperatura límite, con el resultante incendio.

Protección contra sobrecargas

- **Filosofía**
  Para poder obtener la máxima utilización y asegurar la continuidad del servicio, un transformador debe ser capaz de soportar sobrecargas durante períodos de tiempo cortos.
- **Condición**
  Necesariamente, es preciso controlar las sobrecargas a fin de evitar un envejecimiento prematuro del aislamiento de los devanados.

Protección contra sobrecargas



Protección utilizada
- Protección térmica.
- Control de temperatura del Aceite.

Expectativa de vida útil

Operating Temperature	Transformer Oil Life
60 °C	20 years
70 °C	10 years
80 °C	5 years
90 °C	2.5 years
100 °C	13 months
110 °C	7 months

Ajuste de la protección por Temp.

Winding temperature alarm = 100 °C
Winding temperature trip = 120 °C
Oil temperature alarm = 95 °C
Oil temperature trip = 105 °C

Protección contra sobrecargas

Protección térmica clásica

- Consiste de un relé que controla la corriente por el transformador.
- Esta corriente incide sobre un bloque bimetálico que provoca su actuación por acción del calor, ofreciendo constantes de tiempo hasta su actuación de 15 a 80 minutos.
- Algunos sistemas compensan la influencia de la temperatura ambiente.
- El inconveniente de este sistema es que sólo controla la corriente circulante y no está asociado a la temperatura del aceite.

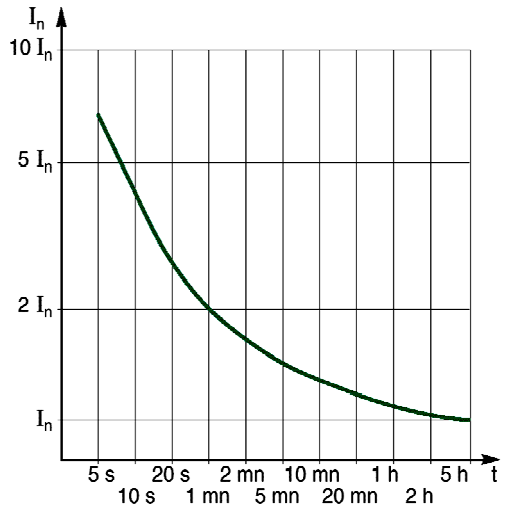


Fig *: order of magnitude of the overload capacity of an oil filled transformer.*

Relé de imagen térmica

- Combinan el control de la temperatura y de la corriente.
- Se obtienen mejores resultados y se reducen los riesgos de operaciones intempestivos.
- Adicionalmente, continúa utilizándose el control de la temperatura del aceite, por termostato o por termómetro de contacto.

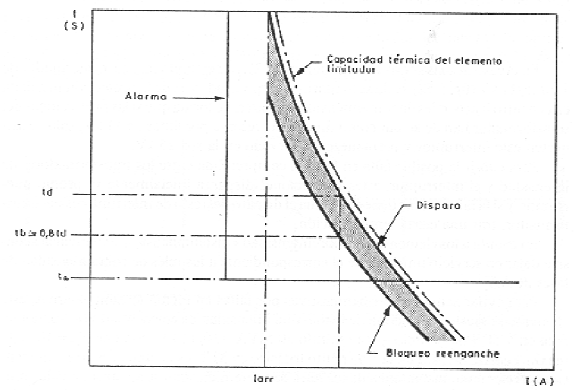
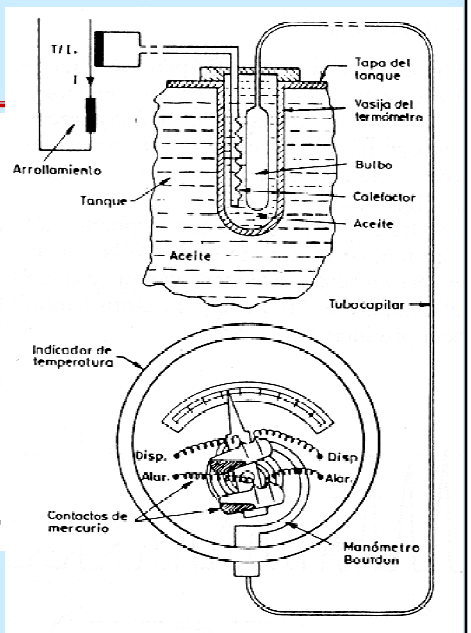


Fig. 5 Función de alarma y curvas I^2t para un relé de imagen térmica del elemento limitador de la corriente en el neutro del transformador.



Válvula de sobrepresión