NOVA MIRON
SERVICIOS & TRANSFORMADORES

Esfuerzos Electrodinámicos en Transformadores

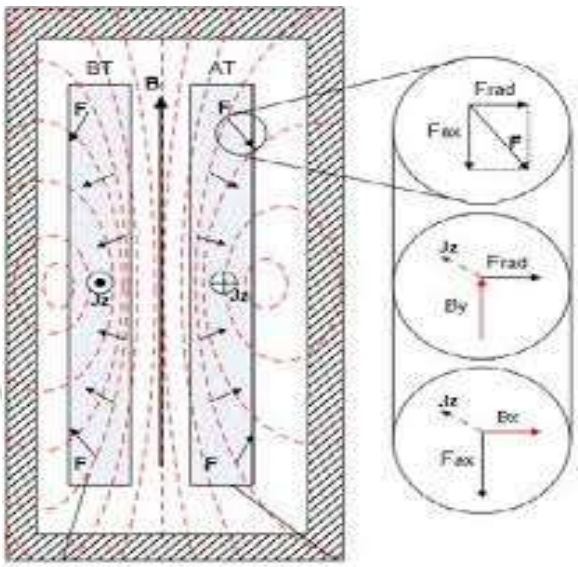
Parte 2

1. Efectos de los esfuerzos y resistencia térmica al cortocircuito

En base a lo visto en el ítem 3 de la Parte 1, los esfuerzos electrodinámicos pueden representarse a través de 2 componentes, una en dirección radial y la otra en dirección axial, en referencia a los bobinados de AT y BT, alojados en cada columna del núcleo magnético.

La acción de la fuerza F sobre cada bobinado, así como las componentes radial y axial, podemos observarlas en la siguiente figura.

Figura N° 1



Como ya destacamos en el ítem 3 de la Parte 1, la figura representa una ventana del núcleo magnético del transformador, con el bobinado de BT alojado en la parte interna y el de AT en la parte externa.

Durante la circulación de una corriente de cortocircuito sobre los bobinados, se establecerá una alta concentración de la densidad del flujo magnético en la ventana de aire del núcleo.

En estas circunstancias, los campos de dispersión de cada columna adyacente del núcleo, influirá magnéticamente sobre las otras.

Como resultado de lo anterior, se obtiene, por lo general, una mayor fuerza de interacción en los bobinados que conforman la columna central del núcleo del transformador.

Es importante resaltar que existe una diversidad de métodos que permiten calcular los esfuerzos sobre los bobinados, ante estados de circulación de corrientes de cortocircuito (por ej. Método de Roth).

En la actualidad se ha introducido el método numérico de Elementos Finitos, el cual modela al transformador como un dispositivo electromagnético asimétrico y no lineal, en las tres dimensiones espaciales (modelado 3D).

Con el método citado se pueden obtener resultados de alta precisión, que permiten estudiar en profundidad el fenómeno magnético-mecánico, tanto dentro como fuera de la ventana del núcleo.

A los fines prácticos y de comprensión de este proceso, será suficiente con adoptar un modelo analítico en dos dimensiones (2D) y con un conjunto de hipótesis, que permitan facilitar el desarrollo.

Hipótesis del modelo analítico en 2D:

- El núcleo magnético adoptado será de 3 columnas y con una permeabilidad magnética infinita (reluctancia nula).

- Se asume que la configuración de los bobinados en AT y BT son de características cilíndricas y concéntricas.

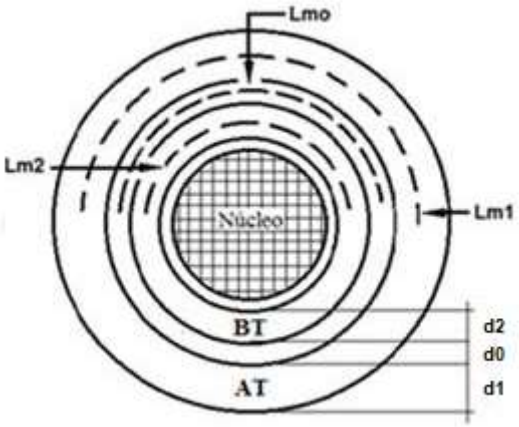
- Se considera que las alturas de ambos bobinados son iguales.

- Se desprecian los efectos del campo magnético de dispersión en los extremos superior e inferior de las columnas del núcleo.

- Ante un estado de cortocircuito se establece una gran concentración del campo de dispersión en las ventanas del núcleo magnético, asumiendo que será en ésta en donde se desarrollarán prácticamente todos los mecanismos de fallas asociados a los esfuerzos.

En la figura N° 2 podemos observar la estructura básica de los arrollamientos y núcleo magnético que utilizaremos en el análisis de los esfuerzos.

Figura N° 2



Siendo:

Lm1 = longitud media del arrollamiento externo (AT).
Lm2 = longitud media del arrollamiento interno (BT).
Lm0 = longitud media del canal de dispersión.
d1 = ancho del arrollamiento externo.
d2 = ancho del arrollamiento interno.
d0 =ancho del canal de dispersión.

El análisis se resume en verificar la capacidad mecánica de los bobinados para poder resistir el pico de fuerza electrodinámica (Fp) ante un estado de cortocircuito (ver Parte 1, ítem 3).

A continuación se explicarán los distintos esfuerzos que pueden desarrollarse en los bobinados, así como los efectos asociados sobre la estructura de los mismos.

1) Fuerza radial

Como ya hemos visto, las fuerzas radiales son provocadas por el campo magnético axial de dispersión (Φa → Ba ≡ By → Frad = componente radial).

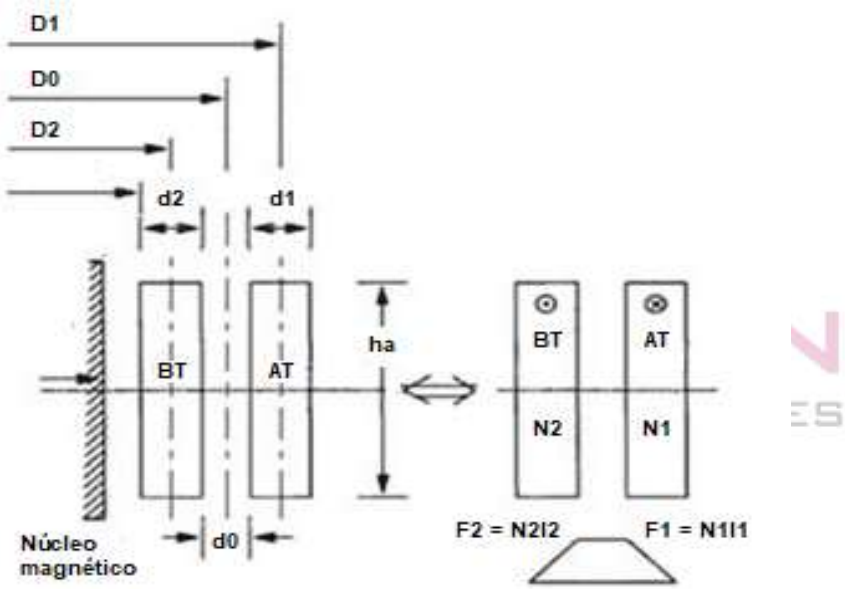
De la figura N° 1 se puede observar que el bobinado interior (el de BT) se encuentra sometido, radialmente, a un esfuerzo de compresión, tratando éste de comprimirlo hacia la columna del núcleo magnético.

En cambio, el bobinado externo (AT), se encuentra sometido a un esfuerzo radial de tracción, por lo que tenderá a desplazarse hacia afuera de la estructura.

También se observa, en la figura N° 1, que la máxima fuerza radial se establecerá en la zona media de los bobinados, en donde se minimiza la componente radial del campo de dispersión.

A los efectos de evaluar la magnitud de la fuerza radial, debemos considerar la distribución de la Fuerza Magnetomotriz en la estructura de los bobinados.
Esta distribución adquiere una característica trapezoidal, atendiendo al hecho de que los niveles de las fuerzas magnetomotrices, tanto en la cara interna del arrollamiento interno como en la cara externa del externo, son de valor cero.
La distribución es lineal en ambos arrollamientos, aumentando desde cero al correspondiente máximo en cada arrollamiento, es decir N_1I_1 en el externo (AT) y N_2I_2 en el interno (BT).
En el canal de dispersión, la fuerza magnetomotriz se mantiene, a lo largo de éste, con el valor constante de F1 = F2.
En la figura N° 3 podemos observar la estructura de arrollamientos-núcleo, así como la distribución trapezoidal de la FMM.

Figura N° 3



Siendo:

D1 = diámetro medio del arrollamiento externo (AT).
D2 = diámetro medio del arrollamiento interno (BT).
D0 = diámetro medio del canal de dispersión.
d1 = ancho del arrollamiento externo.
d2 = ancho del arrollamiento interno.
d0 =ancho del canal de dispersión.
ha = altura de los arrollamientos.
F1 = N_1 I_1 = fuerza magnetomotriz máxima en el arrollamiento externo (AT).

F2 = N_2 I_2 = fuerza magnetomotriz máxima en el arrollamiento interno (BT).

En las condiciones ideales, planteadas en las hipótesis, se tendrá que: F1 = F2 = Fm.
A partir de la configuración de la FMM se puede obtener el valor máximo del campo magnético de dispersión en el espacio de aire entre los dos arrollamientos (d0). Tendremos:

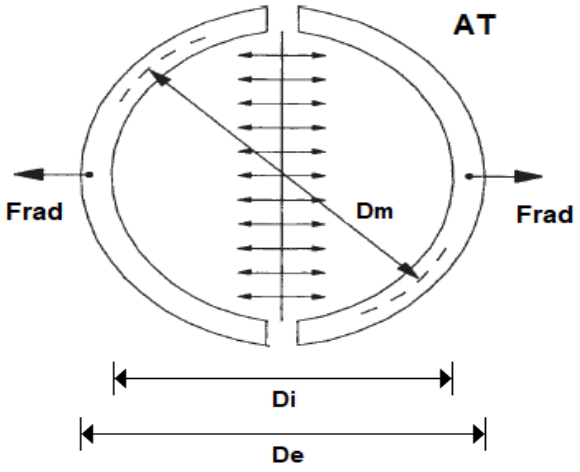
$$B_{0m} = \frac{\sqrt{2}\mu_0 \, Fm}{h_a}$$

A continuación, veremos los dos casos de fuerzas radiales que se pueden establecer en los arrollamientos.

a) Fuerza radial de tracción

Como ya hemos comentado, el arrollamiento externo de AT será el que se encontrará sometido a un esfuerzo radial de tracción, cuyo efecto será el de traccionarlo hacia afuera de la estructura. A este esfuerzo resultante también se lo denomina “hoop stress”.
Teniendo en cuenta la distribución trapezoidal de la FMM, sabemos que el campo de dispersión incrementa su valor desde cero en la cara externa del arrollamiento (De), hasta su valor máximo Fm en el diámetro interior (Di).

Figura N° 4



Siendo:

Di = diámetro interior del arrollamiento externo (AT).
De = diámetro exterior del arrollamiento externo (AT).
Dm = diámetro medio del arrollamiento externo (AT).
Frad = fuerza radial neta sobre el arrollamiento externo (AT).

Operando, se puede obtener la siguiente expresión de la fuerza media por unidad de área transversal de cada vuelta del arrollamiento, expresada en N/m^2.

$$\sigma m = \frac{\mu_0}{2\pi\rho h_a} \frac{k^2 P_f}{Z°/1^2}$$

en donde:

ρ = resistividad del material conductor del arrollamiento a 75 °C.
k = factor de asimetría de la corriente de cortocircuito, considerando la componente unidireccional.
Pf = pérdidas en el material conductor del arrollamiento (cobre o aluminio) por columna del transformador.
Z°/1 = impedancia en tanto por uno del transformador.
ha = altura del arrollamiento.

Para este arrollamiento, los conductores cercanos al canal de dispersión (en Di), estarán sometidos a las máximas fuerzas radiales, mientras que aquellos ubicados en la parte externa (en De) el efecto será prácticamente nulo.
Debemos destacar que, en base a lo visto en relación a la distribución de la FMM, la fuerza se distribuye linealmente entre ambas caras del arrollamiento, desde un valor máximo en la cara interior hasta un valor nulo en la exterior.
En tal sentido, se asume que la carga mecánica sobre los conductores más exigidos (ubicados en la cara interna) se transmite a los conductores menos exigidos (ubicados en la cara externa).
Por lo tanto, el cálculo de “σm” tiene en cuenta el promedio de la fuerza a lo largo de la profundidad radial del arrollamiento, atendiendo al hecho de que la carga mecánica se comparte en manera uniforme. Ver en la figura N° 4 el esquema de distribución uniforme de la fuerza en ambas mitades del bobinado, como equivalente a actuar sobre el diámetro Dm del mismo.
Al excederse la resistencia mecánica del conductor, el esfuerzo radial llevará a la deformación del bobinado, con el resultado de provocar fundamentalmente un daño en la aislación.

La ruptura del bobinado, como consecuencia de este tipo de esfuerzo, puede estar directamente asociada con un mal proceso de conformado de los conductores del mismo, en la etapa de fabricación del transformador.

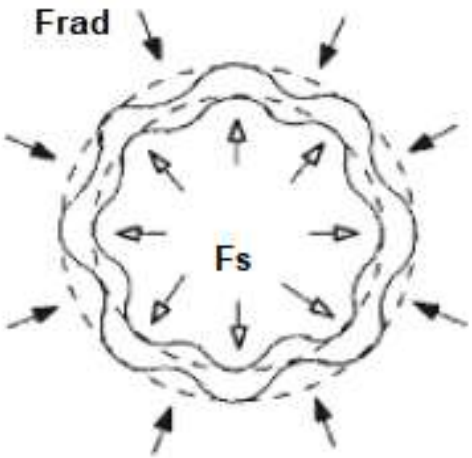
b) Fuerza radial de compresión

Este esfuerzo se establece en el arrollamiento interno, en donde la máxima fuerza se asienta en la cara externa y la mínima en la cara interna, con el resultado neto de una presión de compresión a lo largo de la circunferencia del citado bobinado.
Pueden presentarse dos casos, a saber:

b.1) Por pandeo forzado

En este caso, la deformación del bobinado ocurre cuando los esfuerzos de compresión resultantes, exceden el límite elástico de los conductores en la parte externa, mientras que en la cara interna del bobinado existe una rigidez significativa, debido a la estructura de los soportes.

Figura N° 5



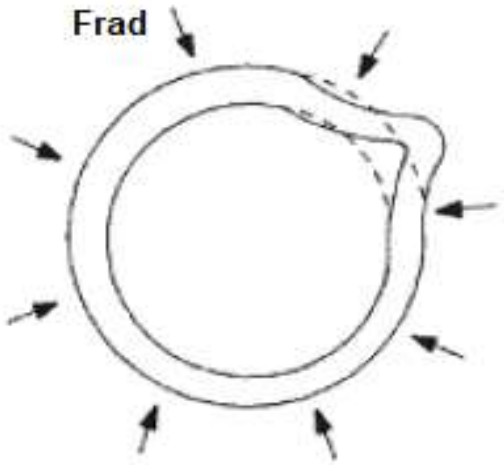
En la figura N° 5 se observa la fuerza radial de compresión (Frad) actuando sobre la circunferencia externa del arrollamiento interior y la fuerza de reacción que ejercen los separadores axiales (Fs).
También se observa la deformación característica que ocasiona este esfuerzo, estableciendo un pandeo entre los separadores axiales que conforman el sistema de soporte, a lo largo de toda la circunferencia del bobinado.

En este caso, la rigidez que presenta el sistema de soporte es superior a la correspondiente de los conductores. Se asume que la rigidez se incrementa si los separadores se encuentran soportados por el núcleo magnético.

b.2) Por pandeo libre

La deformación del bobinado interno tiene su causa en la acción de la fuerza radial de compresión debido a un pandeo sin reacción de los soportes axiales.
Este caso se presenta cuando la rigidez del conductor es mayor a la del cilindro interno que conforma el bobinado y los espaciadores axiales no se encuentran firmemente soportados.

Figura N° 6



De la figura se observa que se establece un abultamiento del bobinado, en uno o varios puntos a lo largo de la circunferencia del arrollamiento. Este abultamiento puede ser hacia afuera o hacia adentro del bobinado.
Algunos de los factores que favorecen este tipo de deformación son, además de la menor rigidez mecánica de la estructura de soporte, en comparación con la del conductor, un deficiente ajuste del bobinado y una eventual excentricidad del mismo.

Sin entrar en los detalles de la demostración, a continuación podemos expresar la relación que permite determinar la fuerza media por unidad de área transversal de cada vuelta del arrollamiento:

$$\sigma m = \frac{E}{12}\left(\frac{e\,Ns}{Dm}\right)^2\left(\frac{Ns^2-4}{Ns^2}\right)$$

En donde:

σm = fuerza media por unidad de área transversal de cada vuelta del arrollamiento.
Dm = diámetro medio del arrollamiento interno.
Ns = cantidad de separadores axiales.
e = grosor del conductor.
E = módulo de elasticidad del material conductor,

Si se asume que Ns >> 1, entonces podemos obtener la cantidad mínima de separadores axiales a instalar en la periferia del arrollamiento.

$$Ns = \frac{Dm}{e}\sqrt{\frac{12\,\sigma m}{E}}$$

NOVA MIRON
SERVICIOS & TRANSFORMADORES

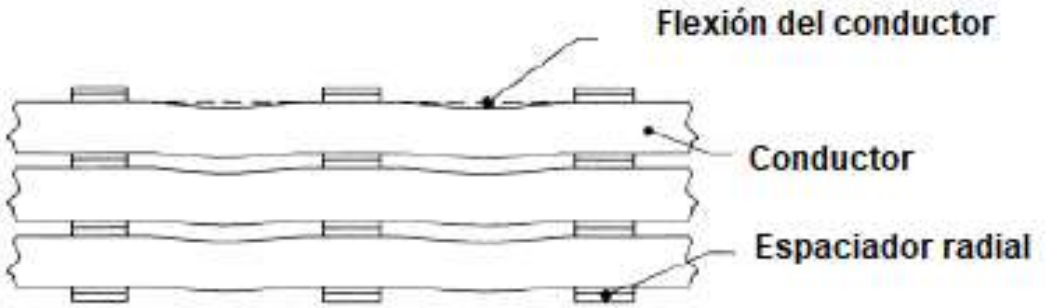
2) Fuerza axial

En este caso, la componente de la fuerza en la dirección axial deberá su causa al flujo de dispersión en la dirección radial, según: Φr → Br ≡ Bx → Fax (componente axial).
Uno de los efectos de la acción de este esfuerzo es que si el arrollamiento no se encuentra bien conformado (bien ajustado vuelta a vuelta) puede producirse un solapamiento o traspaso de vueltas en la columna, provocando así un daño en la aislación.
También puede darse el caso de presentarse vibraciones, por efecto de este esfuerzo axial, llevando a un proceso de desgaste paulatino de la aislación debido al roce entre los conductores y los espaciadores axiales.
Será importante tener en cuenta que el bobinado interior, al estar más cerca de la columna del núcleo magnético, será el que soportará una mayor fuerza de compresión axial, debido a la existencia de una mayor densidad de flujo radial.
A continuación indicaremos los problemas derivados por la acción de este esfuerzo.

a) Flexión entre espaciadores radiales

Una de las consecuencias del esfuerzo axial sobre el bobinado es la de provocar un pandeo de los conductores entre los espaciadores radiales.
En la figura N° 7 se puede observar este efecto.

Figura N° 7



Un detalle a considerar es que el problema más significativo será el daño consecuente sobre la aislación.
Se destaca que el máximo esfuerzo de flexión en el conductor tendrá el siguiente valor:

$$\sigma \max = \frac{\text{Famx}\, d^2\, y}{12\, I_0}$$

En donde:

Famx = máxima carga axial por pandeo (kg/cm).
d = espacio comprendido entre dos espaciadores radiales.
y = máxima distancia entre el eje neutro y un conductor.
I_0 = momento de inercia de una vuelta del bobinado (disco del bobinado).

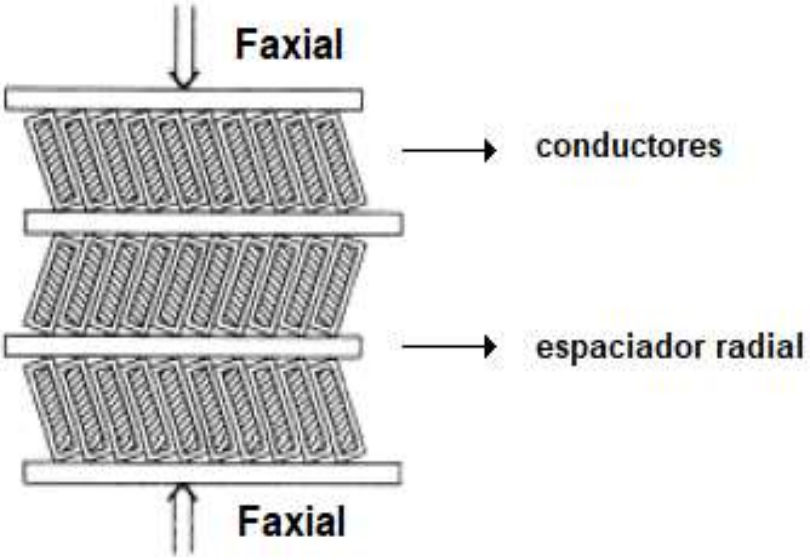
En el diseño del bobinado se tendrá en cuenta que el valor de σmax deberá ser menor al valor límite de solicitación del material conductor utilizado.

b) Inclinación del bobinado

Cuando la fuerza de compresión axial excede un cierto valor, dado por la resistencia mecánica de los conductores y espaciadores radiales, se produce una deformación por inclinación de los conductores que conforman los discos de los bobinados, en una

característica del tipo “zig-zag”, tal como se puede observar en la figura N° 8.

Figura N° 8



Se destaca el giro de la sección transversal de los conductores a través del eje perpendicular de simetría.
Ante esta situación existen dos componentes de la fuerza que se oponen a la inclinación de todo el conjunto de conductores.
La primera componente reactiva es aquella que aporta el material conductor en sí mismo y la segunda la asociada a la fricción entre el conductor y el espaciador radial.
Considerando estas dos componentes reactivas se puede expresar la carga crítica total que puede resistir la acción de la inclinación por la fuerza axial de compresión. Se tiene:

$$Frc = \frac{\pi\, N\, E\, e\, a^2}{6\, R} + \frac{N_r\, N\, b\, c\, e^3}{6\, a}$$

Siendo:

Frc = fuerza reactiva crítica total a la inclinación de los conductores.
N = número de vueltas del bobinado.
e = espesor del conductor en la dirección radial.
a = altura del conductor en la dirección axial.
R = radio medio del arrollamiento.
E = módulo de elasticidad del conductor.
Nr = número de espaciadores radiales.
b = ancho del espaciador radial.

c = constante que depende del material que conforma el espaciador radial.

De la expresión previa, se desprenden dos observaciones importantes. La primera refiere a la disminución de la resistencia a la inclinación con el aumento del radio medio del arrollamiento (R) y la segunda con una disminución de la resistencia ante el uso de conductores delgados en el conformado del arrollamiento.
Este tipo de falla es la causa de daño en la aislación de los conductores, con el consecuente problema asociado entre espiras del bobinado.

Con el fin de evaluar el comportamiento térmico de los bobinados ante un estado de circulación de una corriente de cortocircuito, tendremos en cuenta que el efecto inmediato será el de aumentar la temperatura de los mismos, atendiendo al hecho de que se establece un proceso adiabático.

Debido a que los dispositivos modernos de protección ante cortocircuitos actúan en tiempos del orden de los milisegundos, los efectos nocivos de la corriente no se verán reflejados en los bobinados del transformador.

El límite térmico queda determinado por el valor de temperatura, a partir del cual se genera daño cristalográfico en el material conductor. Para un conductor de cobre, el valor límite es de θmax = 250 °C y para aluminio θmax = 200 °C.

Podemos analizar un caso, adoptando la siguiente expresión de cálculo, correspondiente a un bobinado de transformador con conductor de cobre:

$$\theta f = \theta i + \frac{2\,(\theta i + 235)}{\frac{106000}{\left[\left(\frac{Jn}{Z°/1}\right)^2 t\right]} - 1}$$

Siendo:

θf = temperatura final que alcanza el conductor en estado de cortocircuito (°C).

θi = temperatura inicial del conductor antes del cortocircuito (°C).

Jn = densidad de corriente nominal en el bobinado (A/mm^2).

Z°/1 = impedancia de cortocircuito del transformador en por unidad.

t = tiempo de duración del cortocircuito (s).

Se debe cumplir, para que no haya daño sobre la estructura del bobinado, la relación: θf < θmax.

Si adoptamos una temperatura inicial del conductor en el bobinado de un transformador en aceite de 100 °C, y que posee una Z = 8 %, con una densidad de corriente nominal de 3 A/mm^2, tendremos que el valor de la temperatura final

será de θf = 109 °C, asumiendo que el dispositivo de protección actúa en 1 s, luego de establecido el cortocircuito.

Como vemos, este valor es inferior al límite máximo permitido en el cobre.

En tal sentido, se puede concluir que, en forma general, la integridad térmica de los bobinados de un transformador no se encuentra afectada por la circulación de una corriente de cortocircuito.

2. Fundamentos del análisis electrodinámico

Este análisis tiene su fundamento en dos cuestiones principales.

La primera refiere al sistema mecánico que conforma los bobinados, junto a los soportes de sujeción estructurales de los mismos, determinando así un conjunto masa-elasticidad-amortiguamiento.

La segunda se basa en la naturaleza oscilatoria de la fuerza electrodinámica.

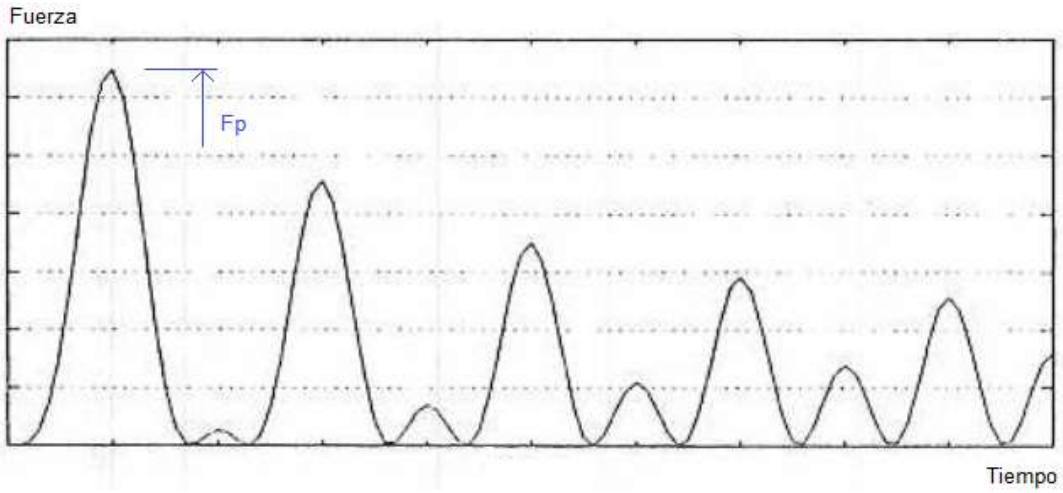
Su representación analítica es la siguiente:

$$F(t) = Fp\left[\frac{1}{2} + e^{\frac{-2t}{T}} - 2e^{\frac{-t}{T}}\cos(\omega t) + \frac{1}{2}\cos(2\omega t)\right]$$

Como ya habíamos indicado en ítem 3 de la Parte1, se encuentra conformada por dos componentes unidireccionales, una constante y la otra decreciente en el tiempo y por dos componentes oscilantes, una de frecuencia de red con amplitud decreciente en el tiempo y la otra de amplitud constante pero de doble frecuencia de red.

En la siguiente figura se muestra la representación en el tiempo de la fuerza electrodinámica.

Figura N° 9



El valor máximo de la fuerza (Fp) se encuentra asociado al valor que alcanza el pico de la corriente (ip). Este valor de corriente dependerá del factor de asimetría (k) que presente la onda de la corriente de cortocircuito, dado por: $ip = k\sqrt{2}\, I''_k$.

Por lo tanto, el análisis dinámico ante un estado de cortocircuito, se basa fundamentalmente en evaluar cómo esta fuerza oscilante en el tiempo interactúa con el sistema conformado por los conductores de los bobinados, la aislación y los soportes de sujeción.

Todos estos componentes introducen en el modelo los parámetros físicos de inercia, elasticidad y amortiguamiento.

Un hecho importante a tener en cuenta es la acción dinámica de la fuerza en la dirección axial, ya que en este caso puede darse una congruencia entre la frecuencia de oscilación de la fuerza y la frecuencia natural de oscilación del sistema conformado por conductor-aislación-soportes.

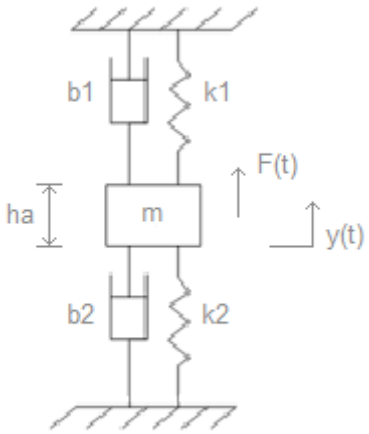
Lo anterior será la causa del establecimiento de un estado de resonancia, lo cual llevará a grandes desplazamientos de los bobinados en la dirección axial y por lo tanto a un eventual estado de falla de los mismos.

Debemos notar que en la dirección axial, el sistema mecánico presenta una mayor capacidad de compresión por la mayor cantidad de aislación, a lo largo de esta dirección.

Se puede realizar un modelo, a través del cual se pueden representar los parámetros dinámicos involucrados en el sistema.

Sin entrar en detalles del cálculo, podemos a continuación establecer las bases de este modelo, en el cual se indica un arrollamiento de altura “ha” y masa “m”, bajo la acción de la fuerza electrodinámica F(t) en la dirección axial “y(t)”.

Figura N° 10



Los parámetros “k” indicados en la figura N° 10 (no confundir con el factor de asimetría “k” de la onda de corriente de cortocircuito) refieren a las elasticidades de los soportes superior e inferior del bobinado y los parámetros “b” a las correspondientes amortiguaciones mecánicas de los mismos.

Sin entrar en los detalles de la resolución de este sistema dinámico, diremos que los resultados de éste deben determinar el desplazamiento a través del tiempo “y(t)” del arrollamiento, así como la frecuencia natural del sistema.

En cuanto a la acción dinámica sobre la dirección radial, nos encontramos que en esta dirección el conductor ofrece una mayor capacidad elástica (k), así como una menor inercia (m).

Entonces, la frecuencia natural del sistema será, por lo general, mucho mayor que las correspondientes frecuencias de excitación $\left(fn \sim \sqrt{\frac{k}{m}}\right)$, por lo que, en este caso, estaremos lejos de establecer un eventual estado de resonancia y de una consecuente amplificación significativa del desplazamiento radial del bobinado.

Las fuerzas radiales quedan determinadas a través del establecimiento de un esfuerzo máximo, asociado al valor pico (Fp) de F(t) y la energía almacenada por el desplazamiento radial del arrollamiento será fundamentalmente elástica.

Recordemos que el objetivo del diseño del sistema arrollamientos-soportes será el de obtener una frecuencia natural de oscilación lo menos cercana posible a la frecuencia de excitación dada por la F(t), evitando de tal forma un estado de resonancia.

Se deberán evitar frecuencias naturales del sistema mecánico que sean cercanas a los 50 Hz (para los primeros ciclos de la fuerza, durante el proceso transitorio) y de 100 Hz (para el estado estacionario de la fuerza).

3. Incidencia en el ciclo de vida del transformador

Vamos a listar un conjunto de condiciones, a tener en cuenta en la etapa de pre puesta en servicio del ciclo de vida del transformador, relacionadas con las solicitaciones al cortocircuito, al momento de establecer las especificaciones, diseño y fabricación del mismo.

Desde el punto de vista de las especificaciones, tendremos:

- Altos valores de la impedancia de cortocircuito para el caso de transformadores críticos.
- Altos valores de la impedancia de puesta a tierra del neutro, para los sistemas de transmisión y distribución.
- Tener en cuenta los niveles de cortocircuito del SEP, atendiendo a la ubicación del transformador.
- Evaluar la conveniencia del uso de un tercer arrollamiento, para fines de estabilización, en transformadores con núcleo de tres columnas. En lo posible deberá evitarse.
- Evaluar la conveniencia de utilizar arrollamientos del tipo “partidos” o “divididos”. En lo posible deberá evitarse.
- Determinar la correcta disposición de los bobinados, de forma tal de minimizar los esfuerzos de cortocircuito.

Desde el punto de vista del diseño de la máquina, podemos establecer:

- Analizar y evaluar las condiciones operativas del transformador en la instalación, atendiendo a los niveles y tipos de cortocircuitos que pueden presentarse.
- Con el fin de que el bobinado pueda resistir los esfuerzos radiales de manera confiable, se deberán calcular las dimensiones del conductor, considerando que éste soportará por sí mismo la solicitación, es decir, sin considerar la reacción de los soportes.
- Adoptar menores valores de densidades de corrientes que los convencionales, para el caso de bobinados de transformadores críticos.
- En el caso de que se requiera incorporar un arrollamiento terciario estabilizador, también adoptar en el diseño valores menores de las densidades de corrientes.
- Obtener o estimar la frecuencia natural de oscilación del sistema bobinados-estructuras de soporte, de forma tal de evitar el proceso de resonancia.
- Usar cilindros más gruesos para contener al arrollamiento interno.
- Adoptar una mayor relación de esbeltez para el diseño del bobinado interno, de forma tal de aumentar la resistencia a la compresión, ante la acción de los esfuerzos radiales.

- Utilizar, para el conformado de los bobinados, materiales con resistencias mecánicas certificadas en hojas de especificación y ensayos del fabricante.

Para la fabricación se tendrá:

- Implementar un proceso de control riguroso en la fabricación y montaje de los bobinados.
- Adquirir los materiales, que conforman los bobinados, de proveedores calificados y con procesos de calidad certificados en la fabricación.
- Adoptar estructuras de anclaje de adecuada rigidez y correcta fijación a los bobinados.
- Usar, en lo posible, cilindros de soporte para el arrollamiento interno, con material de fibra de vidrio.
- Proceder a un correcto y preciso posicionamiento de los soportes radiales y axiales.
- Asegurar un bobinado firme y ajustado de los conductores en la dirección radial.
- Evitar las rebabas en los separadores, de forma tal de que no se dañe la aislación de papel de los conductores.
- Asegurar una fijación correcta de las conexiones del conmutador y de los bushings.

NOVA MIRON
SERVICIOS & TRANSFORMADORES

4. Conclusiones

- La integridad térmica de los bobinados de un transformador no se encuentra afectada por la circulación de la corriente de cortocircuito. De tal forma, la capacidad térmica al cortocircuito no representa un factor determinante en el diseño del transformador.

- Es muy importante evaluar la acción dinámica de la fuerza de cortocircuito sobre los bobinados del transformador, en especial en la dirección axial. El diseño del sistema conductor-aislación-soportes deberá evitar tener una frecuencia natural de oscilación cercana a la de excitación, de forma tal de que no se establezca un estado de resonancia.

- Por lo tanto, el análisis dinámico es una etapa muy importante en la fase de diseño del transformador, ya que permite incrementar la confiabilidad operativa de éste ante condiciones de cortocircuito en la instalación.

- Los modos de fallas en los bobinados externo e interno debido a la acción de esfuerzos radiales son diferentes. En el arrollamiento externo, la capacidad de soportar el esfuerzo radial dependerá principalmente de la

resistencia mecánica a la tracción que tenga el material conductor que lo conforma. Por otra parte, la resistencia del arrollamiento interno ante el esfuerzo radial, dependerá del diseño y la configuración del sistema de soportes.

- La acción de los esfuerzos axiales pueden llevar a la deformación de los bobinados y en las estructuras de anclajes en los extremos de los mismos. Hay que tener muy en cuenta que las estructuras de anclaje en los extremos de los bobinados juegan un rol fundamental en la capacidad de éstos para soportar las fuerzas axiales durante el cortocircuito.

- La falla por inclinación de los bobinados, debido a la acción de los esfuerzos de compresión axial, es una de las más importantes en los transformadores de potencia.

Ingenieria Nova Miron S.A.

NOVA MIRON
SERVICIOS & TRANSFORMADORES