

Fuerzas y esfuerzos de corrientes de corto circuito en los transformadores de potencia

Fernando Jurado¹, Alfonso Lozano¹, Ivan Ramirez¹ y José Manuel Luque²
 Depto. de Maestría en Ingeniería eléctrica¹, Laboratorio de Alta Potencia²
 Instituto Tecnológico Superior de Irapuato¹, Comisión Federal de Electricidad²
 Irapuato, Gto.; México
 fejurado@itesi.edu.mx

Abstract— Electromagnetic forces arise from the interaction of short circuit currents links magnetic flux in the transformer windings is why susceptibility to damage caused by these short circuit currents are very important due to the peak current they generate by increasing its magnitude surpassing the rated current and so may affect the operation of operation of power transformers which unleash forces and stresses in the windings, insulation and internal structure in general. It is also advisable to have knowledge of the forces and stresses to which it is subjected power transformers when a short circuit originates and to obtain an analysis by 60076-5-2006 IEC, ANSI / IEEE C.57.12.00.2006 for study.

Keyword— Power transformer, short circuit (CC).

Resumen— Fuerzas electromagnéticas surgen por la interacción de las corrientes de corto circuito de enlaces de flujo magnético en los devanados de los transformadores es por ello que la susceptibilidad a daños causados por dichas corrientes de corto circuito son de suma importancia debido al pico de corriente que estas generan por el incremento de su magnitud superando así a la corriente nominal y que de tal modo puedan afectar el funcionamiento de operación de los transformadores de potencia lo cual desataría fuerzas y esfuerzos en los devanados, aislamientos y en su estructura interna en general. Además es recomendable tener conocimiento de las fuerzas y esfuerzos a los que se ve sometido los transformadores de potencia cuando se origina un cortocircuito y poder obtener el análisis mediante la normas IEC 60076-5-2006, ANSI/IEEE C.57.12.00.2006 para su estudio.

Palabras claves— Transformador de potencia, Cortocircuito (CC).

I. INTRODUCCIÓN

Fuerzas electromagnéticas creadas por la interacción de las corrientes y los enlaces de flujo magnético en los devanados del transformador son unidireccionales y de un solo tipo de pulsación, en el caso de corrientes puramente sinusoidales estas fuerzas consisten de una componente constante y de una componente alternando en doble frecuencia.

Las fuerzas electromagnéticas provocadas por corrientes de corto circuito están basadas en la siguiente Ec 1:

$$F(t) = F_{\max} * \frac{1}{2} + e^{-2t/\Gamma} - 2e^{-t/\Gamma} * \cos wt + \frac{1}{2} \cos 2wt \quad \text{Ec. 1}$$

En donde

F_{\max} Pico máximo de la fuerza.

Esta fuerza consta de 4 elementos o componentes:

2 componentes unidireccionales, una constante y una que decrece con el tiempo.

2 componentes alternativas, una de frecuencia fundamental decreciente con el tiempo, y una más de doble frecuencia con una más pequeña pero de amplitud constante.

En estos casos todas las componentes compensan a la corriente de cortocircuito, durante los primeros ciclos las fuerzas de frecuencia fundamental prevalecen en gran parte como se muestra en la Figura 1. Debido a la descomposición de la componente unidireccional de la corriente la magnitud del pico

máximo de la fuerza, es muy reducida después de unos pocos ciclos. Es por esta razón que se determina el límite de duración, para resistir las pruebas de corto circuito.

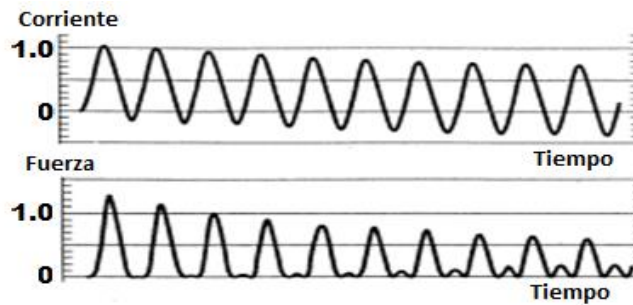


Figura. 1 a) Diagrama de corriente contra tiempo. b) Diagrama fuerza contra corriente

Cuando un elemento de corriente, sea una longitud de conductor portador de corriente, se encuentra dentro de un campo magnético, una fuerza se origina y se aplica a ese elemento actual, cuya magnitud se expresa por la Ecuación. 2:

$$F = B * I * L \sin \alpha \tag{Ec. 2}$$

En donde

B Densidad de flujo [T]

I Intensidad de corriente [A]

L Longitud del elemento de corriente [m]

α Angulo entre el vector de la densidad de flujo y el vector del elemento de corriente.

La dirección de la fuerza es electromagnética, porque es la eficaz combinación de la corriente eléctrica y el flujo magnético, es perpendicular al plano que contiene los vectores anteriores, y su orientación puede ser determinada de acuerdo a la común regla de la mano izquierda. Así también en los transformadores existe una combinación de los elementos de corriente de los bobinados y de flujo magnético

La densidad de flujo magnético depende de la reluctancia magnética de la ruta aérea que es constante y no muestra ningún efecto de saturación en los materiales magnéticos y es sustancialmente proporcional a la fuerza magneto motriz que se genera en los devanados.

Las fuerzas electromagnéticas aplicadas a los conductores de los devanados, siendo proporcional al producto de los bobinados de densidad de flujo actual y local, son también proporcionales al cuadrado de las corrientes de los devanados.

En devanados concéntricos de transformadores de tipo núcleo, las fuerzas actúan mayormente en dirección radial. En la extremidad media el flujo es propiamente axial y las fuerzas son radiales, en general no hay contribuciones significativas de fuerzas axiales mayores a las 2/3 partes de la longitud total de los devanados.

Sin embargo mientras en los transformadores de tipo concha ambos devanados de un grupo experimentan fuerzas fundamentalmente axiales causando esfuerzos naturales, en los de tipo núcleo las fuerzas radiales inducen esfuerzos de signo contrario, de tensión y compresión respectivamente. Los esfuerzos causados se muestran en la Figura 2.

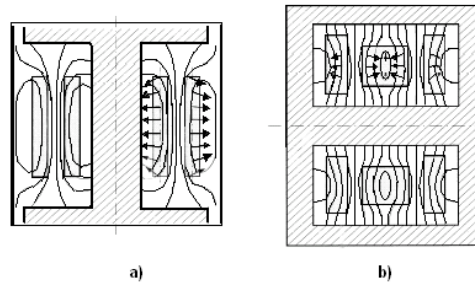


Figura 2 Fuerzas en el transformador tipo núcleo. b) Fuerzas en el transformador tipo concha.

II. FUERZA RADIALES

La mayoría de las líneas de flujo se forman en dirección axial, de este modo las fuerzas se manifiestan básicamente en dirección radial. En un transformador con un arreglo de 2 devanados el diagrama de la fuerza magneto motriz de forma trapezoidal, y un diagrama similar linealmente variable aplicados también a la intensidad del vector de la densidad de flujo se muestra en la Figura 3. El valor máximo de este vector puede ser calculado con un cierto grado de exactitud mediante la siguiente ecuación 3.

$$B_{max} = \frac{1.256 * \sqrt{2} * N * I * 10^{-3}}{H_w} \tag{Ec. 3}$$

En donde

$1.256 * \sqrt{2} * N * I * 10^{-3}$ Es el coeficiente de la permeabilidad del aire (H/m)

N Es el número de vueltas en los devanados eléctricos

I Es la magnitud de la corriente en el devanado en RMS (A)

H_w Es la longitud geométrica promedio de los devanados (mm)

En los conductores de los devanados cerrados el ducto principal está sujeto a fuerzas mayores en comparación con los lugares radialmente contrarios, esto hace que las fuerzas disminuyan linealmente a cero en la parte interior de los devanados, así como también en su parte exterior. La fuerza patrón semejante en cierta cantidad de fuerza transferida de conductores de mayor carga a los de menor carga, se consigue separar la carga entre conductores con tal de que estos estén envueltos fuertemente.

Si se ignora la reducción de la densidad de flujo axial que se da en las terminales de los devanados, la fuerza total empleada en los devanados se presenta mediante la siguiente Ecuación 4:

$$F_{rad} = 1.256 * \frac{(N * I)^2}{H_w} * \pi * D_m * 10^{-6} \tag{Ec. 4}$$

En donde

D_m Es el diámetro medio de los devanados

Cuando se considera la corriente de cortocircuito, cuyo primer pico de amplitud es $k * r$ veces mayor que el valor de pico de la relación de corriente, donde r es el factor de sobre corriente que hay en la relación de estado estable de la corriente de corto circuito en valor RMS, se puede determinar por la siguiente ecuación 5, y se puede visualizar en la Figura 3.

$$F_{rad} = \frac{510 * S_1}{f(d + \frac{a_1 + a_2}{s})} * r \tag{Ec. 5}$$

En donde

- F_{rad} Es igual al total de las fuerzas radiales en todo el devanado durante la duración del corto circuito. (kN)
- S_1 Es la relación de potencia por extremidad (KVA)
- f Es la frecuencia (Hz)
- d Ancho del ducto principal entre devanados (mm)
- $a_1 a_2$ Son la anchura radial de los devanados 1 y 2 (mm)

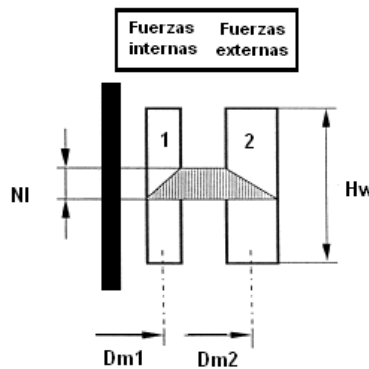


Figura 3 Diagrama FMM para fuerzas radiales

I. ESQUEMAS DE FALLAS CAUSADOS POR CORRIENTES DE CORTO CIRCUITO

Si se considera el efecto de las fuerzas radiales en los conductores de los devanados, se puede notar que hay una sustancial diferencia de comportamiento en los devanados, esto depende de si las fuerzas son internas o externas. Los conductores correspondientes a estos devanados cuando están sujetos a fuerzas externas desarrollan esfuerzos a tensión, mientras que si están expuestos a fuerzas internas experimentan esfuerzos a compresión.

De algunas teorías tales como resistencia de materiales y de la estabilidad elástica es conocido que las barras delgadas que sostienen las cargas axiales, como lo son tubos y anillos circulares delgados sometidos a presiones externas, puede colapsarse por deformación, un fenómeno de inestabilidad elástica. Tal como un colapso que ocurre con una carga crítica, estos dependen de básicamente del módulo de elasticidad del material y de las características geométricas de la estructura. A continuación se mencionan.

a) *Fallas en los devanados por esfuerzos a tensión.*

Si la resistencia del material es excedida, la falla podría ocurrir por el estiramiento del conductor, lo que puede resultar en la ruptura de su aislamiento o la inestabilidad axial de la bobina debido a un pandeo en la parte fuera de los devanados. La ruptura por esfuerzos a tensión además se puede presentar en los conductores que no han sido unidos correctamente.

b) *Esfuerzos en los devanados debido a esfuerzos de compresión*

Los colapsos por esfuerzos compresivos en devanados ocurren de acuerdo a 2 patrones:

- I. Fuerza de deformación
- II. Libre deformación

De acuerdo al modo de fuerza de deformación, los conductores envueltos dentro de cada palmo o en palmos alternos entre los soportes axiales, esto produce una forma parecida a una estrella de muchos puntos como se muestra en la Figura 4. Esta forma de colapso ocurre cuando los esfuerzos exceden el límite elástico de los conductores, mientras que en la cara interior de la estructura de soporte hay una significativa rigidez debido a los devanados.

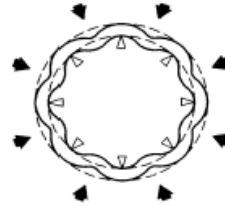


Figura 3 Efecto de fuerza de deformación

Un colapso más común producido por fuerzas radiales internas es el de libre deformación. Lo cual causa un pandeo en el exterior de los conductores tal como en el interior de cada uno, o como pocos puntos específicos alrededor de la circunferencia.

La libre deformación ocurre cuando un hilo de un conductor individual posee alta rigidez comparado a una estructura práctica de aislamiento en su interior como se muestra en la Figura 5. Esta falla mecánica causada por una forma de inestabilidad y que realmente corresponde a un fenómeno bastante complejo. Factores como la cantidad de ajuste con lo que son envueltos los conductores y la inicial excentricidad presente en los devanados, combinados con la forma geométrica de los conductores y las características físicas de los materiales, son decisivos para la resistencia de los materiales.

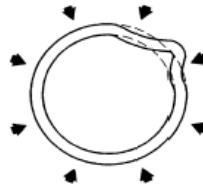


Figura 4 Efecto de libre deformación.

c) Modos de falla causados por fuerzas axiales.

La pérdida de estabilidad axial en los devanados, consiste en un significativo giro de los conductores de la sección transversal alrededor de su respectivo eje de simetría perpendicular. Este modo de colapso es llamado de “inclinación” hace que todo el conjunto de conductores adyacentes dentro de la amplitud radial en las vueltas de los devanados en la misma dirección, mientras que los siguientes conductores axialmente giran en dirección opuesta. Este fenómeno (inclinación) pueda resultar en la ruptura del aislamiento del conductor, y aumentar las fuerzas originadas por los desplazamientos de estos, así como los cortos circuitos internos entre conductores. Este fenómeno se muestra en la Figura 6.

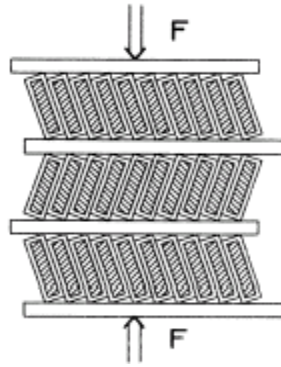


Figura 6 Conductores con efecto de inclinación.

El colapso axial de los devanados debido al “extendimiento” de los conductores esto es típico de un modo de separación de los devanados. El extendimiento consiste en que algunas de las vueltas empujan axialmente a las últimas espiras adyacentes debido a las pérdidas radiales causadas por el estiramiento de los conductores. Usualmente el extendimiento provoca la destrucción del aislamiento de los conductores y fallas de espira a espira.

La resistencia del transformador en relación con las fuerzas axiales está asociado con una combinación de factores, incluyendo el diseño de los devanados y de su total aislamiento además de la estructura de soporte, etc. Los conductores delgados son expuestos a mayores riesgos de inclinamiento especialmente en el caso de grandes transformadores, lo mismo ocurre con la falta de cohesión entre conductores adyacentes. Un inclinamiento del conductor entre separadores de fila se muestra en la Figura 7.

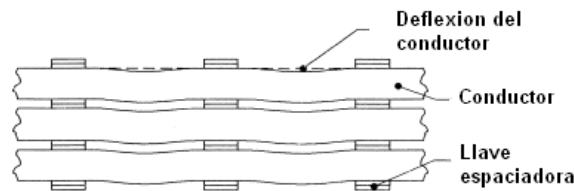


Figura 5 Inclinamiento del conductor entre separadores en fila.

III. ESFUERZOS Y FUERZAS A CONSIDERAR EN LAS PRUEBAS DE CORTOCIRCUITO

Los transformadores son máquinas eléctricas diseñadas para soportar un ciclo de vida extensos, es conocida su longevidad y fiabilidad en este tipo de máquinas. De interés es conocer el estado y evolución del transformador para colaborar sus condiciones de operación con la máxima seguridad y saber si es apropiado continuar su uso. Debido a ello es que radica la importancia del número de pruebas a las que se someten los transformadores para la detección oportuna de un mal funcionamiento o fallas internas como se ha mencionado en el presente trabajo, tales como cortocircuitos entre espiras, fallas por el aislamiento, falsos contactos en los empalmes de la conexión de devanados, hasta fallas francas en los devanados, entre otras.

A continuación se presenta como caso de estudio la prueba de cortocircuito en los transformadores de potencia siendo está una de las más importantes para determinar su capacidad de soporte a altas corrientes, esta prueba se basa en la inserción de una tensión por un devanado estando el otro devanado en cortocircuito.

El análisis de la prueba de cortocircuito es evaluar el diseño mecánico (soportes, tirantes, empaquetado de bobinas, conformación del núcleo, y ajuste general del transformador). Y la capacidad

de manejo de energía ante una situación de cortocircuito sostenido (el caso más crítico para un transformador).

Para demostrar la capacidad de este tipo de transformadores y que están diseñados para soportar cortocircuitos, las normas también consideran la posibilidad de confiar en el cálculo y el estudio de la estructura mecánica, validado por comparación previamente realizada con los transformadores que arrojaron resultados similares. Sin embargo, el procedimiento de prueba de cortocircuito se considera una mejor forma de determinar el comportamiento real de los equipos, una vez que la prueba demuestra que tanto la construcción y el diseño es similar en los materiales, procedimiento de secado y conformación de núcleo y bobinas como los elementos críticos durante la fabricación del transformador.

La razón por la que la prueba en campo se considera fiable es simplemente que, un transformador se compone de una estructura muy compleja y no homogénea, tal que su comportamiento está fuertemente influenciado por el proceso de fabricación.

a) Técnica de cortocircuito pre-establecido

En este método supone el cierre de un interruptor a la terminal de la fuente para energizar el transformador previamente cortocircuitado. Esto significa que el devanado del secundario está cortocircuitado y la potencia está conmutada sobre el primario. Este método puede funcionar bastante bien si el secundario es una disolución interna de los concéntricos de cuerda, un transformador del tipo de núcleo. Ver Figura 8 a. y 8.b.

El flujo en el núcleo será muy bajo, porque el más cercano de liquidación se pone en cortocircuito y ningún cambio en el flujo va a producir como se muestra en la Figura 8.a.

Habrà una gran cantidad de corriente de entrada que es necesario para magnetizar el núcleo y que circula por el devanado primario y superpuesto a la corriente de cortocircuito. Esta situación lleva al desequilibrio entre las fuerzas magneto motriz de los dos devanados

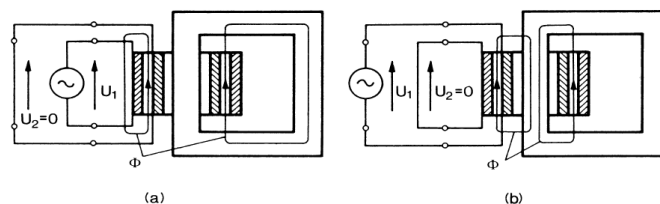


Figura 8 Transformador cortocircuito

b) Técnica con un post- establecido cortocircuito

Este método implica el cierre de un interruptor en la terminal de falla para aplicar un cortocircuito en el transformador energizado con anterioridad. Al adoptar este método de prueba, la dificultad principal de la magnetización desaparece sin control. El transformador se ha incorporado en vacío a la tensión nominal y el cortocircuito secundario se cierra, en el ángulo de fase determinada, por medio de un interruptor que sincroniza. El método que utiliza un cortocircuito después de establecida se debe preferir la medida de lo posible, ya que representa más de cerca la condición típica durante las fallas.

El propósito es alcanzar la tensión nominal en los terminales de liquidación en el momento en que el corto circuito se lleva a cabo a pesar de la caída de tensión que ocurre aguas arriba en el sistema de abastecimiento, y establecer el valor prescrito en estado estacionario de la corriente de cortocircuito.

Esto explica el requisito para la capacidad limitada sobreexcitación de los transformadores e implica que la potencia de cortocircuito es absorbida por el transformador.

Esta circunstancia se desprende de la gráfica, como se muestra en la Figura 9. La cual muestra la cantidad de P_a / P_t (cociente entre la potencia de cortocircuito de la estación de energía requerida por el

objeto de prueba) en función de la relación entre la tensión (U) aplicada al transformador antes de realización de la prueba a la tensión nominal U_t del transformador.

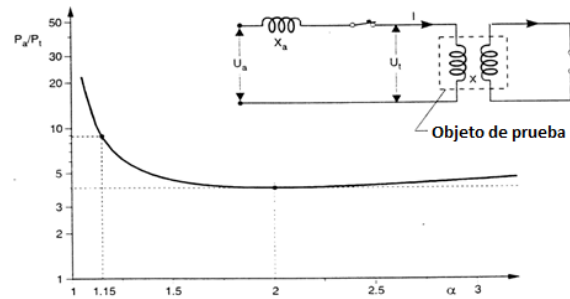


Figura 9 La relación entre la tensión aplicada al transformador.

La capacidad de potencia de la unidad de pruebas se expresa como potencia de cortocircuito para su aplicación, es decir, U/X_j , donde X_j es la fuente de impedancia interna de la estación.

Se puede observar en el gráfico que la potencia máxima que puede ofrecerse a través de la unidad de prueba a una carga reactiva externa se obtiene cuando la carga es igual a la impedancia de la fuente.

c) Duración de la prueba de cortocircuito

En ausencia de cualquier especificación particular, el número de pruebas en transformadores trifásicos o monofásicos se determina, sin incluir la prueba preliminar de ajuste llevado a cabo en menos de 70% de la corriente especificada para verificar el buen funcionamiento de la prueba de puesta a punto con respecto al momento de la conexión, la configuración actual, la amortiguación y la duración.

Con respecto a la posición de cambiador de tomas y la secuencia de prueba, el mismo procedimiento descrito para los transformadores de las categorías I y II se recomienda. La duración de cada prueba es:

La

- 0,5 s para los transformadores de la categoría I,
 - 0,25 s para los transformadores de las categorías II y III,
- Con una tolerancia de $\pm 10\%$

El tiempo según la categoría del transformador se muestra en la Tabla 1. La duración de la prueba para la categoría I se podrá determinar mediante la siguiente Ecuación 6:

$$t = \frac{1250}{I^2} \tag{Ec. 6}$$

Tabla 1 Tiempo duración de la prueba de cortocircuito.

Categoría	Tiempo de duración
II	1.0 Segundos
III	Segundos

d) Magnitud de la corriente de cortocircuito.

Categoría I

La corriente simétrica de cortocircuito podrá ser calculada usando solamente la impedancia del transformador, excepto que la magnitud de la corriente máxima simétrica no exceda los valores de la Tabla 2.

Tabla 2 Capacidad resistiva de cortocircuito para transformadores de distribución.

Fase Simple (KVA)	Trifásico (KVA)	Capacidad de resistencia por unidad de la corriente de base.
5 – 25	15 – 75	40
37.5 – 110	112.5 – 300	35
167 -500	500	25

Categoría II

La corriente simétrica de cortocircuito será calculada solamente con la impedancia del transformador.

Categoría III y IV

La corriente simétrica de cortocircuito será calculada usando la impedancia del transformador más el sistema de impedancias que se especifique para el usuario del transformador.

e) Corriente smétrica

Para transformadores polifásicos y autotransformadores, los valores *rms* requeridos de la corriente simétrica por la Ecuación 7., en cada devanado podrá ser determinado por los cálculos basados en la aplicación del sistema de condiciones y los tipos de falla.

$$I_{SC} = \frac{I_R}{Z_T - Z_S} \tag{Ec. 7}$$

En donde:

I_{SC} Es la corriente simétrica de cortocircuito (A, rms)

I_R Es la relación de corriente dada por la conexión del tap (A, rms)

Z_T Es la impedancia del transformador.

Z_S Es la impedancia del sistema.

f) Corriente asimétrica

El pico de la corriente asimétrica en el primer semiciclo que el transformador necesita soportar puede ser determinado mediante las siguientes Ecuaciones 8 y 9:

$$I_{SC(picoasimetrico)} = k * I_{SC} \tag{Ec. 8}$$

$$k = \left\{ 1 + \left[E^{-\left(\alpha + \frac{\pi}{2}\right) \frac{r}{x}} \right] \sin \alpha \right\} \sqrt{2} \tag{Ec. 9}$$

α Es el arco tangente (x/r), (radianes)

x/r Es la relación de reactancia a resistencia, ambas en ohm, es la impedancia total en los límites de la corriente de falla cuando ocurre el cortocircuito.

Cuando el sistema de impedancia está incluido en los cálculos de la corriente de falla, la relación x/r de la impedancia externa.

IV. CARACTERÍSTICAS DEL SISTEMA MEDIANTE UN CASO DE APLICACIÓN DE DESARROLLO

De acuerdo a la norma, se deberá considerar la capacidad de cortocircuito máxima del sistema al cual será conectado el transformador. De tal modo poder calcular la corriente dada por la conexión del tap, la impedancia del transformador así como también la impedancia del sistema. Como se describe a continuación:

La potencia del sistema S_n es de 30MVA.

Las impedancias de los taps son:

$Z_{cc1} = 13.158\% = 0.13158$	$Z_{cc1} = 13.092\% = 0.13092$	$Z_{cc1} = 13.196\% = 0.13196$
--------------------------------	--------------------------------	--------------------------------

- La impedancia de la fuente Z_s está dada por la formula siguiente.

La tensión del transformador U_n es de 13.8KV.

Para obtener la potencia de cortocircuito S_{cc} del sistema se utiliza la tabla número 6 de la normativa utilizada. . Entonces se obtiene la potencia de cortocircuito de 25,100MVA.

Se realizan los cálculos y se obtiene lo siguiente

$I_r = \frac{S_n}{\sqrt{3}U_n} = \frac{30 \times 10^6}{\sqrt{3}(13.8 \times 10^3)} = 1.255 \times 10^3 A$	$Z_s = \frac{U_n^2}{25100 \times 10^6 VA} = 0.0076 \Omega$
---	--

La capacidad de la corriente de cortocircuito del transformador es

$I_{cc} = \frac{I_r}{Z_{cc}} = \frac{(1.255 \times 10^3)}{0.13158} = 9538.75 A$	$I_{cc} = \frac{I_r}{Z_{cc}} = \frac{(1.255 \times 10^3)}{0.13092} = 9586.84 A$	$I_{cc} = \frac{I_r}{Z_{cc}} = \frac{(1.255 \times 10^3)}{0.13092} = 9586.84 A$
---	---	---

La potencia de cortocircuito del transformador es

$$S_{cc1} = \sqrt{3}U_n \cdot I_{cc1} = \sqrt{3}(13.8 \times 10^3)(9538.75 A) = 228 \times 10^6 VA$$

$$S_{cc1} = \sqrt{3}U_n \cdot I_{cc1} = \sqrt{3}(13.8 \times 10^3)(9586.84 A) = 229.15 \times 10^6 VA$$

$$S_{cc1} = \sqrt{3}U_n \cdot I_{cc1} = \sqrt{3}(13.8 \times 10^3)(9511.29 A) = 227.34 \times 10^6 VA$$

La impedancia del transformador por cada tap es

$Z_{T1} = \frac{U_n^2}{S_{CC1}} = \frac{(13.8 \times 10^3)^2}{228 \times 10^6} = 0.835 \Omega$	$Z_{T3} = \frac{U_n^2}{S_{CC3}} = \frac{(13.8 \times 10^3)^2}{229.15 \times 10^6} = 0.831 \Omega$	$Z_{T1} = \frac{U_n^2 I_r}{S_{CC5}} = \frac{(13.8 \times 10^3)^2}{227.34 \times 10^6} = 0.838 \Omega$
--	---	---

La impedancia de la fuente en PU

$Z_{s1} = \frac{(Z_s \cdot Z_{cc1})}{Z_{T1}} = \frac{(0.0076 \Omega)(0.13158)}{0.835 \Omega} = 0.0012$	$Z_{s3} = \frac{(Z_s \cdot Z_{cc3})}{Z_{T3}} = \frac{(0.0076 \Omega)(0.13092)}{0.831 \Omega} = 0.0012$	$Z_{s5} = \frac{(Z_s \cdot Z_{cc1})}{Z_{T5}} = \frac{(0.0076 \Omega)(0.13158)}{0.838 \Omega} = 0.0012$
--	--	--

De esta manera se concluye con el cálculo de la corriente de cortocircuito simétrica acorde con la norma ANSI/IEEE.

$I_{cc1} = \frac{I_r}{Z_{s1} + Z_{cc1}} = \frac{(1.255 \times 10^3)}{0.0012 + 0.13158} = 9.45 kA$	$I_{cc3} = \frac{I_r}{Z_{s3} + Z_{cc3}} = \frac{(1.255 \times 10^3) A}{0.0012 + 0.13092} = 9.5 kA$	$I_{cc5} = \frac{I_r}{Z_{s5} + Z_{cc5}} = \frac{(1.255 \times 10^3)}{0.0012 + 0.13196} = 9.43 kA$
---	--	---

V. CONCLUSIONES

En relación a los resultados se observa que las corrientes simétricas son magnitudes muy elevadas que son capaces de llevar a la falla a los transformadores de potencia o causar un daño irreparable en el sistema. La amplitud de la corriente de cortocircuito depende fundamentalmente del momento en que la

falla ocurra, su duración y de la ubicación, la corriente resultante adquiere dos amplitudes características como son las corrientes simétrica o asimétrica.

La metodología del cálculo entrega valores simétricos pero dentro del dimensionamiento del sistema se debe trabajar con el valor asimétrico y para convertir una corriente de cortocircuito simétrica en asimétrica, basta con multiplicar la corriente simétrica por un factor de asimétrica. Para obtener esta corriente asimétrica hay que tomar en cuenta el factor de reactancia sobre resistencia (X/R), ya que dependiendo de su coeficiente se elevara en tantas veces como sea ese número por la corriente simétrica.

El método pre-establecido resulta ser el método más eficiente para llevar a cabo pruebas de cortocircuito. Mientras que en el método post-establecido se requiere alrededor del 115% de energía respecto a la capacidad del equipo.

El modo de falla que provocan las fuerzas radiales durante la prueba de cortocircuito es la libre deformación en los devanados del transformador lo que puede afectar la resistencia estructural del equipo bajo falla. Las fuerzas axiales durante la falla de cortocircuito provocan el extendimiento e inclinación de las espiras lo cual provoca la ruptura del material aislante debido a la deflexión de los conductores y por consecuencia una falla de cortocircuito los devanados del transformador.

VI. REFERENCIAS

- [1] Giorgio Bertagnolli, "Short Circuit Duty of Power Transformers", The ABB approach, Milan, 1996.
- [2] Robert M. Del Vecchio, Bertrand Poulin, "Transformer Design Principles", CRC Press, New York, 2002.
- [3] John J. Winders, Jr., "Power Transformers Principles and Applications", Marcel Dekker, Inc., New York, 2002
- [4] CIGRE and KEMA T&D Testing Services of Netherlands, "Test Experiences with Short-Circuit withstand Capability of Large Power Transformers", Belem, 15 to 18 of April 2008.
- [5] IEEE C57.12.00.2006, Standard General Requirements for Liquid- Immersed Distribution, Power, and Regulation Transformers.
- [6] IEC 60076-5-2006, Ability to Withstand Short-Circuit.
- [7] Theodore Wildi, "Electrical Machines, Drives and Power Systems", Prentice Hall, New Jersey, 2002.
- [8] Stephen J. Chapman, "MaquinasEléctricas" McGraw-Hill, Mexico, 1998.