

PROTECCION DE TRANSFORMADORES DE PODER

Protección diferencial de transformadores

Los relés de protección diferencial operan basados en un principio selectivo, que detecta fallas por la comparación de ciertas cantidades eléctricas de una misma fase, medidas en la entrada y salida del elemento protegido.

El relé diferencial más comúnmente usado es el relé (87), que opera en base a comparación de magnitudes de corrientes cuyo principio de operación se muestra en la figura N° 1.

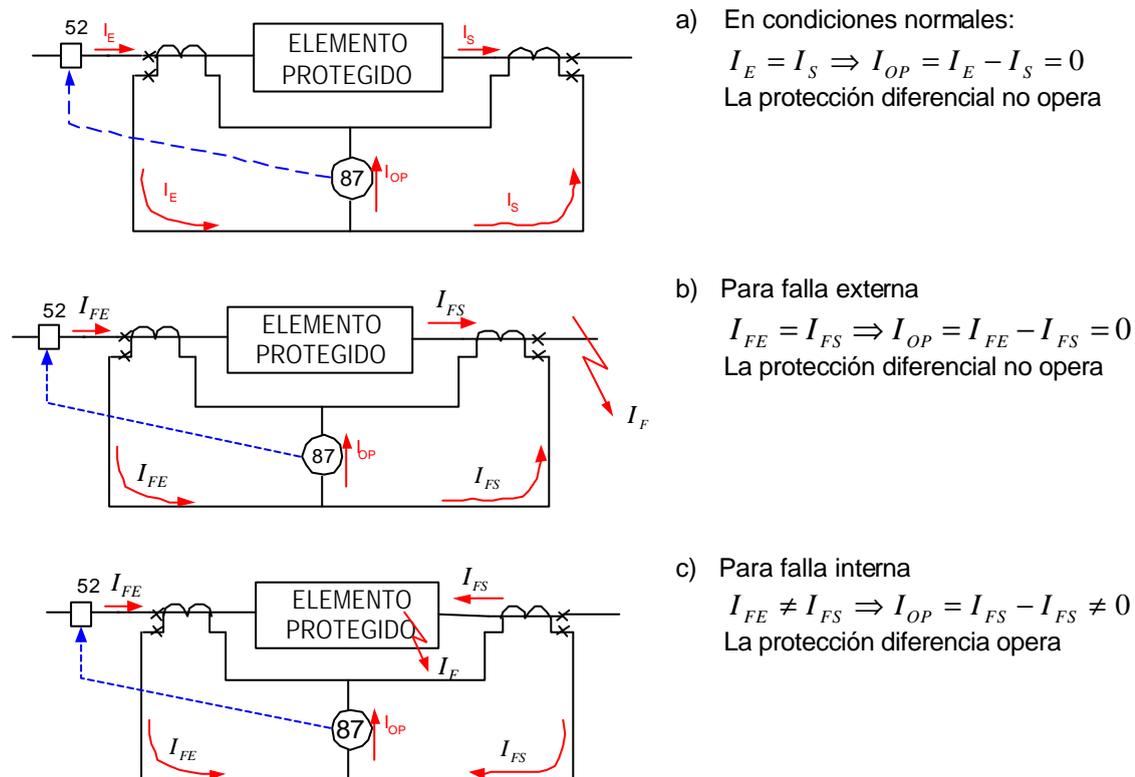


Figura N° 1.- Principio de operación de la protección diferencial

Mientras la corriente que circula a través del elemento protegido permanece invariante, tanto en magnitud como en fase, las corrientes de los secundarios de los CT'S no son exactamente iguales, por lo tanto habrá circulado constantemente una pequeña corriente por el relé 87 en condiciones normales de operación y en condiciones de fallas externa. Si esta pequeña corriente circulante excede de un valor predeterminado, habrá orden de operación al interruptor asociado (52), para que despeje la condición de falla.

Un relé diferencial porcentual tiene una característica de operación de manera que disminuye su sensibilidad a medida que la corriente aumenta. Esta característica provee de cierta seguridad contra falsas operaciones debido a fallas externas a su zona de operación. La corriente de operación ($I_{op} = I_{EF} - I_{SF}$) debe exceder la magnitud de la corriente de retención ($I_E + I_S$) para que el relé opere. Este porcentaje es ajustable sobre un amplio rango, dependiendo de las magnitudes de las corrientes secundarias de los CT's.

Dado que este tipo de protección es inherentemente selectivo, puede ser generalmente usado para la protección de todo elemento de un SEP; excepto para la protección de líneas de transmisión y distribución. Esta limitación es debido a la distancia requerida entre los CT's. Esta distancia limite es del orden de los 320 mts. (1000 pies), y depende de la exactitud de los CT's bajo la carga impuesta por la longitud de las conexiones secundarias.

Protección diferencial de transformadores de poder

A. Generalidades

Este tipo de protección es particularmente complicada cuando se aplica a transformadores, y esto se debe a:

- a.1. Las corrientes de una misma fase, en lado de alta tensión y baja tensión, están desfasadas dependiendo del tipo de conexión del transformador
- a.2. Las magnitudes están en relación inversa a la razón del transformador (magnitudes diferentes).
- a.3. Las razones normalizadas de los transformadores de medida, no siempre permiten obtener valores secundarios de corrientes de iguales magnitudes por comparar.
- a.4. La protección no debe ser afectada por posibles cambios Tap's, ni por su funcionamiento vacío.
- a.5. La corriente que toma un transformador en el instante de su excitación (Inrush) tiene un régimen transiente, cuyo comportamiento depende del valor instantáneo de la tensión para el cual se conecta el circuito.

La corriente de inrush es de 8 a 10 veces la corriente nominal, dependiendo de:

- Tamaño del banco de condensadores
 - Tamaño del SEP
 - Resistencia desde la fuente al transformador
 - Tipo de fierro usado en el núcleo
 - Flujo remanente
 - Instante en que el transformador es energizado
- a.6. Si el transformador es de 2 ó 3 bobinados por fase o un autotransformador.
 - a.7. Conexión de los bobinados del transformador

B. Tipos de relés diferenciales para la protección de transformadores de poder.

- b.1. Protección diferencial para transformadores de poder de los devanados por fase.

En la figura N°2 se muestra un circuito unilineal donde se destaca la conexión de un relé diferencial. En la práctica un relé diferencial por fase, conectados a los secundarios de un juego de transformadores (TT/CC) en conexión inversa a la correspondiente del transformador de poder, de manera que se anule el desfasamiento de las corrientes de una misma fase y de este modo se evite la operación para F1Ö-T externas, caso que se analizará más adelante.

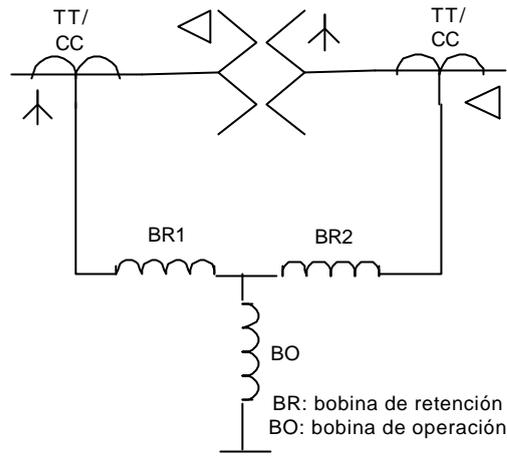


Figura Nº2 Unilíneal Prot. Diferencial

Por otra parte, con el fin de solucionar problemas de diferencia de magnitudes de las corrientes secundarias por comparar y con cambios de la razón de transformación del transformador de poder, se utilizan relés con:

- Diferentes tantos por cientos de sensibilidad, por ejemplo: 15, 25, 40 y/o 50%.
- Con diferentes números de vuelta en su embobinado de retención (TAP) (figura Nº3), de modo que, aunque las corrientes en comparación no sean iguales, el relé opere con el mismo tanto por ciento de sensibilidad, siempre que la razón de estas sea igual a la razón de los TAPS correspondientes, independientemente del sentido del flujo de potencia.
- En caso de no tener TAP's se debe equilibrar las magnitudes de las corrientes mediante la utilización de autotransformadores auxiliares de varias razones.

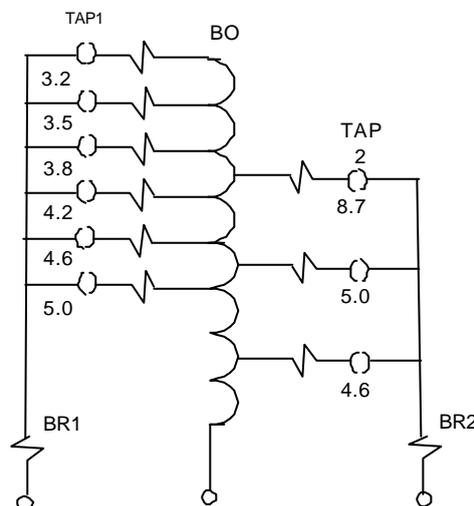
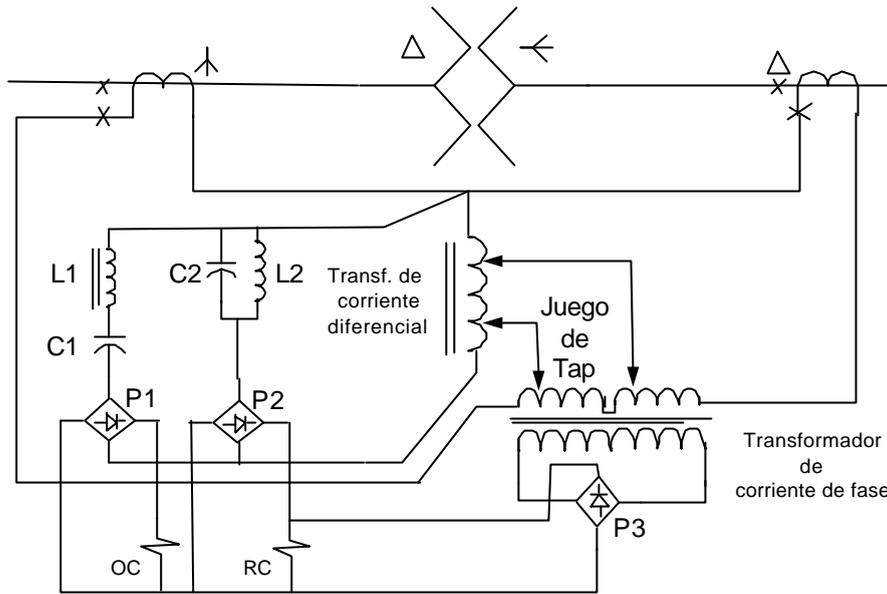


Figura Nº4.- Esquema de bobinados de retención de un relé diferencial

b.2. Relés diferenciales con retención de armónicas (figura). Estos relés son del tipo disco de inducción, los cuales se aplican a transformadores de 8 a 15 MVA, porque es preciso insensibilizarlo en el instante de la excitación de otra manera operaría con la corriente inrush. Como solución a este problema se ha desarrollado el relé diferencial con retención de armónicas, cuyo esquema simplificado se muestra en la figura.



C₁L₁- Filtro que solo deja pasar la componente fundamental de la corriente, la cual es rectificadas (P₁) aplicada a la bobina de operación. (O.C.)

C₂L₂- Filtro que solo deja circular las armónicas de la corriente, las cuales son rectificadas (P₂) y aplicadas a la bobina de retención. (RC).

Figura N°5.- Diferencial con Retención de Armónicas

De esta manera es posible que no opere para la corriente inrush y con esto hacer el relé tan rápido como sea posible (0.02 a 0.03 seg.)

b.3. Relés diferenciales para transformadores de tres devanados por fase.

En este caso las corrientes no están en fase, pero los mismos valores escalares de corrientes, siempre la corriente diferencial tiene la misma magnitud. En casos que el flujo de potencia entre por dos de los bobinados, entonces debe usarse relés diferenciales con tres bobinas de retención.

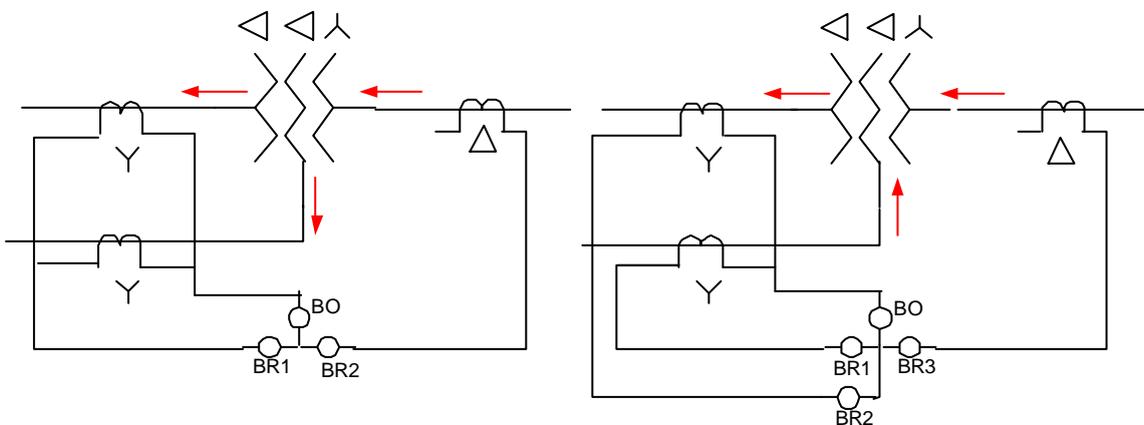


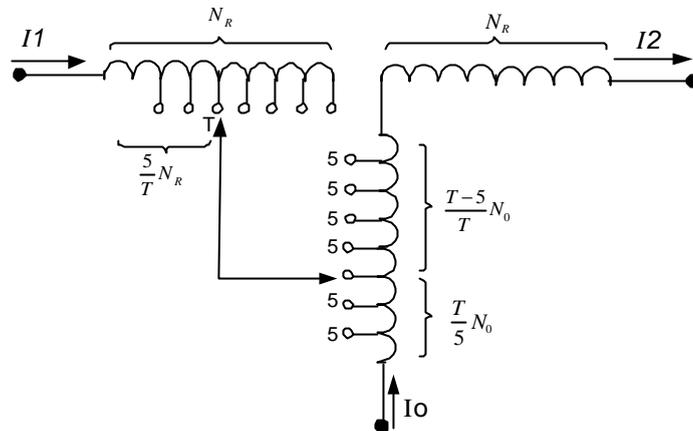
Figura N°6 Protección diferencial para transformadores de tres devanados por fase

b.4. Compensación de las magnitudes de las corrientes por comparar: Sistema Whestinghouse para los relés tipo C.A.

Para que no haya operación del relé debe cumplirse que: $I_1 - I_2 = Id = 0$, o bien Id debe mantenerse en un valor inferior a cierta tolerancia.

Esto se logra mediante la elección adecuada de TAP's del relé.

Para que no opere debe cumplirse que: $F_{ret} > F_{op}$ donde F es fuerza proporcional a los ampres-vueltas (NI)



$$\frac{5}{T}N_R I_1 + I_2 \left(\frac{T-5}{T}N_0 + N_R \right) \geq \frac{5}{T}N_0 I_d = \frac{5}{T}N_0 (I_1 - I_2)$$

$$N_R \left(\frac{5}{T}I_1 + I_2 \right) \geq N_0 \left(\frac{5}{T}I_1 - I_2 \right)$$

$$\frac{N_R}{N_0} \geq \frac{\frac{5}{T}I_1 - I_2}{\frac{5}{T}I_1 + I_2} \Rightarrow \frac{2N_R}{N_0 - N_R} \geq \frac{\frac{5}{T}I_1 - I_2}{I_2}$$

donde a $\frac{2N_R}{N_0 - N_R}$ se le denomina gradiente o sensibilidad del relé diferencia porcentual. Esto significa que para que haya operación, se debe cumplir que:

a) Sí $\frac{5}{T}I_1 > I_2 \rightarrow \frac{\frac{5}{T}I_1 - I_2}{I_2} \geq$ gradiente o sensibilidad (0/1)

b) Sí $\frac{5}{T}I_1 < I_2 \rightarrow \frac{I_2 - \frac{5}{T}I_1}{\frac{5}{T}I_1} \geq$ gradiente o sensibilidad (0/1)

En estos tipos de relés se dispone de las siguientes sensibilidades 15%, 25% y 40%; y taps 5-5; 5-5.5; 5-6; 5-6.6; 5-7.3; 5-8; 5-9; 5-10.

b.5. Característica de operación de los relés diferenciales. Suponiendo que se escoge el tap 5 (T=5); esto implica que se toma o se ocupa el 100% de N_0 y N_R .

b.6. Aspectos generales de la conexión de las protecciones diferenciales de transformadores de poder. Para realizar el proyecto de conexiones de una protección diferencial se debe considerar básicamente dos premisas.

I.- Que en condiciones normales, el torque diferencial debe ser nulo, es decir, $I_d \approx 0$. Si I_d no es igual cero, entonces debe anularse con el TAPs del relé, o bien, con autotransformadores externos.

Por ejemplo: Tap 5-5 y sensibilidad G%

Si $I_1 > I_2$ entonces:

$$\frac{I_1 - I_2}{I_2} > G\%$$

$$I_1 > I_2(G\% + 1)$$

Si $I_1 < I_2$ entonces:

$$\frac{I_2 - I_1}{I_1} > G\%$$

$$I_2 > I_1(G\% + 1)$$

Un segundo caso en que se escoge Tap 10-5 y una sensibilidad de 50% (G)

$$\text{Sí } \frac{5}{10}I_1 > I_2 \Rightarrow \frac{\frac{5}{10}I_1 - I_2}{I_2} \geq 0.5 \Rightarrow I_1 \geq 3I_2$$

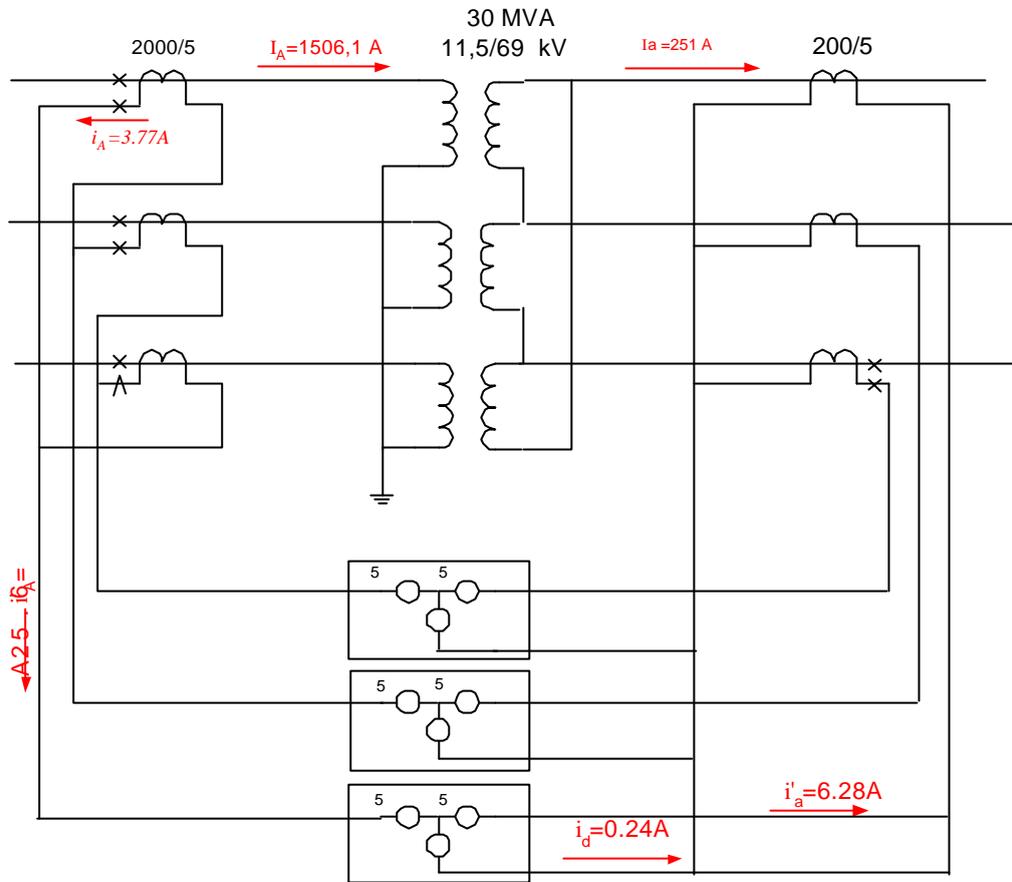
$$\text{Sí } \frac{5}{10}I_1 < I_2 \Rightarrow \frac{I_2 - \frac{5}{10}I_1}{\frac{5}{10}I_1} \geq 0.5 \Rightarrow I_2 \geq \frac{3}{4}I_1$$

II.- Que para fallas exteriores de cualquier tipo, el relé no opere. Para esto se debe tener en cuenta la conexión de los bobinados.

Fasorialmente debe satisfacer que $I_1 = I_2 + I_d$ y en condiciones normales que $I_1 = I_2$, ya que $I_d \approx 0$

TT/CC	TRANSFORMADOR DE PODER	TT/CC
	 	
	 	
	 	
	 	

b.7. Un ejemplo de conexión y calibración aplicada a un transformador Y d1 de 30 MVA, 11.5/69 KV.



1) Determinación de conexiones

	11.5 kV	69 kV
Corrientes primarias		
Corrientes secundarias		

2) Determinación de la razón de transformadores de corrientes.

$$\text{Corriente nominal en 69 kV : } I_{NS} = \left(\frac{30}{\sqrt{3} \cdot 69} \right) = 251 \text{ amp.} = I_a = I_b = I_c$$

$$\text{Corriente nominal en 11.5 kV: } I_{NP} = \left(\frac{30}{\sqrt{3} \cdot 11.5} \right) = 1506 \text{ amp.} = I_A = I_B = I_C$$

$$\text{TT/CC del lado de 11,5 kV: } CT_1 = \frac{2000}{5} \text{ conectados en triángulo}$$

Las corrientes secundarias:

$$i_A = \frac{1506}{2000} \cdot 5 = 3.77 \text{ amp.} = i'_A = 3.77\sqrt{3} = 6.52 \text{ amp.}$$

$$i'_A = \frac{I_a}{CT_2} = i_A \Rightarrow CT_2 = \frac{I_a}{i'_A} = \frac{251}{6.52} \cdot \frac{5}{5} = 192 \cdot \frac{5}{5} \rightarrow CT_2 = \frac{200}{5}$$

$$\text{luego } i'_a = \frac{251}{200} \cdot 5 = 6.28 \text{ amp.}$$

Si se escoge un tap 5-5, la sensibilidad adecuada para que no haya operación debe ser :

$$I_1 = 6.52$$

$$I_2 = 6.28$$

$$\frac{5}{T} I_1 > T_2 (\text{si } T = 5) \Rightarrow \frac{5 \cdot 6.52 - 6.28}{6.28} = 0.04 (4\%)$$

Por lo que debe, si T = 5, escogerse una sensibilidad de 15% o superior.

Supóngase que los CT's se escogen o determinan de acuerdo a las corrientes nominales.

$$CT_1 = \frac{2000}{5} \text{ y } CT_2 = \frac{300}{5} \text{ entonces las corrientes secundarias serán esta vez: } i_A = 3.77A \Rightarrow i'_A = 6.52A$$

$$i'_a = \frac{251}{300} \cdot 5 = 4.18A$$

Si se mantiene el Tap 5-5, entonces: $\frac{6.52 - 4.18}{4.18} = 50\% > 40\%$ que es la sensibilidad máxima del relé, por

consecuencia, el esquema de protección diferencial con esta calibración ¡OPERA en condiciones normales!. Es decir, dicho de otra manera, en condiciones normales la sensibilidad requerida para que no haya operación es superior a la sensibilidad máxima disponible en este tipo de relé; luego, hay operación indebida.

Deben ajustarse las magnitudes de las corrientes a comparar, mediante TAP adecuado.

$$\text{Por ejemplo } T = 6 = \frac{5}{6} \cdot 6.52 > 4.18 = \frac{5 \cdot 6.52 - 4.18}{4.18} \approx 30\% < 40\% \text{ ¡OK! ,}$$

con esta calibración no opera en condiciones normales, se puede decir que está bien, pero lo ideal es escoger la sensibilidad mínima permisible por, ejemplo:

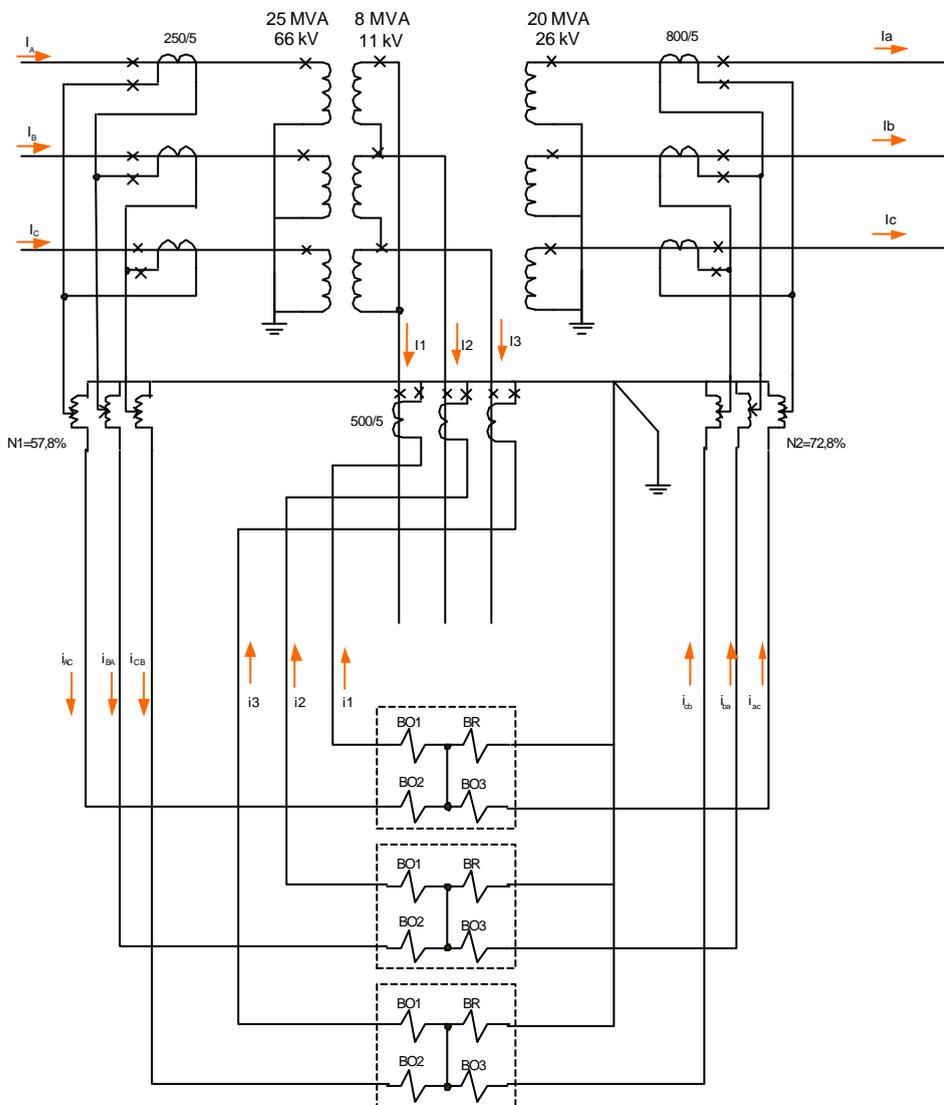
$$T = 7.3 = \frac{5}{7.3} 6.52 < 4.18 = \frac{4.18 - \frac{5}{7.3} 6.52}{\frac{5}{7.3} 6.52} \approx 7\%$$

Luego la calibración final sería: **T = 7.3** y una sensibilidad de **15%**

b.8. Diagrama elemental de corrientes de un transformador de 3 devanadas, conexión. Y_0Dy_0

En este caso se usa un relé tipo CA-4 de tres devanadas de retención y uno de operación o diferencial. En este caso se deben balancear las corrientes mediante autotransformadores.

APLICACIÓN DE PROTECCION DIFERENCIAL DE TRANSFORMADORES



Paso 66 kV (Y)

26 kV (Y)

11 kV ()

1.- Se suponen que circulan 25 MVA por el banco, la corriente en cada bobinado será:

$$I_{NH} = \frac{25 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 66} = 219 \text{ A} \quad I_{NM} = \frac{25 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 26} = 556 \text{ A} \quad I_{NL} = \frac{25 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 11} = 1314 \text{ A}$$

2.- Suponiendo las siguientes razones de los TT/CC:

$$TC_H = 250/5 = 50 \quad TC_M = 800/5 = 160 \quad TC_L = 1500/5 = 300$$

3.- Las corrientes secundarias de los TT/CC

$$\frac{I_{NH}}{TC_H} = \frac{219}{50} = 4.38 \text{ A} \quad \frac{I_{NM}}{TC_M} = \frac{556}{160} = 3.475 \text{ A} \quad \frac{I_{NL}}{TC_L} = \frac{1314}{300} = 4.38 \text{ A}$$

4.- Corrientes entrantes en los relés (I_R):

$$I_{RH} = \sqrt{3} \cdot 4.38 = 7.577 \text{ A} \quad I_{RM} = \sqrt{3} \cdot 3.475 = 6.012 \text{ A} \quad I_{RL} = 4.38 \text{ A}$$

5.- La razón entre las corrientes son:

$$\frac{I_{RH}}{I_{RM}} = \frac{7.577}{6.012} = 1.26 \quad \frac{I_{RM}}{I_{RL}} = \frac{6.012}{4.38} = 1.373 \quad \frac{I_{RH}}{I_{RL}} = \frac{7.577}{4.38} = 1.73$$

6.- Calibración de un relé Tipo CA-26.

Este relé tiene los siguientes Taps: **5-5; 5-5.5; 5-6.6; 5-7.3; 5-8; 5-9; 5-10**

Escogiendo una razón 5-5, se tiene que:

$$M_{HM} = \frac{\frac{I_{RH}}{I_{RM}} - \frac{T_H}{T_M}}{\min\left(\frac{I_{RH}}{I_{RM}}, \frac{T_H}{T_M}\right)} = \frac{(1.26 - 1)}{1} = 0.26 \quad (26\%)$$

$$M_{ML} = \frac{\frac{I_{RM}}{I_{RL}} - \frac{T_M}{T_L}}{\min\left(\frac{I_{RM}}{I_{RL}}, \frac{T_M}{T_L}\right)} = \frac{(1.373 - 1)}{1} = 0.373 \quad (37.3\%)$$

$$M_{HL} = \frac{\frac{I_{RH}}{I_{RL}} - \frac{T_H}{T_L}}{\min\left(\frac{I_{RH}}{I_{RL}}, \frac{T_H}{T_L}\right)} = \frac{(1.73 - 1)}{1} = 0.73 \quad (73\%)$$

Se observa que M_{HL} es mayor que cualquier gradiente de este tipo de relé (>50%). Será necesario equilibrar la magnitud de las corrientes mediante la instalación de autotransformadores en los lados H y M.

Para el lado de 66 kV: $4.38/7.577=0.578$ (N1=57.8%)

Par el lado de 26 kV: $4.38/6.012=0.728$ (N2=72.8%)

Por consiguiente las corrientes entrantes a los relés serán:

$$7.577 \cdot 0.578 = 4.395 \text{ A} \quad \text{y} \quad 6.012 \cdot 0.728 = 4.389 \text{ A}$$

Recalculando los ajustes:

$$M_{HM} = \frac{\frac{I_{RH}}{I_{RM}} - \frac{T_H}{T_M}}{\min\left(\frac{I_{RH}}{I_{RM}}, \frac{T_H}{T_M}\right)} = \frac{\left(\frac{4.395}{4.389} - 1\right)}{1} = 0.001 \quad (0.1\%)$$

$$M_{ML} = \frac{\frac{I_{RM}}{I_{RL}} - \frac{T_M}{T_L}}{\min\left(\frac{I_{RM}}{I_{RL}}, \frac{T_M}{T_L}\right)} = \frac{\left(\frac{4.389}{4.38} - 1\right)}{1} = 0.002 \quad (0.2\%)$$

$$M_{HL} = \frac{\frac{I_{RH}}{I_{RL}} - \frac{T_H}{T_L}}{\min\left(\frac{I_{RH}}{I_{RL}}, \frac{T_H}{T_L}\right)} = \frac{\left(\frac{4.395}{4.38} - 1\right)}{1} = 0.003 \quad (0.3\%)$$

b.9. Relés de protección diferencial de transformadores tipo HU y HU1 Westinghouse.

El HU se usa para la protección diferencial de transformadores de dos devanados por fase; mientras que el relé HU1 es para transformadores de tres devanados por fase. Los relés de la General Electric BDD son equivalentes a los HU que son de lata velocidad con retención por 2ª armónica.

Los TAP's disponibles o propios de estos relés son:

2.9 – 3.2 – 3.5 – 3.8 – 4.2 – 4.6 – 5.0 – 8.7

Aplicación: En el ejemplo anterior, si se usa el relé HU1, sin autotransformador, se selecciona el TAP adecuado, en lo posible el más cercano inferior al mayor valor de máximo de corriente del relé. Con esto se logra mayor sensibilidad.

Los Taps de estos relés son: 2.9, 3.2, 3.5, 3.8, 4.2, 4.6, 5.0 y 8.7. Las razones entre estos taps se pueden arreglar en una tabla, de la siguiente forma:

	2.9	3.2	3.5	3.8	4.2	4.6	5.0	8.7
2.9	1.0	1.0103	1.207	1.31	1.448	1.586	1.724	3.0
3.2		1.0	1.094	1.188	1.313	1.438	1.563	2.719
3.5			1.0	1.086	1.20	1.314	1.429	2.486
3.8				1.0	1.105	1.211	1.316	2.289
4.2					1.0	1.095	1.19	2.071
4.6						1.0	1.087	1.890
5.0							1.0	1.740
8.7								1.0

Se parte de la razón más alta entre las corrientes calculadas, en este caso será $\frac{I_{RH}}{I_{RL}} = 1.73$, el taps más cercano, según la tabla, es la razón 5.0/2.9=1.724; por consiguiente se escogen los taps de manera que

$T_H=5.0$ y $T_L=2.9$. En seguida se procede a la selección de la segunda razón más alta, en este caso es $\frac{I_{RM}}{I_{RL}} = 1.373$, con $T_L=2.9$ ya especificado, la razón más cercana es $3.8/2.9=1.31$, por consiguiente $T_M=3.8$

Calculando los errores para este caso, ahora serán:

$$M_{HM} = \frac{\frac{I_{RH}}{I_{RM}} - \frac{T_H}{T_M}}{\min\left(\frac{I_{RH}}{I_{RM}}, \frac{T_H}{T_M}\right)} = \frac{\left(\frac{7.577}{6.012} - \frac{5}{3.8}\right)}{1.26} = 0.044 \quad (4.4\%)$$

$$M_{ML} = \frac{\frac{I_{RM}}{I_{RL}} - \frac{T_M}{T_L}}{\min\left(\frac{I_{RM}}{I_{RL}}, \frac{T_M}{T_L}\right)} = \frac{\left(\frac{6.012}{4.38} - \frac{3.8}{2.9}\right)}{1.31} = 0.048 \quad (4.8\%)$$

$$M_{HL} = \frac{\frac{I_{RH}}{I_{RL}} - \frac{T_H}{T_L}}{\min\left(\frac{I_{RH}}{I_{RL}}, \frac{T_H}{T_L}\right)} = \frac{\left(\frac{7.577}{4.38} - \frac{5}{2.9}\right)}{1.72} = 0.003 \quad (0.3\%)$$

Las razones A% indican que los taps están elegidos adecuadamente (A% máx., permisible es de un 5%). Ningún otro tipo de calibración se requiere para los relés HU y HU1.

REFERENCIA: Whestinghouse Electric Corporation, Relay-Instrument Division "Applied Protective Relaying", Coral Spring, Florida 33060, USA

Relé Buchholz.

El relé Buchholz sed emplea en los transformadores de potencia que emplea aceite como medio refrigerante y tienen un conservador. Consiste en una cámara conectada en el lado superior del tramo del tubo que une el conservador de aceite con el tanque del transformador.

El principio de operación de este relé se basa en el hecho de que cualquier falla que se origina en el interior de un transformador está precedida por otro fenómeno a veces no perceptible, pero a medida de que ocurre el tiempo puede originar fallas incipientes y enviar señales de alarma, sin que sea necesario enviar una señal de desconexión, de manera de dejar fuera de servicio el transformador.

En efecto, la cámara posee dos flotadores cilíndricos, uno cerca de la parte superior y el otro opuesto al orificio del tubo que va al transformador. En condiciones normales, los flotadores están arriba, pero al ocurrir una falla que produzca burbujas de gas por la descomposición del aceite, éstas salen del transformador en dirección del conservador. Al llegar al relé, las burbujas son atrapadas y reducen el nivel de aceite en la cámara, haciendo que caiga el flotador superior. Generalmente esta caída es lenta, y cuando el flotador ha caído una cierta medida predeterminada, se cierran los contactos y genera una señal de advertencia. Sin embargo, si la falla es fuerte, el ascenso del gas y de aceite que va por el tubo al conservador arrastra el flotador inferior, con lo cual al cerrarse sus contactos da orden de apertura al interruptor de poder (52).

Las fallas más importantes que pueden ser detectadas por este relé son:

- a) Sobrecarga brusca o cortocircuitos internos
- b) Fallas de aislamiento a tierra
- c) Descomposición química de aceite.

Las ventajas principales del relé de Buschholz, radica en que indican las fallas entre espiras o calentamiento del núcleo y, con ello, permite que el transformador se pueda retirar de servicio antes de que ocurra un daño grave. Por otra parte, la desventaja es que no protege ,los cables de conexión, los cuales tienen que tener una protección adicional.

Otras protecciones que se ocupan en los transformadores de poder son los relés de **Sobre Presión** y el de **Sobre Presión Súbita**.