

D.II: Sistemas de protección de transformadores

Curso: Introducción a los Sistemas de Protección de Sistemas Eléctricos
de Potencia
IIE-Fing-UdelaR

Facultad de Ingeniería - UDELAR

Indice

1 Sobrecorriente direccional de fase y tierra

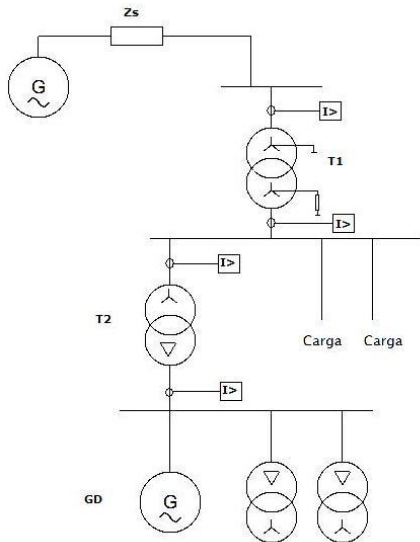
2 Protección diferencial

Consideraciones generales

Cuando utilizamos protecciones de sobrecorriente en transformadores de potencia, puede ocurrir que la protección necesite un elemento direccional para poder identificar la dirección de la falta.

Las protecciones de sobrecorriente direccionales pueden ser ajustadas más sensibles que los sobrecorriente no direccionales. Además, la coordinación se simplifica porque la dirección restringe la operación de la protección solo a una dirección.

SOBRECORRIENTE DIRECCIONAL DE FASE Y TIERRA



SOBRECORRIENTE DIRECCIONAL DE FASE Y TIERRA

Consideraciones generales

Las funciones de sobrecorriente, instantáneas y temporizadas, utilizadas en las protecciones de sobrecorriente direccionales son las mismas empleadas en las protecciones de sobrecorriente no direccionales.

Las protecciones direccionales solo operan para faltas en una sola dirección. Para lograr esto, hay que suministrarle a la protección una señal de referencia. Esta señal de referencia puede ser una corriente o una tensión o pueden ser ambas.

La direccionalidad habilita a la protección operar solo para faltas dentro de la zona protegida, lo cual le permite ser ajustada más sensible.

SOBRECORRIENTE DIRECCIONAL DE FASE Y TIERRA

Métodos utilizados para la direccionalidad

Hay dos métodos que se utiliza para proporcionar la direccionalidad en las protecciones de sobrecorriente:

Control direccional: La función de sobrecorriente no puede operar si la función direccional no ha operado, indicando que la falta es en la dirección de operación.

Sobrecorriente direccional: La protección tiene 2 contactos (lógicos) independientes, función de sobrecorriente y la función direccional, que se conectan en serie (AND). Los dos contactos deben estar cerrados para que la protección opere.

SOBRECORRIENTE DIRECCIONAL DE FASE Y TIERRA

Polarización

Para obtener la dirección de una falta, se compara el ángulo del fasor de una corriente de operación, que varía con la dirección de la falta, y el ángulo del fasor de otra señal del sistema que no depende de la ubicación de la falta. Esta señal se la conoce como **señal o magnitud de polarización**.

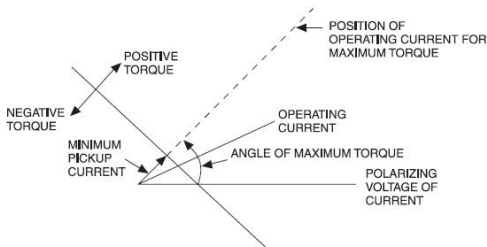
Para las funciones de fase: las magnitudes de polarización son las tensiones de fase o una combinación de ellas en donde está ubicada la protección.

Para las funciones de tierra: las magnitudes de polarización pueden ser magnitudes de secuencia negativa o magnitudes de secuencia cero. Generalmente se aplican las magnitudes de secuencia negativa cuando el acoplamiento de secuencia cero no permite distinguir la dirección.

SOBRECORRIENTE DIRECCIONAL DE FASE Y TIERRA

Característica de operación de un elemento direccional:

El máximo torque se produce cuando el ángulo de la corriente de operación y la tensión de polarización es igual al ángulo característico, ángulo de máxima sensibilidad o máximo torque.

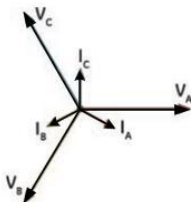


Characteristics of a directional element

Sobrecorriente direccional de fase

Polarización para funciones de fase

Durante condiciones de carga normal un transformador, los fasores de tensiones y corrientes están casi en fase (carga con alto consumo de potencia activa).



SOBRECORRIENTE DIRECCIONAL DE FASE

Aplicación:

Se debe aplicar una protección direccional temporizada de fase si la máxima corriente de falta hacia atrás es mayor que el valor de la corriente de sobrecarga normal del transformador, o el valor de la corriente de ajuste deseado.

Ajustes: Se aplican los mismos criterios que se aplican a las protecciones de sobrecorriente no direccionales.

ángulo característico: desfasaje que se aplica, conociendo la referencia de ángulos, a la tensión de polarización o la corriente de operación, para obtener la máxima sensibilidad. Depende de cada protección y es el resultado de los estudios de cortocircuitos en el transformador a proteger.

Sobrecorriente direccional de tierra

Polarización para funciones de tierra

Polarización por tensión de neutro: Para las faltas a tierra, la corriente de operación es la corriente de neutro ($I_n = 3I_0$). La tensión de neutro ($3V_0$) se puede usar como tensión de polarización, ya que siempre tiene la misma dirección independiente de la ubicación de la falta. Generalmente, se filtran los armónicos, por ej. 3° . Durante la operación normal del sistema de potencia, la tensión de neutro es 0.

SOBRECORRIENTE DIRECCIONAL DE TIERRA

Aplicación:

Se aplican las mismas reglas que se aplican para la protección de sobrecorriente direccional de fase.

Ajustes: Se aplican los mismos criterios que se aplican a las protecciones de sobrecorriente no direccionales.

ángulo característico: desfasaje que se aplica a la tensión de polarización para obtener la máxima sensibilidad. Depende de cada protección y es el resultado de los estudios de cortocircuitos en el transformador a proteger.

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.

PROTECCIÓN DIFERENCIAL

Introducción

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.

PROTECCIÓN DIFERENCIAL

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.

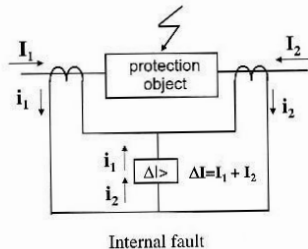
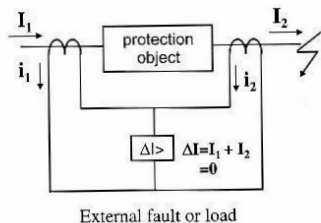
En cada caso la medida se basa en la ley de Kirchoff, la suma vectorial de las corrientes entrando o saliendo de un nodo debe ser cero en todo instante.

La convención es: la corriente entrando a la zona protegida es positiva, y la corriente saliendo de la zona protegida es negativa.

PROTECCIÓN DIFERENCIAL

Principio de operación

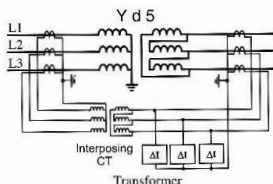
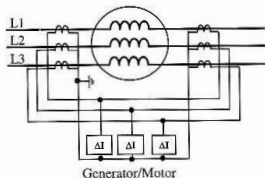
Es la forma más simple y común de aplicación de la función diferencial. El principio de medida se muestra en la siguiente figura:



PROTECCIÓN DIFERENCIAL

Principio de operación

Este principio de operación se utiliza en: líneas y cables de transmisión, 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

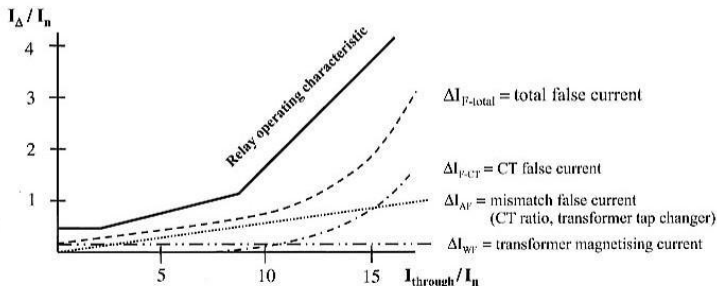
Protección diferencial por porcentaje (biased stabilized)

- 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 de transformación cambió.

PROTECCIÓN DIFERENCIAL

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

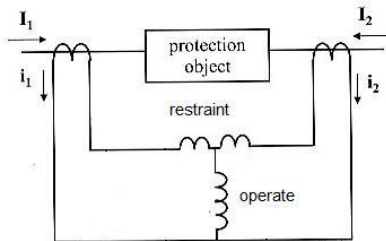
PROTECCIÓN DIFERENCIAL

Protección diferencial por porcentaje (biased stabilized)

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.

PROTECCIÓN DIFERENCIAL

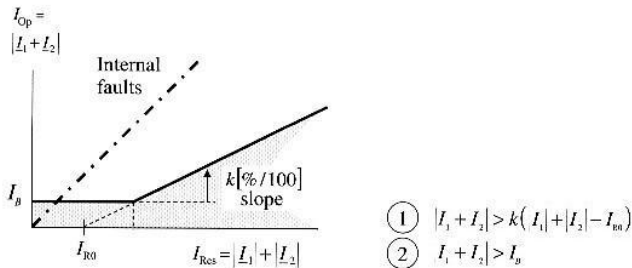
Protección diferencial por porcentaje (biased stabilized)



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.

PROTECCIÓN DIFERENCIAL

En la siguiente figura se muestra la característica de operación:



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

Protección diferencial

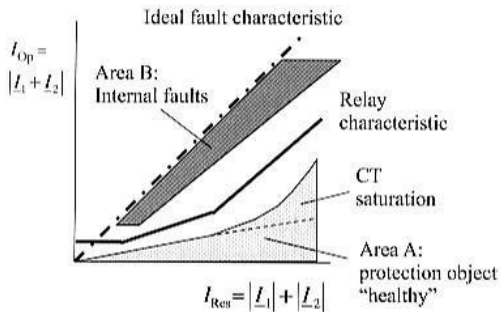
En la protección diferencial se pueden distinguir dos zonas:

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

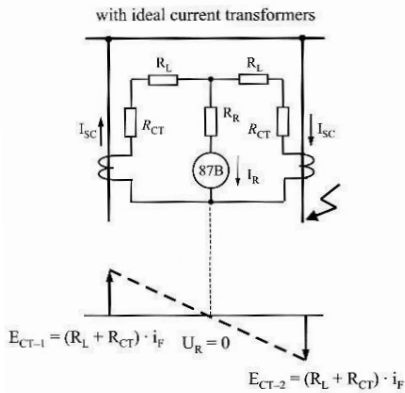


I_{Op}/I_{Res} -diagram of the differential protection

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.

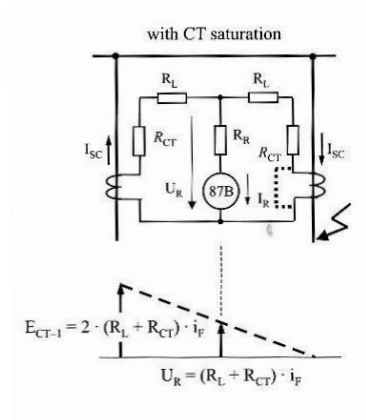
PROTECCIÓN DIFERENCIAL DE ALTA IMPEDANCIA

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: $U_R = i_F \cdot (R_L + R_{CT})$

⇒ 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:

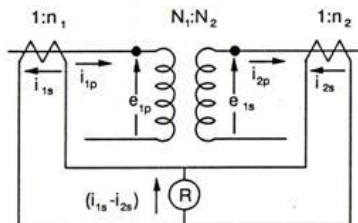
Los transformadores de corriente pueden saturar durante faltas internas, debido a la resistencia alta. Por lo cual, los transformadores de corrientes deben cumplir con ciertos requerimientos para que el relé pueda operar. Basado en la teoría, la tensión de saturación de los transformadores de corriente 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.

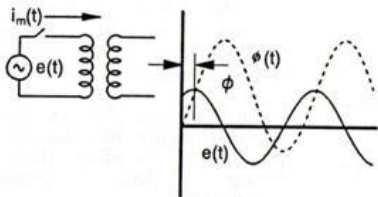
Este problema origina la aparición de armónicos, particularmente de orden 2, ya que la corriente magnetizante los contiene en alta proporción. Por lo tanto, mediante un filtro adecuado puede obtenerse una señal de restricción proporcional.

ENERGIZACIÓN

Consideramos la energización de un transformador sin carga, como se muestra en la siguiente figura. Sea la tensión de la fuente:

$$e(t) = E_{max} \cdot \cos(\omega t - \varphi)$$

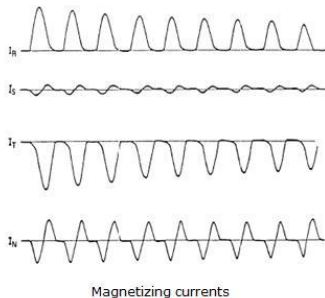
Si despreciamos las resistencias en el circuito, el flujo en el núcleo del transformador está dado por: $\phi(t) = \phi_{max} \cdot \text{sen}(\omega t - \varphi) + \phi_{max} \cdot \text{sen}\varphi$



Transformer core flux linkages upon energization at angle ϕ from maximum

ENERGIZACIÓN

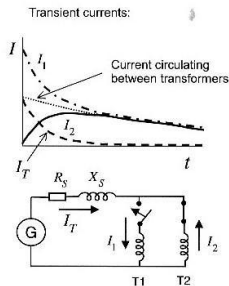
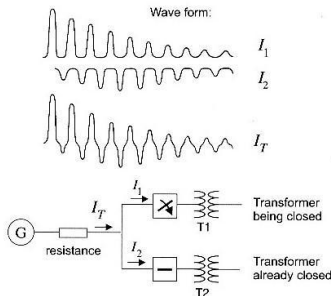
En la figura se muestra la forma de onda típica de la corriente de magnetización en cada fase y por el neutro. La corriente de magnetización tiene un contenido alto de armónicos.



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

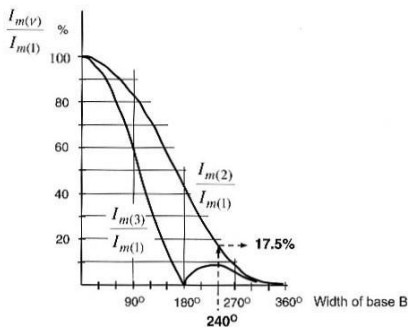
Bloqueo frente a las energizaciones

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.

ENERGIZACIÓN

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: $\frac{I_{m(2)}}{I_{m(1)}}$ supera cierto valor de ajuste.

Componente de armónicos en la corriente de energización:



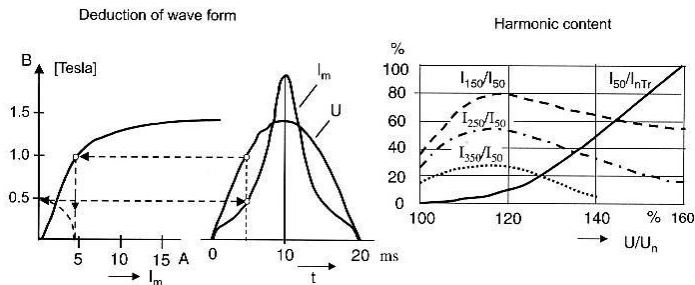
Harmonic content of in-rush current

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.

SOBREEXCITACIÓN

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: $\frac{I_{250Hz}}{I_{50Hz}}$ 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 desfase 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.

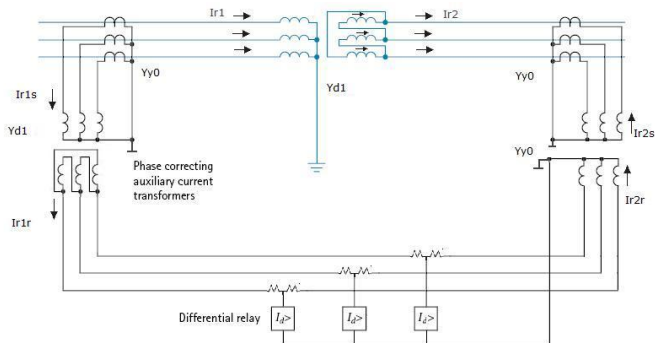
En los relés numéricos, se realiza mediante ajustes en el relé.

Desfasaje:

Para compensar el desfase de corrientes en transformadores Y_d , 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.

TRANSFORMADOR TRIFÁSICO DE DOS ARROLLAMIENTOS:

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 de 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.

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:

- $I_{rele}(69kV) = 251 \frac{5}{250} = 5,02A$
- $I_{rele}(11,5kV) = 1506 \frac{5}{1500} = 5,02A \times \sqrt{3} = 8,69$
- $\Rightarrow$ 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:

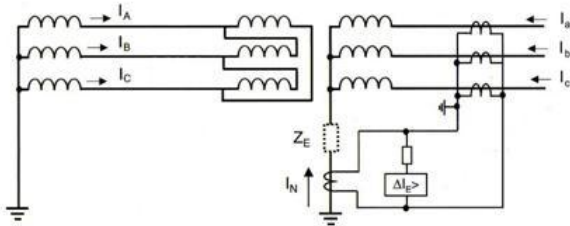
El ajuste de la pendiente de los relés diferenciales se lleva a cabo con el objetivo de asegurar que no habrá una operación incorrecta debido a las diferencias en las corrientes de las bobinas de restricción causado por las relaciones de los transformadores de corriente y la operación de los cambios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

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.