



Universidad Nacional Experimental Politécnica

“Antonio José de Sucre”

Vice-Rectorado de Puerto Ordaz

Departamento de Ingeniería Eléctrica

Sistemas de Protecciones

PROTECCIÓN DE TRANSFORMADORES

Prof.:

MSc. Alexander Valecillos

Estudiantes:

-Ginnari Carlo

-Estee Yuliannys

-Marrero Geraldo

-Moya Jackson

-Vera Reina

CIUDAD GUAYANA, ABRIL DEL 2019

INDICE

	pp.
INTRODUCCION.....	3
PROTECCION DE TRANSFORMADORES.....	5
1. Protección contra Sobrecorriente.....	7
1.1. Protección con fusibles.....	7
1.2. Relés de sobrecorriente de retardo de tiempo.....	10
1.3. Relés instantáneos.....	11
2. Porcentaje de Protección Diferencia.....	12
3. Error de corrientes Diferencial.....	5
4. Supervisión de relés Diferenciales.....	5
5. Protección de Transformador Trifásico.....	5
6. Protección Voltios-por-Hertz.....	7
7. Protección No Eléctrica.....	9
8. Ejercicio.....	
CONCLUSIONES.....	25

INTRODUCCION

El desarrollo de los modernos Sistemas de Potencia se ha reflejado en los avances en el diseño de los transformadores. Esto ha resultado en una amplia gama de transformadores con potencias que van desde unos cuantos kVA a varios cientos de MVA que están disponibles para su uso en una amplia variedad de aplicaciones.

Los transformadores de potencia constituyen el enlace imprescindible entre los diferentes niveles de tensión de un sistema de potencia y por ello son los que deben ofrecer mayor seguridad en cuanto a la posibilidad de falla.

Su construcción es relativamente simple y son componentes de la red confiables. Es decir, la incidencia numérica de perturbaciones originadas en los transformadores es en general baja, por lo menos si se la compara con aquella de las líneas de Transmisión.

Sin embargo, el grado de confiabilidad está íntimamente relacionado con su montaje, con la forma en que se opere el transformador, con su mantenimiento preventivo y con la eficacia de sus protecciones.

Lo más importante en cuanto al mantenimiento preventivo es el análisis del aceite tanto de la cuba como del conmutador bajo carga.

Los transformadores cuyos arrollamientos están sumergidos en aceite y tienen tanque de expansión, están dotados de relés que detectan formación lenta de gases dentro de la cuba, además de protecciones que detectan variaciones de magnitudes eléctricas. Esa posibilidad es sumamente importante, ya que esto permite un cierto grado de prevención de fallas de desarrollo violento, sumamente destructivas.

La eficacia de las protecciones no es solamente importante para minimizar los daños originados por las fallas en el propio transformador,

sino también para evitar que lo afecten las perturbaciones de origen externo.

Las consideraciones para un paquete de protección de transformador varían según la aplicación y la importancia del transformador. Para reducir los efectos del estrés térmico y fuerzas electrodinámicas, es recomendable asegurarse de que el paquete de protección utilizado minimice el tiempo de desconexión en el caso de ocurrir una falla producida dentro del transformador.

Los pequeños transformadores de distribución pueden protegerse satisfactoriamente, desde el punto de vista técnico y económico, mediante el uso de fusibles o relés de sobrecorriente. Esto resulta en una protección temporizada debido a los requisitos de coordinación con equipos que se encuentran aguas abajo. Sin embargo, el despeje de falla temporizado es inaceptable en transformadores de gran potencia utilizados en aplicaciones de generación, transmisión y distribución, debido a consideraciones de la operación, estabilidad del sistema y el costo de reparación, tiempo de indisponibilidad.

PROTECCIÓN DE TRANSFORMADORES

Las características inherentes de los transformadores de potencia introducen una serie de problemas únicos que no están presentes en la protección de líneas de transmisión, generadores, motores u otros aparatos de sistemas de alimentación. Las fallas del transformador, es decir, los cortocircuitos, son el resultado de fallas eléctricas internas, la más común es la falla de fase a tierra. Algo menos común son las fallas de vuelta a vuelta. A diferencia de una línea de transmisión, la extensión física de un transformador se limita a una subestación y, por consiguiente, la retransmisión diferencial, la forma de protección más deseable disponible, se puede usar para proteger los transformadores. En general, un transformador puede estar protegido por fusibles, relés de sobrecorriente, relés diferenciales y relés de presión, y puede ser monitoreado para detectar problemas incipientes con la ayuda de las mediciones de temperatura del devanado y el análisis químico del gas sobre el aceite aislante. Cuál de estos se utilizará en una instancia determinada depende de varios factores, como se explica a continuación.

- Tamaño del transformador. Los transformadores con una capacidad inferior a 2500 kVA suelen estar protegidos por fusibles. Con clasificaciones entre 2500 y 5000 kVA, el transformador puede estar protegido con fusibles, pero los relés de sobrecorriente instantáneos y de retardo de tiempo pueden ser más deseables del punto de vista de sensibilidad y coordinación con relés de protección en los lados alto y bajo del transformador. Entre 5000 y 10 000 kVA, generalmente se aplica un relé de sobrecorriente de disco de inducción conectado en una configuración diferencial. Por encima de 10MVA, se recomienda una restricción armónica, porcentaje de relé diferencial. Los relés de presión y temperatura también se aplican generalmente con este tamaño de transformador.

- Ubicación y función. Además del tamaño del transformador, la decisión con respecto a la aplicación de protección específica se ve afectada significativamente por la consideración de la importancia del transformador dentro de la red eléctrica. Si el transformador es una parte integral del sistema de energía a granel, probablemente requerirá relés más sofisticados en términos de diseño y redundancia. Si se trata de un transformador reductor de la estación de distribución, un relé diferencial único y una copia de seguridad de sobrecorriente generalmente serán suficientes. Si el transformador está cerca de una fuente de generación, la alta relación X / R de la ruta de falla requerirá relés de restricción armónica para acomodar las corrientes de entrada magnéticas más altas.

- Voltaje. En general, los voltajes más altos requieren dispositivos de protección más sofisticados y costosos, debido al efecto perjudicial de la eliminación de fallas en el rendimiento del sistema y al alto costo de la reparación del transformador.

- Conexión y Diseño. Los esquemas de protección variarán considerablemente entre los autotransformadores y los transformadores de dos o tres devanados. La conexión del devanado de un transformador trifásico, ya sea delta o en estrella, hará una diferencia en el esquema de protección elegido. También es importante la presencia de devanados terciarios, el tipo de conexión a tierra utilizado, cambiadores de tap o devanados de desplazamiento de fase.

A medida que desarrollamos ideas de protección para transformadores en este capítulo, también comentamos la influencia de estos y otros factores en los sistemas de retransmisión elegidos.

1. Protección Contra Sobrecorriente

Como en todas las aplicaciones de protección con relés de sobrecorriente, las fallas externas o las corrientes de carga de estado estable deben distinguirse de las corrientes producidas por las fallas internas. El efecto de las fallas externas que no se eliminan rápidamente, o las cargas pesadas de estado estable, es sobrecalentar los devanados del transformador y degradar el aislamiento. Esto hará que el transformador sea vulnerable a los flashovers internos. La protección de los transformadores contra fallas internas puede ser proporcionada por relés de sobrecorriente con retardo de tiempo. El efecto de una falla interna sostenida es la formación de arco, el posible incendio y las fuerzas magnéticas y mecánicas que causan daños estructurales en los devanados, el tanque o los casquillos, con el consiguiente peligro para el personal o el equipo circundante. La protección para los transformadores puede proporcionarse mediante fusibles de lado alto, relés de sobrecorriente instantáneos y de retardo de tiempo o relés diferenciales.

1.1. Protección con fusibles

Como se mencionó anteriormente, los fusibles no se utilizan para proteger a los transformadores con clasificaciones superiores a 2.5MVA. La filosofía básica utilizada en la selección de fusibles para el lado de alto voltaje de un transformador de potencia es similar a la utilizada en otras aplicaciones de fusibles. Claramente, la capacidad de interrupción del fusible debe exceder la corriente máxima de cortocircuito a la que se pedirá la interrupción del fusible. La calificación continua del fusible debe exceder la carga máxima del transformador. Por lo general, la calificación del fusible debe ser superior al 150% de la carga máxima. La característica de fusión mínima de un fusible indica que el fusible se dañará si se obtienen condiciones a la derecha de (mayor que) la característica. La característica de fusión mínima del fusible debe

coordinar con (es decir, debe estar bien separada de) los dispositivos de protección en el lado inferior del transformador de potencia. Al considerar la coordinación, se deben tener en cuenta los factores de temperatura ambiente, carga previa y ajuste del recierre. Todos estos

Los factores influyen en el calentamiento previo del fusible y hacen que se derrita en momentos diferentes a los que indican las especificaciones de un fusible "frío". El ejemplo 1 proporciona una explicación adicional de este procedimiento. También está claro que la corriente de magnetización del transformador no debe causar daños al fusible. Esto requiere una corriente de mayor duración que debe ser más baja que la característica de fusión mínima. La "relación de velocidad" del fusible se define como la relación entre los valores mínimos de corriente de fusión en dos tiempos muy separados: por ejemplo, 0,1 y 100 s. Una relación de velocidad menor significaría una característica más inclinada, y para un grado adecuado de coordinación, tal fusible tendría que configurarse con una sensibilidad menor. Es deseable tener un fusible con el mayor índice de velocidad posible. Finalmente, si se usa un fusible limitador de corriente, los pararrayos en el lado de la línea del fusible deben tener una clasificación igual o superior a las sobretensiones que puede crear el fusible, para evitar que el pararrayos destelle debido a El funcionamiento del fusible.

Ejemplo 1

Considere el transformador que se muestra en la Figura 1. Tiene un devanado delta del lado alto y un devanado en estrella de lado bajo. Consideraremos la selección del fusible en el lado alto. Debe coordinarse con la protección del alimentador del lado bajo, que se supone que es un fusible, con la característica "B" como se muestra. Se supone que todas las corrientes se dan en términos del lado secundario, aunque un fusible

estará en el lado alto, y las corrientes reales en ese fusible serán más pequeñas por el factor de relación de vueltas del transformador.

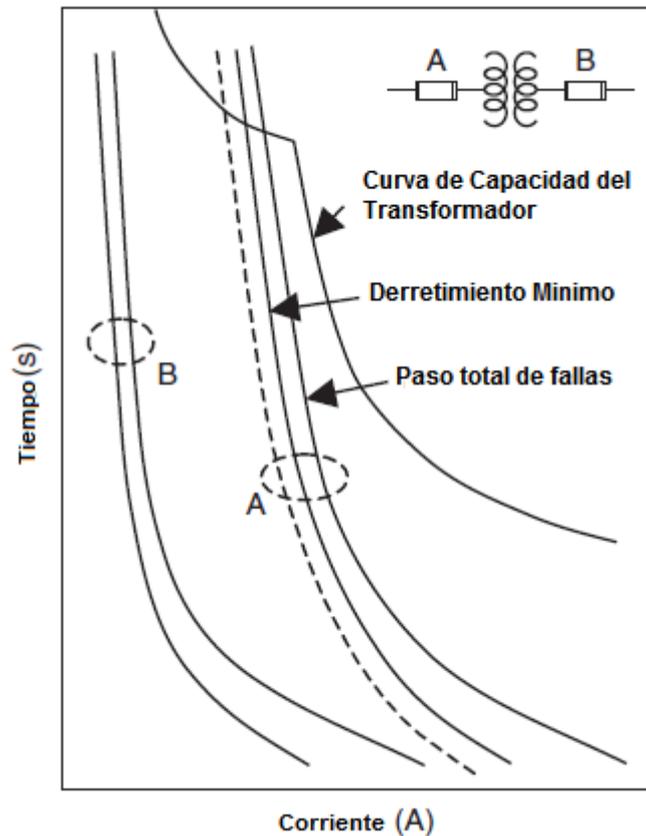


Figura 1. Protección de un transformador a fusible: principios de coordinación.

La característica "A" tiene variabilidad, debido a la carga previa, la temperatura ambiente y la sincronización de los reconectores, como lo muestra la línea de puntos en su grupo de características. El fusible corriente abajo, con la característica "B", debe tener un margen de coordinación suficiente con la característica de puntos en el grupo "A". El fusible del lado alto también debe coordinar con la curva de capacidad de cortocircuito del transformador que está tratando de proteger. Se debe tener en cuenta que la capacidad del transformador no es un asunto fácil

de definir y, a menudo, la curva de capacidad es un compuesto de varios segmentos obtenidos de diferentes criterios.

1.2. Relés de sobrecorriente de retardo de tiempo.

La protección contra sobrecargas excesivas, o fallas externas persistentes, es proporcionada por los relés de sobrecorriente de temporización de reproducción. La configuración de recogida suele ser el 115% de la sobrecarga máxima aceptable. Este margen cubre la incertidumbre en los transformadores de corriente (CT), los relés y su calibración. Los relés de sobrecorriente de retardo de tiempo deben coordinarse con los dispositivos de protección del lado bajo. Estos pueden incluir relés de bus de bajo voltaje para fallas de fase a fase, relés de fase-direccionales en transformadores paralelos y los temporizadores de relé de fallo de interruptor en los interruptores de bajo voltaje. Estas consideraciones se ilustran en el siguiente ejemplo.

Ejemplo 2

Considere el transformador que se muestra en la Figura 2. Tiene una potencia nominal de 2.5MVA, con voltajes primarios y secundarios de 13.8 y 2.4 kV, respectivamente. Por lo tanto, la corriente de carga completa para el primario es 104.6A y 600A para el secundario. Asumamos una capacidad de sobrecarga de 1.2 pu o 720A en el devanado secundario. La relación CT debe seleccionarse para producir cerca de 5A cuando la corriente secundaria es 600 A. Seleccione una relación CT de 600: 5 o 120: 1. La activación del relé debe configurarse al 115% de 720 A, o a 828A primario, que es $828/120 = 6.9$ A secundario. Seleccione el grifo más cercano, digamos 7.0A. Como se muestra en la Figura 2, el indicador de tiempo seleccionado para el relé debe coordinar con los relés de sobrecorriente Rab y Rac, que protegen los alimentadores en el lado de baja tensión. Si se utiliza un relé de fallo de

interruptor para el interruptor Bab o Bac, el relé también debe coordinar con esos retrasos.

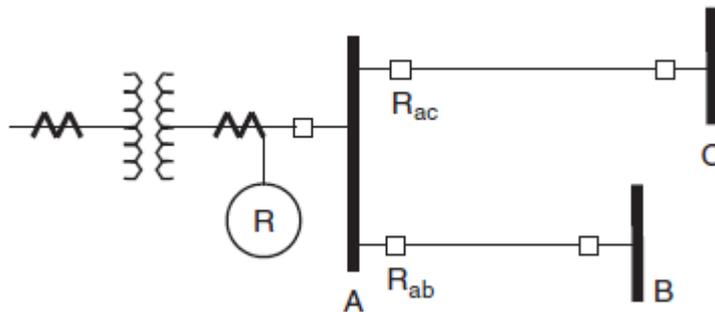


Figura 2 Coordinación del relé de sobrecorriente del transformador con protección del alimentador en el lado bajo.

1.3. Relés instantáneos

Hay varias restricciones impuestas sobre el uso de relés instantáneos; Algunos de ellos dependen del diseño del relé. En todos los casos, por supuesto, el relé no debe operar en el arranque o en fallas del lado bajo. La corriente de magnetización máxima en un transformador puede ser tan alta como 8 a 10 veces la corriente máxima de carga máxima. Dado que el relé verá fallas en el lado bajo, uno debe considerar estas fallas cuando están completamente compensadas. Algunos diseños de relé, por ejemplo, relés electromecánicos de tipo émbolo, responden al valor instantáneo real de la corriente, que incluye el desplazamiento de CC. Dicho relé debe establecerse por encima de las corrientes de falla del lado bajo con compensación de CC completa. Los relés de tipo disco responden solo a la porción de CA de la onda actual. Los relés de estado sólido o basado en computadora pueden o no responder al desplazamiento de CC, dependiendo de su diseño.

2. Porcentaje de protección diferencial

Considere el transformador de potencia monofásico de dos devanados que se muestra en la Figura 3. Durante el funcionamiento normal del transformador, la suma algebraica de los giros en amperios de los devanados primario y secundario debe ser igual a la fuerza magnetomotriz (MMF) requerida a

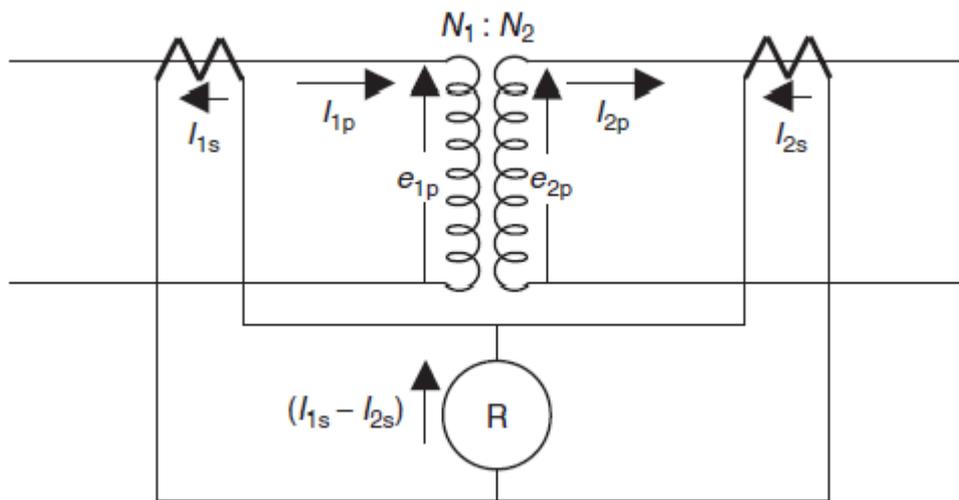


Figura 3. Conexiones de relé diferenciales.

Configurar el flujo de trabajo en el núcleo del transformador. Debido al espacio de aire muy pequeño en el núcleo del transformador, el MMF es despreciable (a menudo menos del 0.5% del MMF producido por la corriente de carga), y por lo tanto para un transformador de potencia normal

$$N_1 i_{1p} = N_2 i_{2p} \quad (1)$$

Si utilizamos CT con relaciones de giro de 1: n1 y 1: n2 en los lados primario y secundario, respectivamente, en condiciones normales, las corrientes en los devanados secundarios de los CT están relacionadas por

$$N_1 n_1 i_{1s} = N_2 n_2 i_{2s} \quad (2)$$

Si seleccionamos los CT de manera adecuada, podemos hacer que $N_1n_1 = N_2n_2$, y luego, para un transformador normal, $i_1s = i_2s$. Sin embargo, si se desarrolla una falla interna, esta condición ya no se cumple, y la diferencia de i_1s y i_2s es mucho mayor; de hecho, es proporcional a la corriente de falla. La corriente diferencial

$$I_d = i_1s - i_2s \quad (3)$$

Proporciona una medida altamente sensible de la corriente de falla. Si se conecta un relé de sobrecorriente como se muestra en la Figura 3, proporcionará una excelente protección para el transformador de potencia. Se deben considerar varios aspectos prácticos antes de poder implementar un relé diferencial viable [1]. Primero, puede que no sea posible obtener las proporciones de CT en el lado primario y secundario que satisfagan la condición $N_1n_1 = N_2n_2$, ya que debemos seleccionar CT con proporciones estándar. El problema se ve aliviado de alguna manera por el hecho de que la mayoría de los relés proporcionan diferentes posiciones de toma para cada una de las entradas de CT al relé, por lo que, en efecto, proporcionan CT auxiliares que pueden corregir cualquier desviación de las relaciones deseadas. Un procedimiento un tanto menos deseable es usar CT auxiliares para lograr el mismo objetivo. En cualquier caso, incluso con estos ajustes, sigue habiendo un desajuste de relación residual, lo que conduce a una pequeña identificación de corriente diferencial en condiciones normales. En segundo lugar, los errores de transformación de los dos CT pueden diferir entre sí, lo que lleva a una corriente diferencial significativa cuando hay un flujo de carga normal o un fallo externo. Finalmente, si el transformador de potencia está equipado con un cambiador de tomas, introducirá un cambio en la relación del transformador principal cuando se cambien las tomas. Estos tres efectos hacen que una corriente diferencial fluya en el relé de sobrecorriente, y el diseño del relé debe acomodar estas corrientes diferenciales sin causar un disparo. Dado que cada una

de estas causas conduce a una corriente diferencial que es proporcional a la corriente real que fluye en los devanados primario y secundario del transformador, un relé de porcentaje diferencial proporciona una excelente solución a este problema. En un relé de porcentaje diferencial, la corriente diferencial debe exceder un porcentaje fijo de la corriente "de paso" en el transformador. La corriente de paso se define como el promedio de las corrientes primarias y secundarias:

$$I_r = \frac{i_{1s} + i_{2s}}{2} \quad (4)$$

La corriente I_r se conoce como corriente de restricción, un nombre que proviene del diseño del relé electromecánico, donde esta corriente produjo un par de restricción en el disco en movimiento, mientras que la corriente diferencial produjo el par de operación. El relé funciona cuando:

$$I_d \geq K I_r \quad (5)$$

donde K es la pendiente del porcentaje diferencial característico. K generalmente se expresa como un valor porcentual: típicamente 10%, 20% y 40%. Claramente, un relé con una pendiente del 10% es mucho más sensible que un relé con una pendiente del 40%. Aunque hemos utilizado símbolos en minúsculas para las corrientes, lo que significa los valores instantáneos, debe quedar claro que las relaciones correspondientes existen también entre los valores de la raíz cuadrada media (rms) de las corrientes. Por lo tanto, las ecuaciones 1-5 también se aplican a las corrientes rms.

En la Figura 4 se muestra una práctica característica diferencial de porcentaje. La pendiente del relé determina la zona de disparo. Se muestran las tres fuentes de corriente diferencial durante el funcionamiento normal del transformador, al igual que el margen de seguridad utilizado para llegar a la pendiente. El relé tiene una configuración de corriente de activación pequeña, es decir, el relé no

funciona a menos que la corriente diferencial esté por encima de este valor de activación. El ajuste de activación generalmente se establece muy bajo: los valores típicos son 0.25A secundarios. Esto explica cualquier error de CT residual a valores bajos de la corriente de carga del transformador.

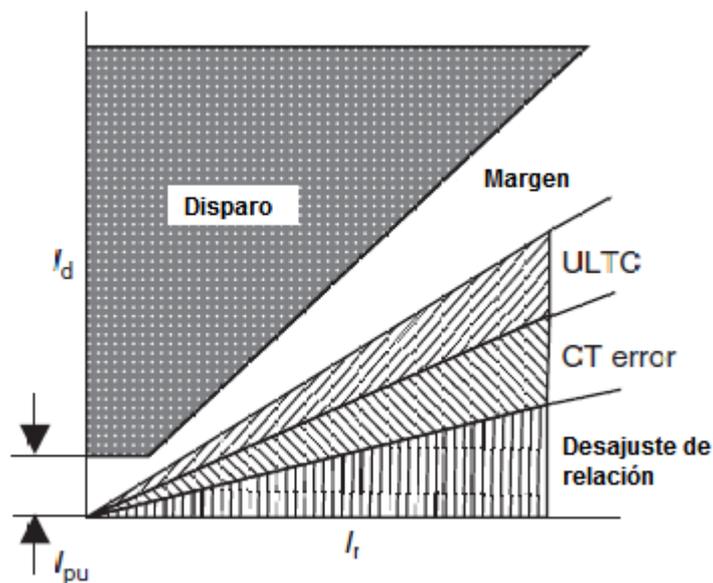


Figura 4. Característica del relé diferencial porcentual.

Ejemplo 3

Un transformador monofásico tiene una potencia nominal de 69/110 kV, 20MVA. Debe estar protegido por un relé diferencial, con tomas de entrada de 3.0, 4.0, 4.5, 4.8, 4.9, 5.0, 5.1, 5.2, 5.5A secundario. El transformador tiene un cambiador de tomas bajo carga (ULTC) con una relación de vueltas de -5% a $+5\%$ en pasos de $5/88\%$. Especifique los CT, la configuración de activación y el porcentaje de pendiente diferencial para el relé. Las pendientes disponibles son 10%, 20% y 40%. ¿Cuál es el nivel de corriente de falla para un transformador descargado, para el cual el relé diferencial no funcionará?

Las corrientes en el primario y el secundario para la carga nominal son 289.8 y 181.8 A, respectivamente. Podemos seleccionar relaciones de TC de 300: 5 y 200: 5 para los dos lados. Estos producirán $289.8 \times 5/300 = 4.83$ A, y $181.8 \times 5/200 = 4.54$ A en los dos secundarios de CT. Para reducir el desajuste entre estas corrientes, podemos usar la toma de relé de 4.8 para el CT en el lado primario y la toma de relé de 4.5 para el CT en el lado secundario. Esto nos dará un valor de $4.83 / 4.8$, o 1.0062×5 A, y $4.54 / 4.5$, o 1.009×5 A en las bobinas del relé. Por lo tanto, la corriente diferencial en el relé debido a la falta de coincidencia de la relación de CT ascendería a $(1.009 - 1.006)$ pu, o aproximadamente el 0.3%. El cambiador de tomas cambiará la relación del transformador principal en un 5%, cuando esté en su posición de toma extrema. Por lo tanto, una corriente diferencial total de 5.3% resultaría de estas dos causas. Si no hay información disponible sobre errores de TC desiguales, debemos hacer los supuestos apropiados, de modo que podamos seleccionar una pendiente porcentual adecuada para la característica del relé. Suponiendo que los CT sean del tipo 10CXXX, podemos esperar un error máximo de menos del 10% en cada uno de los CT. Por lo tanto, es razonable suponer que los errores en los dos CT no diferirán entre sí en más del 10% en todas las condiciones de falla. Esto da una corriente diferencial neta de 15.3% para la falla externa más grande, mientras que el cambiador de tomas está en su posición más alejada. Con un margen de seguridad de aproximadamente el 5%, por lo tanto, podemos seleccionar una pendiente diferencial del 20% para el relé.

Para la configuración de recogida, podemos seleccionar la configuración más ligera disponible. Un valor disponible típico es 0.25 A. Si hubiera un devanado terciario sin CT disponibles en el transformador principal, encontraríamos la contribución a la corriente diferencial de su corriente de carga nominal, ya que no estaría disponible para el relé, y luego seleccione un ajuste de activación por encima de esa corriente.

Con un ajuste de activación de 0.25A, la corriente primaria en el lado de 69 kV será $(300/5) \times (4.8 / 5) \times 0.25$, o 14.4 A. Una falla en el lado de 69 kV produciendo corrientes más pequeñas que esto no será visto por este relevo.

3. Causas de falsas corrientes diferenciales

El porcentaje de relé diferencial descrito anteriormente se ocupa de los valores relativamente pequeños de corrientes diferenciales que fluyen en el relé durante condiciones normales de flujo de carga, o durante una falla externa Sin embargo, ciertos otros fenómenos causan una corriente diferencial sustancial para fluir, cuando no hay falla, y estas corrientes diferenciales falsas son generalmente suficientes para hacer que se dispare un relé de porcentaje diferencial, a menos que se tomen algunas precauciones especiales.

Todos estos fenómenos pueden rastrearse hasta las no linealidades en el núcleo del transformador, o en el CT core o en ambos. Ahora consideraremos los efectos de estas no linealidades.

Magnetización de la corriente de arranque durante la energización

Considere la activación de un transformador de potencia descargado como se muestra en la Figura 8.5. Como el interruptor está cerrado, la fuente de voltaje se aplica al transformador, y una corriente de magnetización se extrae de la fuente [1, 2]. Deja que la fuente de voltaje sea

$$e(t) = E_{\max} \cos(\omega t - \phi) \quad (.6)$$

Si descuidamos la resistencia, la fuente y la inductancia de fuga en el circuito, el flujo del núcleo del transformador están dados por:

$$\Lambda(t) = \Lambda_{\max} \sin(\omega t - \varphi) + \Lambda_{\max} \sin \varphi \quad (7)$$

Tenga en cuenta que los enlaces de flujo, y por lo tanto la corriente de magnetización, son continuos en $t = 0$, cuando el interruptor está cerrado. La ecuación 8.7 supone que no hay flujo remanente en el núcleo. Cualquier flujo remanente debe agregarse al lado derecho de esta ecuación.

En realidad, la inductancia magnetizante del transformador no es lineal. Considere los dos aproximación de la pendiente de una característica de magnetización que se muestra en la Figura 8.6a. Como el flujo los enlaces van por encima del punto de saturación de la rodilla, se extrae una corriente mucho más grande de la fuente.

La magnitud de esta corriente está determinada por la pendiente de la característica de magnetización en la región saturada, y por la inductancia de fuga del transformador. Es obvio que son posibles las corrientes de entrada de magnetización del orden de las corrientes de falla. Debido a la pérdidas en el circuito, la corriente de magnetización disminuirá a su valor nominal pequeño como se muestra en la figura 8.6b. Constantes de tiempo de varios segundos son comunes en la mayoría de las potencias modernas transformadores. Debe quedar claro que en la mayoría de los transformadores modernos son posibles corrientes de entrada muy grandes, dependiendo del instante de energización y del flujo remanente en el núcleo del transformador. Dado que la corriente de arranque solo fluye en el devanado primario y no en el secundario del

transformador, está claro que produce una corriente diferencial que es el 200% de la corriente de restricción y causaría una operación falsa.

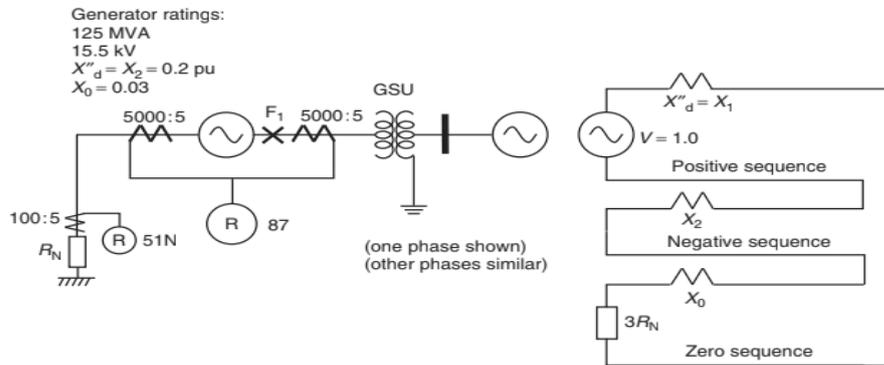


Figure 8.5 Transformer core flux linkages upon energization at angle φ from maximum

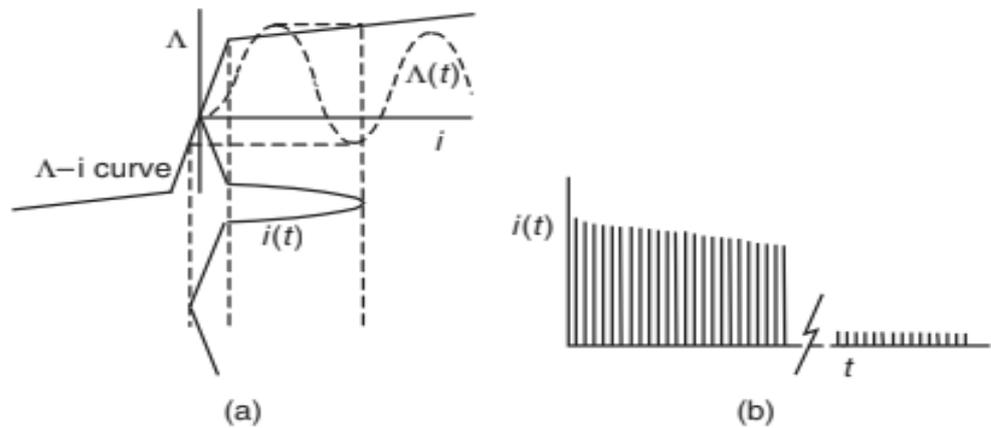


Figure 8.6 Magnetizing current during energization of a transformer

Contenido armónico de la corriente de irrupción

Como veremos en breve, la operación falsa de un relé de porcentaje diferencial para un transformador se evita aprovechando el hecho de que la corriente de entrada es rica en armónicos componentes, mientras que la corriente de falla es un componente de frecuencia fundamental pura (excepto para un posible componente de DC en descomposición). Calculemos los componentes armónicos de una típica forma de onda de corriente de arranque. Asumiremos una forma de onda simplificada para la corriente de entrada. Dejar la característica magnetizante será una línea vertical en el λ - I plano, y ser una línea recta con una pendiente finita en la región saturada. Esto hace que la forma de onda actual de la figura 8.6a Adquiera la forma que se muestra en la figura 8.7. El flujo en el núcleo está por encima de la rodilla de saturación punto para un lapso angular total de 2α radianes, y la corriente correspondiente es una porción de una onda sinusoidal. Para el resto del período, la corriente es cero. Aunque esto es un aproximación, está bastante cerca de una forma de onda de corriente de magnetización real. Podemos usar

Análisis de series de Fourier para calcular los armónicos de esta corriente. Considerar el origen a ser en el centro de un pulso de corriente, como se muestra en la Figura 8.7. Entonces, la expresión para el actual la forma de onda es

$$i(\theta) = I_m (\cos \theta - \cos \alpha) \quad 0 \leq \theta \leq \alpha, \quad (2\pi - \alpha) \leq \theta \leq 2\pi$$

$$i(\theta) = 0 \quad \alpha \leq \theta \leq (2\pi - \alpha) \quad (8.8)$$

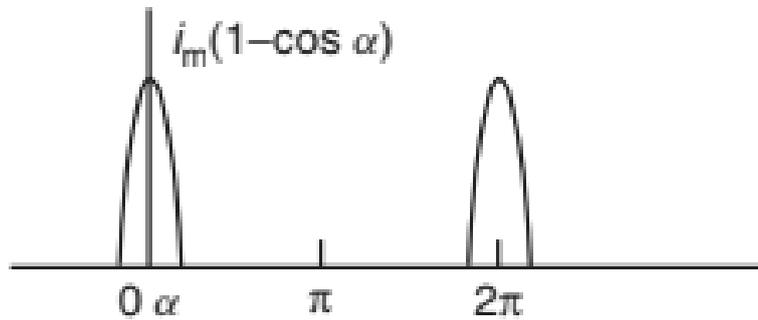


Figure 8.7 Idealized inrush current waveform

Dado que esta elección del origen da una forma de onda simétrica aproximadamente $\theta = 0$, podemos usar la Coseno de la serie de Fourier para la corriente. El armónico nth está dado por

$$\begin{aligned}
 a_n &= \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} i(\theta) \cos n\theta d\theta = \frac{2}{\pi} \int_0^{\alpha} i_m (\cos \theta \cos n\theta - \cos \alpha \cos n\theta) d\theta \\
 &= \frac{I_m}{\pi} \left[\frac{1}{n+1} \sin(n+1)\alpha + \frac{1}{n-1} \sin(n-1)\alpha - 2 \cos \alpha \frac{1}{n} \sin n\alpha \right] \quad (8.9)
 \end{aligned}$$

El pico de la onda actual es $I_m (1 - \cos \alpha)$, y el componente de frecuencia fundamental a_1 está dada por

$$a_1 = \frac{I_m}{\pi} \left[\alpha - \frac{1}{2} \sin 2\alpha \right] \quad (8.10)$$

La magnitud relativa de varios componentes armónicos con respecto a los fundamentales. El componente de frecuencia, calculado a partir de las ecuaciones 8.9 y 8.10, se tabula en la Tabla 8.1 hasta el 13º armónico, y para ángulos de saturación de 60°, 90° y 120°. Se debería notar que

cuando el ángulo de saturación es de 90° no hay presentes armónicos impares. Como el ángulo de la saturación aumenta, el contenido armónico disminuye: de hecho, si α se convierte en π , habrá no hay armónicos en absoluto. Sin embargo, en la mayoría de los casos, α es mucho menor que π , y una significativa cantidad de armónicos está presente en la corriente de entrada magnetizante. De todos los armónicos componentes, el segundo es, con mucho, el más fuerte.

Magnetización de la irrupción durante la eliminación de fallos

Cuando se produce una falla externa, pero cerca, del transformador, se elimina el transformador, las condiciones dentro del núcleo del transformador son muy similares a las de la magnetización del transformador [1, 3]. A medida que la tensión aplicada a los devanados del transformador salta de un valor bajo de falta predeterminada al valor normal (o mayor) posterior al fallo, los enlaces de flujo en el núcleo del transformador se ve forzado nuevamente a cambiar de un valor de pre-falla bajo a un valor cercano al normal. Dependiendo del momento en que se elimine la falla, la transición puede forzar un desplazamiento de CC en los enlaces de flujo, y se producirían formas de onda de corriente primaria similares a las encontradas durante la activación. Cabe señalar que, como no hay flujo remanente en el núcleo durante este proceso; el arranque es en general más pequeño que durante la activación del transformador, el núcleo del transformador se ve forzado nuevamente a cambiar de un valor de prefalla bajo a un valor cercano al normal. Dependiendo del momento en que se elimine la falla, la transición puede forzar un desplazamiento de CC en los enlaces de flujo, y se producirían formas de onda de corriente primaria similares a las encontradas durante la activación. Cabe señalar que, como no hay flujo remanente en el núcleo durante este proceso; el arranque es en general más pequeño que durante la activación del transformador.

Table 8.1 Harmonics of the magnetizing inrush current

Harmonic	a_n/a_1		
	$\alpha = 60^\circ$	$\alpha = 90^\circ$	$\alpha = 120^\circ$
2	0.705	0.424	0.171
3	0.352	0.000	0.086
4	0.070	0.085	0.017
5	0.070	0.000	0.017
6	0.080	0.036	0.019
7	0.025	0.000	0.006
8	0.025	0.029	0.006
9	0.035	0.000	0.008
10	0.013	0.013	0.003
11	0.013	0.000	0.003
12	0.020	0.009	0.005
13	0.008	0.000	0.002

Irrupción simpática

Este es un evento un tanto inusual, pero ocurre con bastante frecuencia y merece una mención. Considere un generador, conectado a un bus a través de una línea de transmisión que tiene una resistencia R y una inductancia L , como se muestra en la Figura 8.8a. El transformador $T1$ se energiza y el transformador $T2$ se energiza cerrando el interruptor B . A medida que el interruptor B se cierra, se establece una corriente de arranque en el devanado primario del transformador $T2$, y es suministrada por el generador.

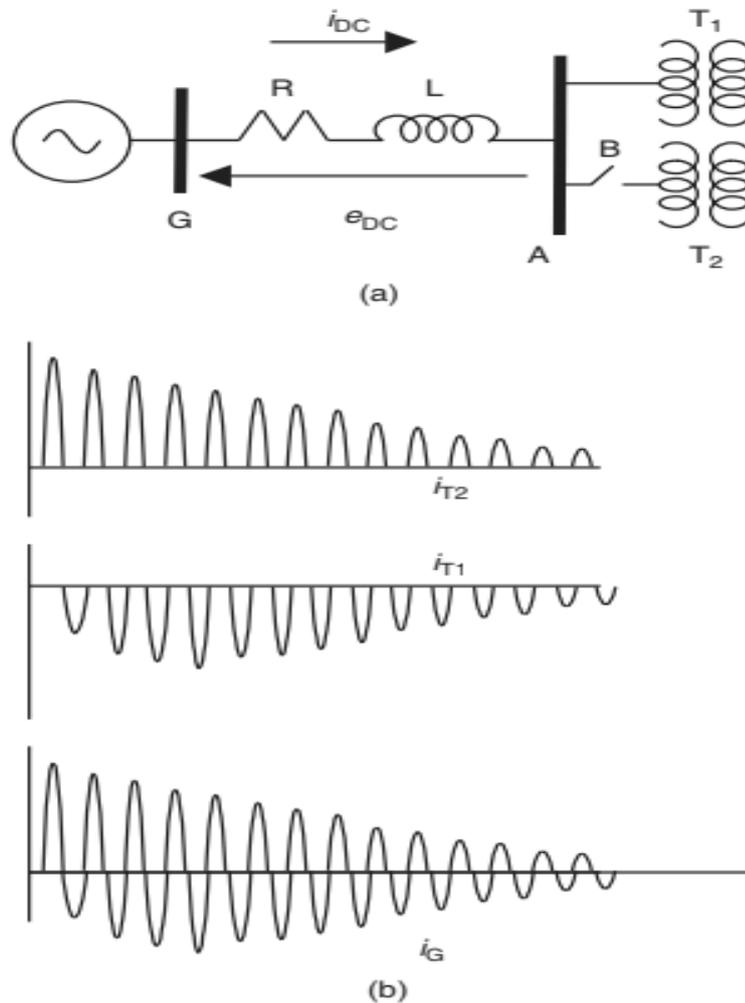


Figure 8.8 Sympathetic inrush current in parallel transformer banks

A través de la impedancia de la línea de transmisión. La corriente de entrada tiene un componente de CC, que se descompone con una constante de tiempo algo larga como se explicó anteriormente. Este componente de CC en decadencia produce una caída de voltaje en la resistencia de la línea de transmisión. La caída de voltaje de CC es de una polaridad como se muestra en la Figura 8.8a para un componente de CC positivo supuesto que fluye en la dirección mostrada. Dado que la

salida del generador es puramente de CA, y no puede verse afectada por esta caída de voltaje, está claro que el voltaje del bus A adquiere un componente de CC negativo. Esto resulta en un cambio negativo en los enlaces de flujo (integral del cambio de voltaje) de los dos núcleos del transformador. Como se asumió que el transformador T2 tenía un flujo de saturación en la dirección positiva (lo que llevó a la corriente de arranque como se muestra), el efecto de este cambio de flujo es sacar a T2 de la saturación, y causar una posible saturación de T1 en el negativo dirección. En consecuencia, la corriente de entrada en T2 disminuye con el tiempo, y la entrada en T1 aumenta en la dirección opuesta. Cuando los componentes de CC en las dos corrientes de entrada se vuelven iguales, no hay ningún componente de CC en la corriente en la línea de transmisión, pero puede haber componentes de CC en ambas corrientes de magnetización del transformador. La descomposición de este componente de CC “atrapado” puede ser bastante lento. El fenómeno que causa el flujo de arranque en un transformador previamente energizado, cuando se energiza un banco paralelo, se conoce como el arranque simpático. Las formas de onda actuales de un fenómeno típico de insolación simpática se ilustran en la Figura 8.8b. El remedio para el problema de protección planteado por las corrientes de entrada simpáticas se describe en la Sección 8.9.

Sobreexcitación del transformador

Durante el rechazo de carga y ciertas otras condiciones de operación, un transformador puede estar sujeto a una sobretensión de estado estable en su frecuencia nominal. Durante la sobreexcitación, el flujo del transformador permanece simétrico, pero entra en saturación durante períodos iguales en los semimedios positivos y negativos de la forma de onda. Esta condición se ilustra en la Figura 8.9. La expresión para la corriente en este caso está dada por

$$\left. \begin{aligned}
i(\theta) &= I_m(\cos \theta - \cos \alpha) & 0 \leq \theta \leq \alpha, (2\pi - \alpha) \leq \theta \leq 2\pi \\
&= 0 & \alpha \leq \theta \leq (\pi - \alpha), (\pi + \alpha) \leq \theta \leq (2\pi - \alpha) \\
&= I_m(\cos \theta + \cos \alpha) & (\pi - \alpha) \leq \theta \leq (\pi + \alpha)
\end{aligned} \right\} \quad (8.11)$$

Cuando se calcula la serie de Fourier de coseno para esta corriente, resulta que todos los armónicos pares son idénticamente cero. Los armónicos impares son el doble de los dados por la Ecuación 8.9, debido a las contribuciones del semiciclo negativo de la onda actual. Los ángulos de saturación en un transformador sobreexcitado son del orden de 10–30 °, lo que corresponde a un ángulo de 5–15 ° en la ecuación 8.9. Para ángulos de saturación tan pequeños, las proporciones armónicas son algo diferentes de las que se muestran en la Tabla 8.1. Por ejemplo, para $\alpha = 5^\circ$, los armónicos tercero y quinto son casi tan fuertes como el componente de frecuencia fundamental. Y, por supuesto, no hay un segundo armónico presente en esta forma de onda. Debe recordarse que hemos realizado aproximaciones significativas al calcular estos componentes armónicos: por ejemplo, hemos asumido una aproximación de dos líneas rectas a la característica de magnetización, y también hemos asumido que la característica insaturada tiene una pendiente infinita. En condiciones prácticas, las magnitudes armónicas tenderán a ser algo diferentes, aunque la tendencia general será la determinada aquí.

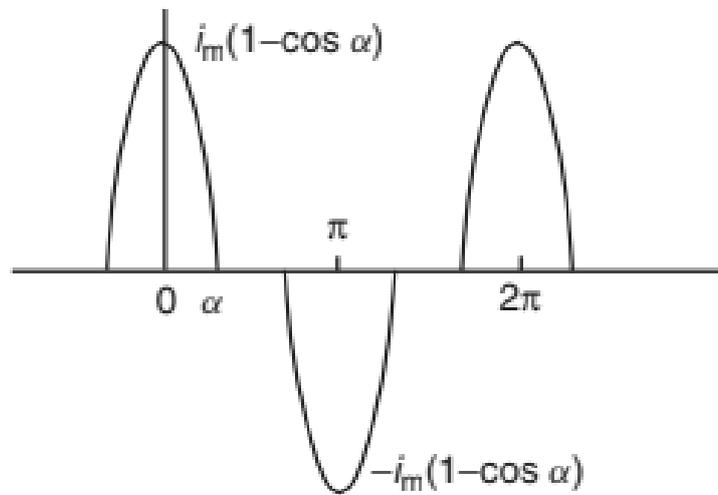


Figure 8.9 Magnetizing current during overexcitation

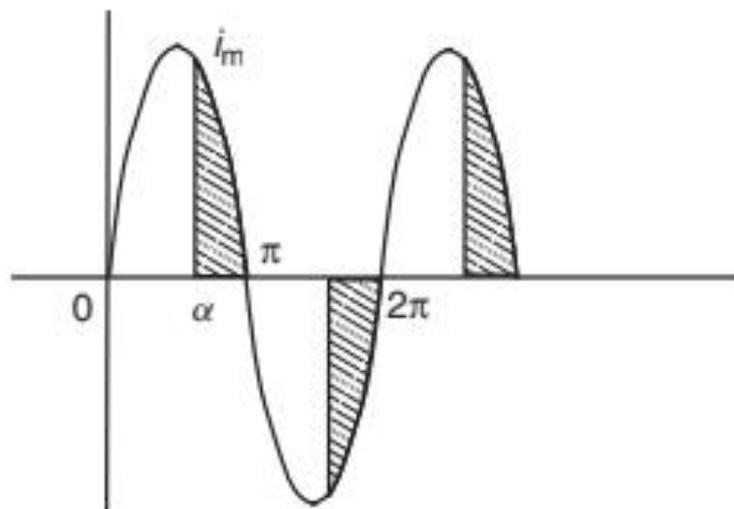


Figure 8.10 Current waveform during CT saturation

Saturación de TC

Para ciertas fallas externas, donde las corrientes de falla son grandes, es probable que uno de los CT se sature. (No haremos caso de la posibilidad de flujo de remanente de CT para la presente discusión). La forma de onda de la corriente resultante de ese devanado secundario de CT se muestra en la Figura 8.10. La corriente diferencial en el relé será igual al área sombreada, que es la diferencia entre la forma de onda de la corriente insaturada y la forma de onda de la corriente saturada. La ecuación para la forma de onda de la corriente sombreada es

$$\begin{aligned}
 i(\theta) &= 0 & 0 \leq \theta \leq (\pi - \alpha), \pi \leq \theta \leq (2\pi - \alpha) \\
 &= I_m \sin \theta & (\pi - \alpha) \leq \theta \leq \pi, (2\pi - \alpha) \leq \theta \leq 2\pi
 \end{aligned}
 \quad \left. \vphantom{\begin{aligned} i(\theta) \\ = I_m \sin \theta \end{aligned}} \right\} \quad (8.12)$$

Siendo esta una función impar de θ , una serie de sine Fourier sería apropiada para determinar su contenido armónico. Se deja como un ejercicio para que el lector muestre que esta forma de onda no contiene armónicos pares, y que hay un componente importante del tercer armónico en la corriente.

Relés diferenciales supervisados

El fenómeno de la corriente de entrada en los transformadores de gran potencia presentó un obstáculo insuperable al diseño del relé de porcentaje diferencial cuando se introdujo. Se introdujeron medidas para contrarrestar la tendencia del relé a dispararse en condiciones de irrupción. Una de las ideas más tempranas fue desensibilizar el relé diferencial cuando el transformador está energizado.

Por lo tanto, el relé menos sensible no vería la corriente de entrada, evitando así un falso disparo. Sin embargo, desensibilizar (o deshabilitar) el relé diferencial durante la energización es una mala práctica, ya que es precisamente durante la energización inicial del transformador, cuando el transformador se energiza por primera vez, o se puede haber completado algún trabajo de reparación en el transformador, El transformador necesita protección. Esto es para asegurar que el trabajo de reparación se haya completado con éxito y que no se hayan dejado herramientas de mantenimiento dentro o alrededor del transformador. El siguiente paso significativo fue la introducción del concepto de supervisión de voltaje [1]. Puede esperarse que durante las condiciones de arranque, el voltaje del transformador sea cercano a lo normal, mientras que durante las fallas, el voltaje sería mucho menor. Por lo tanto, se puede usar un relé de subtensión para supervisar el relé diferencial. Si el relé de subtensión se puede configurar para distinguir entre un transformador normal y un transformador con falla, entonces podría usarse para bloquear el relé diferencial cuando detecte un voltaje por encima de su configuración. En general, este tipo de supervisión de voltaje no es preferible, ya que el relé de subtensión tiende a ser lento y, en consecuencia, toda la protección se vuelve más lenta. Más importante aún, este tipo de protección requiere una fuente de voltaje para el relé del transformador, que es un gasto adicional, y puede que no sea justificable en muchos casos. El método actualmente en uso en transformadores grandes se basa en el uso de la caracterización armónica de las corrientes de entrada y sobreexcitación. La corriente diferencial es casi puramente sinusoidal cuando el transformador tiene una falla interna, mientras que está llena de armónicos cuando la corriente de entrada de magnetización está presente, o cuando el transformador está sobreexcitado. Por lo tanto, la corriente diferencial se filtra con filtros sintonizados a un conjunto apropiado de armónicos, y la salida de los filtros se utiliza para restringir el relé diferencial. Podemos considerar un circuito genérico para un relé

diferencial de porcentaje de restricción armónica, aunque los diseños reales de relés dependerían de las preferencias y la experiencia del fabricante en particular. Considere el circuito que se muestra en la Figura 8.11. La corriente de restricción se obtiene del CT-tr a través, mientras que la corriente de operación se obtiene a través del CT Td diferencial. La corriente diferencial se filtra a través de un filtro de paso de banda de frecuencia fundamental para proporcionar la corriente de funcionamiento normal. La corriente diferencial pasa a través de un filtro de bloqueo de frecuencia fundamental, que permite atravesar todo menos la frecuencia fundamental, y esta señal se utiliza para proporcionar una fuerza de restricción adicional. Un ajuste típico es utilizar un ajuste de restricción del 15% en el circuito armónico; es decir, cuando la corriente armónica es 15% o mayor que el componente de frecuencia fundamental de la corriente diferencial, el relé está al borde de la operación. Como se puede ver en la Tabla 8.1, esta configuración es suficiente para evitar el funcionamiento de la unidad diferencial para todas las condiciones de arranque consideradas en esa tabla. Dado que se utilizan aceros más modernos en los transformadores modernos, se ha encontrado que a menudo el contenido armónico de la corriente de entrada puede ser tan bajo como el 7%. En tales casos, el relé que utiliza un 15% de restricción armónica no podrá evitar el disparo en condiciones de irrupción. Para tales casos, es deseable un ajuste de entrada aún más bajo. Una función de restricción armónica que usa todos los armónicos para la restricción puede estar en peligro de prevenir un disparo por una falla interna si los TC deben saturarse. Como se señaló en la Sección 8.4, los TC saturados producen un tercer armónico predominante en la corriente. Se debe tener cuidado para asegurarse de que el tercer componente armónico producido en una corriente secundaria de CT saturada durante una falla interna no sea de una magnitud suficiente para bloquear el disparo del relé diferencial. Algunos relés modernos usan armónicos segundo y quinto para la restricción, de modo que se evita que el relé se dispare por

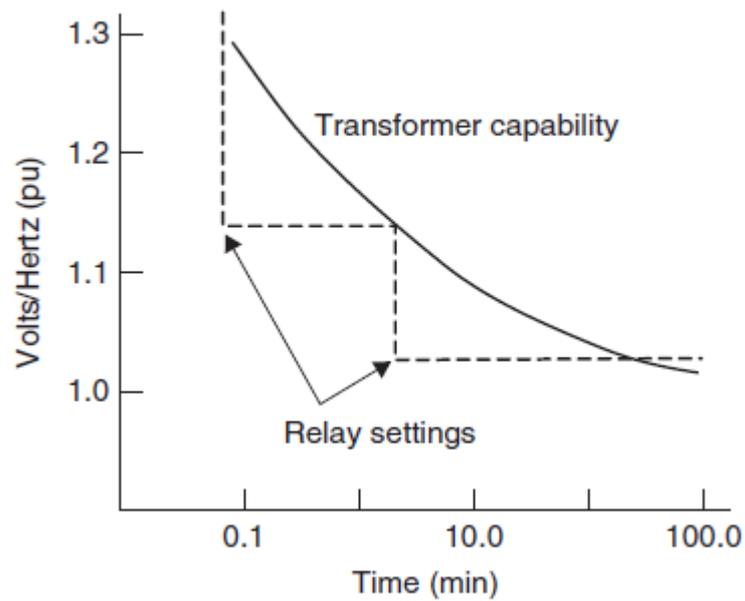
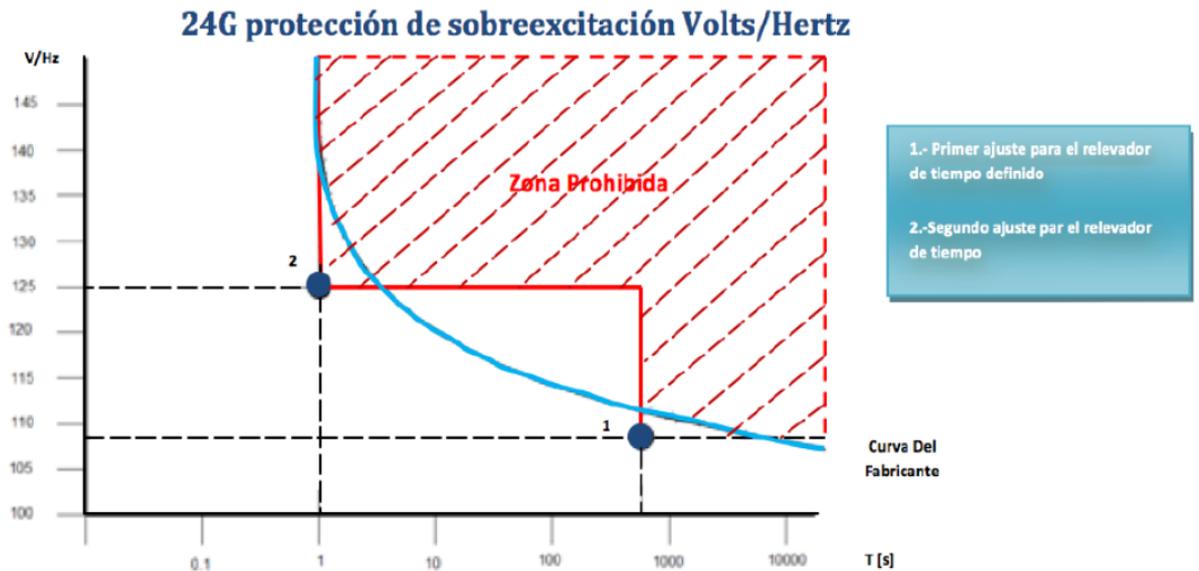
irrupción y sobreexcitación, pero no se bloquea el disparo por fallas internas con la saturación de CT.

Protección voltios por Hertz.

Los núcleos del transformador normalmente están sujetos a niveles de flujo que se acercan al punto de la rodilla en su característica de magnetización. Normalmente, la tensión nominal en la frecuencia nominal puede ser del 10% por debajo del nivel de saturación. Si el flujo del núcleo excediera el nivel de saturación, los patrones de flujo en el núcleo y la estructura circundante cambiarían, y pueden ser alcanzados niveles de flujo significativos en el tanque del transformador y otros miembros estructurales. Como estos no están laminados, es probable que se produzcan corrientes de Foucault muy altas, lo que produce graves daños al transformador. Eso por esta razón, que es deseable proporcionar un paquete de protección que responda al nivel de flujo en el transformador. Como el flujo es proporcional a la tensión, e inversamente proporcional a la frecuencia de operación, la cantidad de transmisión significativa es la relación del voltaje por unidad a la frecuencia por unidad. Esto se conoce como protección de voltios / hercios. Esta protección es especialmente necesaria en el caso de transformadores generadores conectados a la unidad. Si la turbina-generador se apaga con el regulador de voltaje en servicio, el límite voltios / hercios de los transformadores (y de hecho también de los generadores) podría superarse fácilmente. Condiciones también pueden alcanzarse mediante el rechazo de la carga con los reguladores de voltaje desconectados, o En posición manual, o con instrumentación defectuosa en los circuitos reguladores. La capacidad voltios / hercios de los transformadores es especificada por los fabricantes. Muchos relés de voltios / hercios tienen dos configuraciones,

un ajuste más bajo para dar alarma y otro más alto que se puede utilizar para disparar.

Los generadores de rotor cilíndrico deben ser capaces de operar hasta con un 105% del voltaje nominal marcado por normativa ANSI/IEEE.



Capacidad voltios/hercios de transformadores, y ajustes del relé.

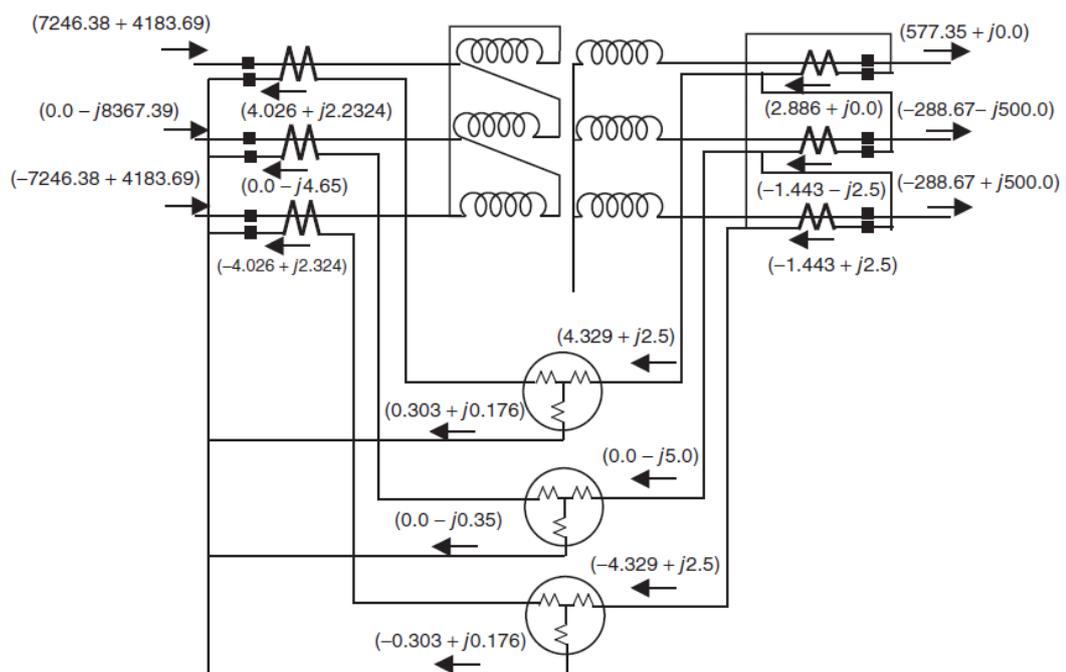
Protección de transformadores trifásicos.

Para la protección de transformadores trifásicos se requiere que las corrientes primarias y secundarias en las tres fases del transformador sean comparadas de forma individual, para así conseguir protección diferencial para dicho transformador. La principal diferencia entre la protección de los transformadores trifásicos y la de los bancos de transformadores monofásicos reside en la necesidad de tratar con el efecto de la transformación estrella-delta. Bajo condiciones de carga normal, las corrientes en el devanado primario y secundario se encuentran en fase, pero las corrientes de línea en los lados de estrella y delta del transformador se encuentran desfasadas en 30° . Debido a que los TC's suelen estar conectados en la línea- y no en el lado de delta- este desfase causa un diferencial de corriente permanente, Incluso cuando la relación de vueltas del transformador principal es tomado en cuenta correctamente. Este problema se resuelve conectando los TC's de una manera tal, que eliminan el desfase entre los lados de estrella y delta, producido por el transformador principal. Los TC's conectados al lado de estrella del transformador son conectados en delta, y los que se conectan al lado de delta son conectados en estrella. Se debe recordar que la conexión en delta de puede llevar a cabo de dos formas: en la primera las corrientes en delta se retrasan a las corrientes en el primario en 30° y la segunda forma Las corrientes en el delta adelantan a las corrientes primarias en 30° . Lógicamente. Se utiliza la conexión que compensa el desfase creado por el transformador principal. El mejor método de lograr las conexiones correctas es revisando cuidadosamente el flujo de las corrientes en los circuitos diferenciales cuando el transformador trabaja bajo carga normal. Ante estas condiciones, cuando las conexiones de los TC's son correctas, no habrá(o será muy pequeña) corriente en el circuito diferencial.

Aparte de la consideración en las fases discutida anteriormente, también es necesario ajustar la relación de transformación de los TC's de manera que la conexión en delta que se encuentra en el lado de estrella del transformador principal produce corrientes de relé que son comparadas numéricamente con las corrientes de relé producidas por los TC's conectados en estrella.

Ejemplo:

Considere the banco trifasico de transformadores mostrado, el transformador tiene una potencia de 500MVA y una relación de 34.5(delta)/500(estrella)kv



Asumiendo que el transformador está trabajando a carga normal, y que la corriente en la fase “a” en el lado estrella es el fasor de referencia. Así, las corrientes por cada fase en el lado estrella son:

$$I_a = \frac{500 \times 10^6}{\sqrt{3} \times 500 \times 10^3} = (577.35 + j0.0) \text{ A}$$

$$I_b = (-288.67 - j500.0) \text{ A}$$

$$I_c = (-288.67 + j500.0) \text{ A}$$

Las corrientes en el lado delta del transformador son:

$$I_{ad} = \frac{500 \times 10^6}{\sqrt{3} \times 34.5 \times 10^3} e^{j30^\circ} = (7246.38 + j4183.69) \text{ A}$$

$$I_{bd} = (0.0 - j8367.39) \text{ A}$$

$$I_{cd} = (-7246.37 + j4183.69) \text{ A}$$

Tenga en cuenta que el transformador principal está conectado con un delta adelantado. Los TC's en el lado delta del transformador deben conectarse en estrella. Por lo tanto, podemos seleccionar la relación de los TC's en este lado para ser tal que la corriente secundaria de CT sea menor que 5A cuando en el primario la corriente es 8367.39 A. Se selecciona la relación CT de 9000: 5. Esto produce corrientes secundarias en este lado de $(8367.39 \times 5/9000) = 4.65$ A. Los tres fasores de corriente secundaria del CT se muestran en la figura anterior.

Los CT en el lado de estrella del transformador de potencia se conectarán en delta. Por lo tanto, las relaciones de TC deben ser tales que las corrientes en el devanado secundario de CT sean cercanas a $(4.65 / \sqrt{3}) = 2.68$ A. Esto requiere una relación de TC de $577.35 / 2.68$, o 1077: 5. La selección de la relación de CT estandarizada más cercana de 1000: 5 produce corrientes en el devanado secundario del TC con una magnitud $577.35 \times 5/1000 = 2.886$ A. Esto producirá una corriente de línea delta TC de magnitud $2.886 \times \sqrt{3} = 5$ A. Aunque esto no es exactamente igual a las

corrientes de línea producido por el TC en el lado de 34.5 kV del transformador de potencia (4.65 A), este es lo mejor que se puede hacer con relaciones de TC estandarizadas. Como en el caso de los transformadores monofásicos, se puede utilizar los taps o tomas del relé para reducir aún más este desajuste de magnitud.

Los fasores reales de las corrientes secundarias de CT se muestran en la Figura. Se debe tener en cuenta que los CT en el lado de estrella del transformador de potencia están conectados en tal de manera que las corrientes en los relés están exactamente en fase, y corrientes muy pequeñas fluyen en los bobinados diferenciales de los tres relés en condiciones normales. Las corrientes son calculadas con la debida atención a las marcas de polaridad en los devanados de TC.

CONCLUSIÓN

Tanto por razones técnicas como económicas, es imposible evitar que se produzcan fallas. El diseño de un sistema eléctrico debe contemplar el hecho de que van a producirse fallas de maneras aleatorias e inesperadas, por lo que es necesario dotarlo de los medios adecuados para su tratamiento.

Cada componente principal del sistema de potencia representa una inversión importante de capital, por ello, es importante realizar estudios minuciosos entorno a las eventualidades que puedan afectar a estos equipos y los mejores medios y elementos de protecciones que permitan preservarlos y prolongar su tiempo de vida útil.

El transformador de potencia es una parte indispensable de todo sistema de potencia. Aunque es un equipo de gran robustez el hecho de manejar grandes cantidades de potencia hace que este requiera de todo un equipo de protecciones que continuamente se aseguren de que todas las condiciones están dadas para que este pueda mantenerse en funcionamiento.

Aunque no todas las fallas ocurren en el transformador, todos sus efectos, por mínimos que sean, se reflejan sobre este. esto se traduce en alteraciones de parámetros eléctricos que se salen de los rangos operativos del transformador. Alteraciones como elevadas corrientes de falla, variaciones significativas en la frecuencia, picos de tensiones, así como también fallas internas como cortocircuito entre espiras y falla núcleo devanado. las cuales si no son aisladas a tiempo producirán daños permanentes en el equipo.

Gracias a los diferentes elementos de protección y a su correcta elección todas estas fallas pueden ser mitigadas en gran medida, permitiendo la continuidad de funcionamiento y extendiendo la vida útil del equipo en cuestión.

