

ANÁLISIS DE FLUJO DISPERSO EN 3D Y DISTRIBUCIÓN DE TEMPERATURA EN TRANSFORMADORES DE POTENCIA TIPO ACORAZADO

Ing. Salvador Magdaleno A., M en C. Rodrigo Ocón V., Ing. Armando Rodríguez R., Ing. Álvaro Cancino Q.
smagdaa@condumex.com.mx rocon@condumex.com.mx jarronero@condumex.com.mx acancino@condumex.com.mx

*Industrias IEM S.A de C.V. Vía Dr. Gustavo Baz No. 340,
 Tlalneantla Edo. De México CP 54000. Tel. 57 29 97 00, Fax 53 10 04 79

RESUMEN

Se presenta la metodología de cálculo de flujo disperso en 3D para transformadores de potencia tipo acorazado utilizando el método de elemento finito. Con la ayuda de un software comercial se determina la distribución de flujo disperso en el transformador considerando su geometría, propiedades de materiales y distintas condiciones de carga. A partir del cálculo del campo disperso es posible verificar variables de diseño tales como la impedancia de dispersión, distribución de pérdidas por corrientes de eddy e indeterminadas en los devanados y componentes estructurales, estimación de temperaturas en vigas T y nivel de saturación de los blindajes magnéticos bajo condiciones de sobrecarga.

En este artículo se presenta en forma general la metodología seguida y las consideraciones adoptadas para la construcción, solución y análisis de los modelos de elemento finito para cálculo de flujo disperso en transformadores tipo acorazado.

Palabras Clave: Transformadores, Acorazado, Flujo disperso, Elemento Finito, Pérdidas indeterminadas.

1. INTRODUCCIÓN

Tradicionalmente, los fabricantes han contado con métodos analíticos que son en parte empíricos, ya sea derivados de prototipos experimentales, de la experiencia en unidades probadas ó de la literatura realizada en la primer parte y durante el siglo XX sobre cálculo de parámetros y distribuciones de campo en transformadores de gran potencia [1]. Sin embargo, hoy en día, gracias al uso de modernos programas de cálculo (basados en formulaciones de elemento finito, elementos frontera, diferencias finita, etc.) y con la ayuda de la computadora digital, muchos de estos problemas se han retomado nuevamente para obtener soluciones más precisas que permitan optimizar los diseños y al mismo tiempo proporcionar una mayor confiabilidad de estos importantes equipos durante su vida útil. El flujo disperso en los transformadores se define como aquel flujo magnético que no enlaza ambos devanados y que prácticamente se encuentra fuera del núcleo magnético. Este flujo es responsable de inducir el conocido voltaje de impedancia (ó simplemente impedancia de dispersión), la cual representa la capacidad del transformador para limitar la corriente de corto circuito. El flujo disperso es el responsable de producir pérdidas en las componentes estructurales del transformador.

El conocimiento preciso de la distribución de flujo disperso es de vital importancia durante el proceso de diseño para la determinación de parámetros operativos (como la impedancia, nivel de corriente máxima de corto circuito, regulación de voltaje, etc.), además de verificar la no existencia de puntos calientes (*hot spots*) en bobinas, tanque y los componentes estructurales.

Los transformadores tipo acorazado tienen una construcción básica en la cual los devanados de alta y de baja tensión se encuentran rodeados por el núcleo magnético, ver Figura 1.

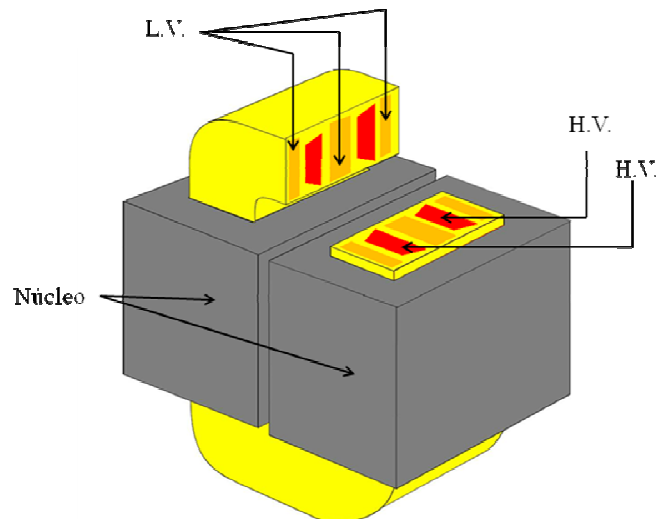


Figura 1. Ensamble núcleo-bobinas de un transformador tipo acorazado

Estos ensambles de núcleo bobinas son colocados dentro de un tanque ajustado en forma. Las bobinas tipo galleta son ensambladas dentro de grupos de bobinas con sus caras adyacentes cubiertas con rondanas planas de cartón prensado (*pressboard*) las cuales tienen bloques espaciadores en su superficie. Estos bloques espaciadores proporcionan un soporte uniforme para las vueltas de las bobinas y caminos para el flujo del aceite, que permiten la adecuada disipación de calor.

A diferencia de los transformadores tipo columna, en donde las configuraciones de bobinas son concéntricas y raras veces entrelazadas, los arreglos de bobinas en transformadores tipo acorazado pueden ser de 1, 2, ó 4 espacios alta-baja. Un ejemplo de ellos se muestra en la Figura 2, mostrando un arreglo típico de un transformador con 4 espacios alta-baja (4H-L).

RVP-AI/2009 – TRO-13 PONENCIA RECOMENDADA
 POR EL **COMITÉ DE TRANSFORMADORES** DEL
CAPÍTULO DE POTENCIA DEL IEEE SECCIÓN MÉXICO
 Y PRESENTADA EN LA **REUNIÓN DE VERANO, RVP-**
AI/2009, ACAPULCO GRO., DEL 5 AL 11 DE JULIO DEL 2009.

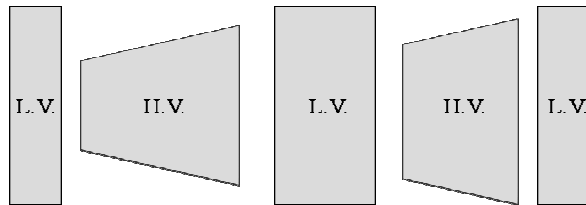
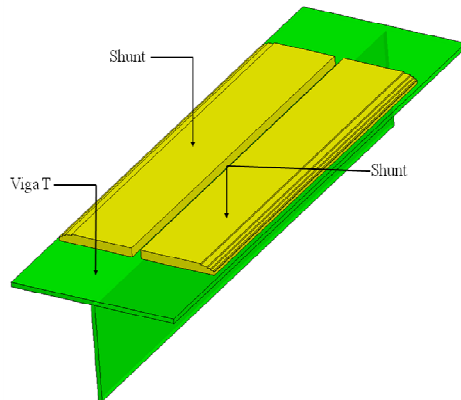
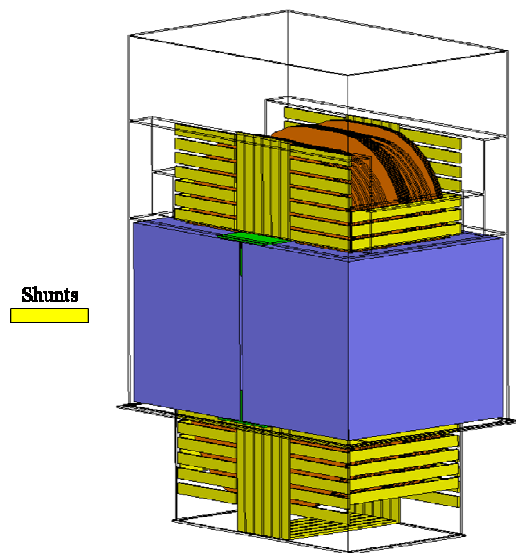


Figura 2. Arreglo con 4 espacios alta-baja

Debido al flujo disperso, el tanque y las componentes de soporte mecánico (vigas T) deben ser protegidas por medio de blindajes magnéticos (shunts), ver Figura 3.



(a)
Shunts magnéticos de las vigas T



(b)
Shunts magnéticos del tanque

Figura 3. Blindajes magnéticos en un transformador acorazado

En la Figura 3(a) se puede observar que las vigas T solamente son protegidas en sus miembros horizontales. Los miembros verticales no son protegidos por ningún shunt ya que están entre las dos partes en que se divide el núcleo magnético. En la Figura 3(b) se puede apreciar que tanto las paredes del tanque inferior como el superior son protegidas con shunts.

Los shunts magnéticos son fabricados de acero al silicio de grano orientado, con las mismas propiedades que el acero utilizado para la fabricación de los núcleos magnético.

2. EL MÉTODO DE ELEMENTO FINITO (MEF)

El método de elemento finito (MEF) es un método numérico utilizado para resolver problemas de ingeniería y la física, mediante la solución numérica de las ecuaciones diferenciales parciales que gobiernan el fenómeno.

El concepto fundamental del método de elemento finito es que dada una función continua en un dominio, tal como la temperatura, la presión, el potencial eléctrico, etc. éstas pueden ser aproximada por un modelo discreto compuesto por un conjunto de funciones continuas seccionadas, definidas sobre un número finito de sub-dominios, llamados precisamente “elementos finitos”. Esta técnica es conocida como la técnica de descomposición del dominio. Las funciones seleccionadas son definidas mediante los valores de la función en un número finito de puntos de su dominio llamados nodos de la malla de elementos finitos, en la que se descompuso el dominio.

La solución numérica consiste en determinar los valores de las ecuaciones diferenciales parciales establecidas en cada elemento, uniendo o “ensamblando” las soluciones individuales. A menudo se utilizan polinomios para este propósito. Cabe mencionar que hay que tener cuidado de asegurar la continuidad de las fronteras entre los elementos. De este modo, la ecuación diferencial parcial se satisface por secciones.

En cualquier sistema por analizar se pueden distinguir los siguientes elementos:

- *Dominio.* Espacio geométrico donde se va a analizar el sistema.
- *Condiciones de frontera.* Variables conocidas y que condicionan el cambio del sistema: Voltajes, corrientes, cargas, desplazamientos, temperaturas, fuentes de calor, etc.
- *Incógnitas.* Variables del sistema que deseamos conocer después de que las condiciones de frontera han actuado sobre el sistema: Campos electrostáticos, campos electromagnéticos, desplazamientos, deformaciones, temperaturas, etc.

3. DISTRIBUCIÓN DE FLUJO DISPERSO EN TRANSFORMADOR TIPO ACORAZADO

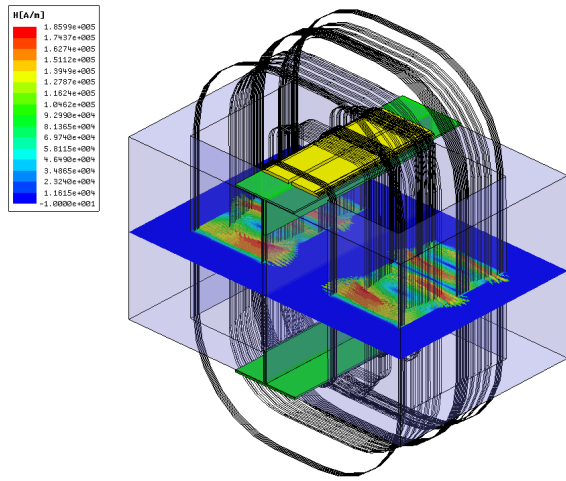
Para el cálculo del flujo disperso se realizó un análisis magnético estático usando el software comercial Maxwell 3D® de Ansoft.

Debido a la falta de simetría en la región superior e inferior del transformador tipo acorazado, este se modeló en tres dimensiones. El transformador utilizado para el estudio tiene las siguientes características:

- Potencia nominal: 300 MVA
- Voltaje de alta tensión: 400 kV
- Voltaje de baja tensión: 21.5 kV
- Frecuencia: 60 Hz
- Tipo de enfriamiento: FOA

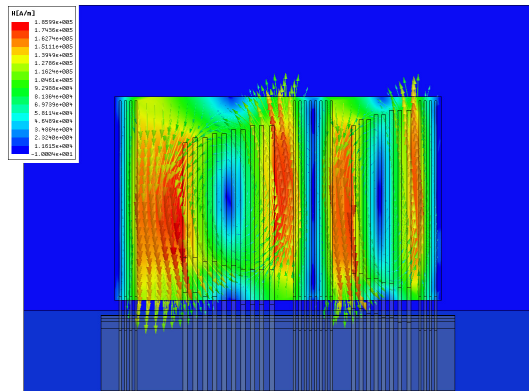
La simulación se realizó a potencia y voltajes nominales, los valores de fuerza magneto-motriz (F_{mm}) aplicadas a cada bobina del transformador se introducen como valores pico, para determinar la inducción máxima.

En la Figura 4 se muestra un mapeo con la distribución del campo disperso en las ventanas del núcleo del transformador.



(a)

Distribución vectorial de la intensidad de campo disperso



(b)

Distribución de la intensidad de campo disperso entre bobinas y espacios alta-baja en una de las ventanas del núcleo

Figura 4. Campo disperso entre bobinas y espacios alta-baja encerrados por el núcleo magnético

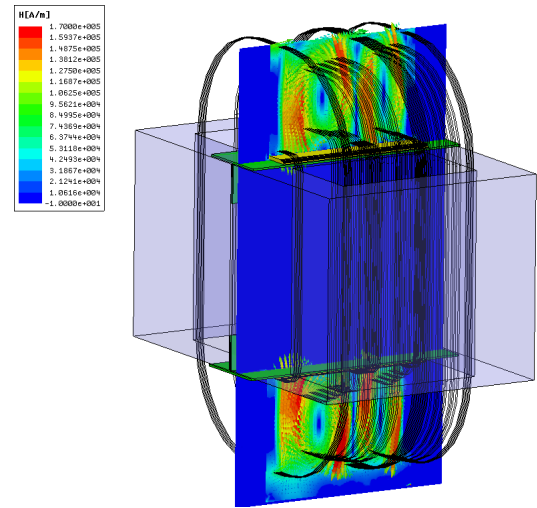
En la Figura 4(a) se puede ver que no existe un campo magnético neto circulando alrededor del núcleo magnético. Esto indica que el campo disperso solo entra por pequeñas porciones del núcleo pero no lo llega a magnetizar. De igual forma se puede ver que la distribución de campo disperso es la misma en ambas ventanas del transformador ya que estas son geoméricamente simétricas.

En la Figura 4(b) se observa que el campo disperso se concentra en los espacios alta-baja y por lo tanto allí se encuentra el valor máximo de intensidad de campo disperso. Podemos verificar además, que el campo disperso solo enlaza a cada uno de los devanados que lo crea, pero no enlaza dos devanados a la vez. El flujo disperso queda delimitado por el núcleo magnético.

La distribución de campo disperso es diferente en la región superior e inferior del transformador ya que ambas regiones no están acotadas por una estructura magnética cercana, solamente por los shunts magnéticos del tanque y de las vigas T. En la Figura 5 se puede ver la distribución de la intensidad de campo disperso en la región superior e inferior del transformador acorazado.

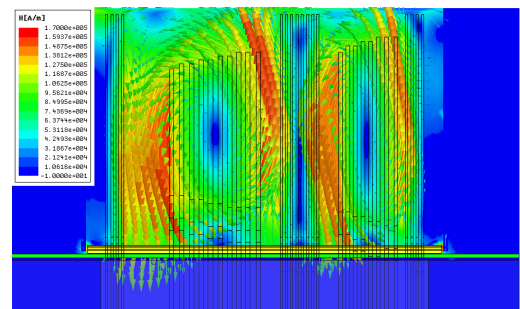
En la Figura 5(a), (b) y (c) se puede observar nuevamente que el campo disperso es máximo en los espacios alta-baja. Se puede ver que este flujo disperso incide sobre los shunts más

cercanos que son los de las vigas T y regresa a las bobinas. Los shunts evitan que el flujo disperso haga contacto con la superficie horizontal de las vigas T.



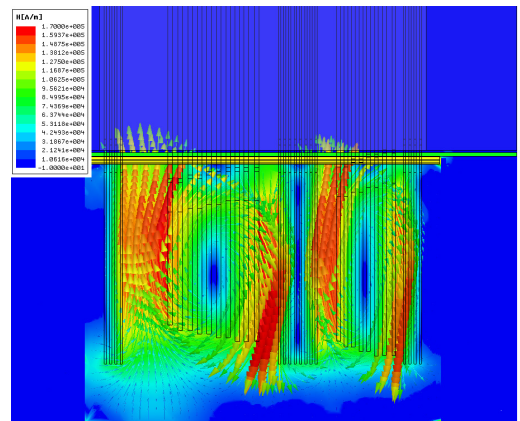
(a)

Distribución de la magnitud de la intensidad de campo disperso en la región superior e inferior del transformador acorazado



(b)

Distribución vectorial de la intensidad de campo disperso en la región superior del transformador acorazado



(c)

Distribución vectorial de la intensidad de campo disperso en la región inferior del transformador acorazado

Figura 5. Campo disperso entre bobinas y espacios alta-baja en la región superior e inferior del transformador acorazado

4. CÁLCULO DE IMPEDANCIA

A partir del campo disperso es posible calcular el valor de impedancia de dispersión en función de la energía magnética total. La impedancia se determina aplicando la ecuación (1). En la Tabla 1 se muestra la comparación de los resultados

obtenidos con la simulación, la formulación analítica utilizada por el programa de diseño y el valor final medido en pruebas.

$$L = \frac{2 W_m}{I^2} = \frac{1}{I^2} \int_{vol} \mathbf{B} \cdot \mathbf{H} dv = \frac{1}{I^2} \int_{vol} \mathbf{A} \cdot \mathbf{J} dv \quad (1)$$

Donde:

- L = Inductancia de dispersión [H]
- W_m = Energía magnética total [J]
- I = Corriente [A]
- \mathbf{B} = Densidad de flujo magnético [T]
- \mathbf{H} = Intensidad de campo magnético [A/m]
- \mathbf{J} = Densidad de corriente [A/m²]
- \mathbf{A} = Potencial vectorial magnético [Wb/m]

Tabla 1. Comparación de resultados de impedancia de dispersión

Energía (J)	Ldisp (H)	Xdisp (Ω)	Xbase	%Z (MEF)	%Z (Formula analítica)	%Z (Medida)
45834	5.43e-2	20.47	177.7	11.51	11.74	11.65

Los resultados anteriores indican que la variación entre la simulación, la formulación analítica y el valor medido en laboratorio, es muy pequeña, validando de esta forma el modelo.

5. DENSIDAD DE FLUJO MAGNÉTICO MÁXIMA EN BLINDAJES MAGNÉTICOS

Los blindajes (shunts) magnéticos fueron modelados como materiales anisotrópicos, no lineales, y se tomo en cuenta el sentido de la laminación de los mismos, para considerar el efecto de “núcleo laminado”. Al modelarlos en forma anisotrópica los shunts tienen una curva de magnetización diferente en las direcciones transversal y de rolado, como se muestra en la Figura 6.

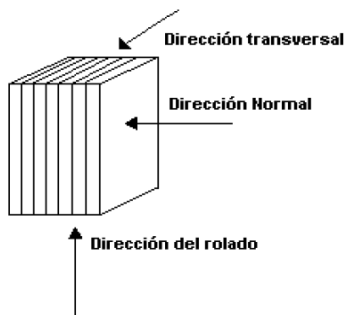
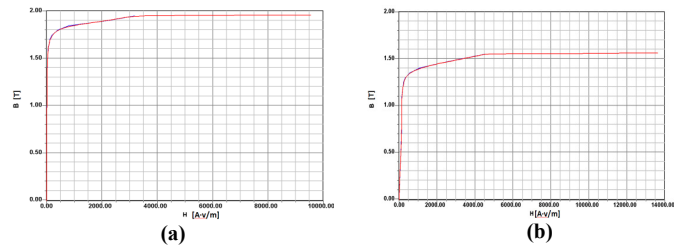


Figura 6. Shunt magnético [4]

Para modelar los shunts magnéticos se utilizó acero al silicio de grano orientado grado M-3. A cada uno de los shunts del modelo se les asignó una curva de magnetización en el sentido de rolado (0°) y en la dirección transversal (90°). En la dirección normal la permeabilidad que predomina es la de aire o la del carlita (recubrimiento aislante), por lo que se considera que la permeabilidad relativa en esa dirección es cercana a 1. En la Figura 7 se muestran las curvas de magnetización usadas para modelar los shunts magnéticos.



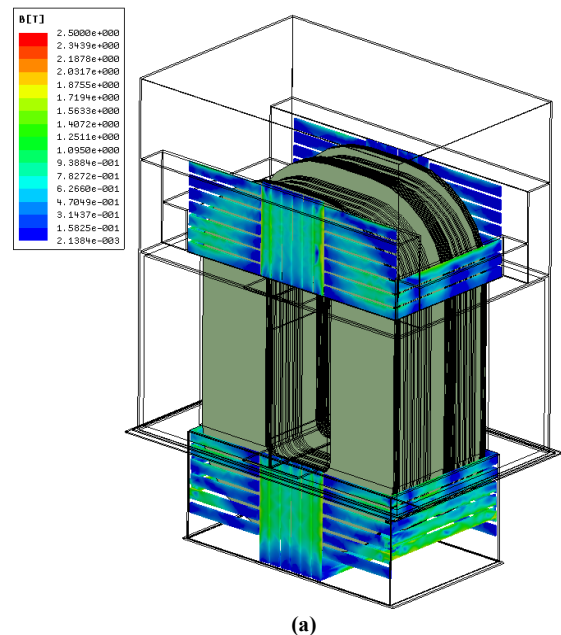
Curva de magnetización para un ángulo de rolado de 0°

Curva de magnetización para un ángulo de rolado de 90°

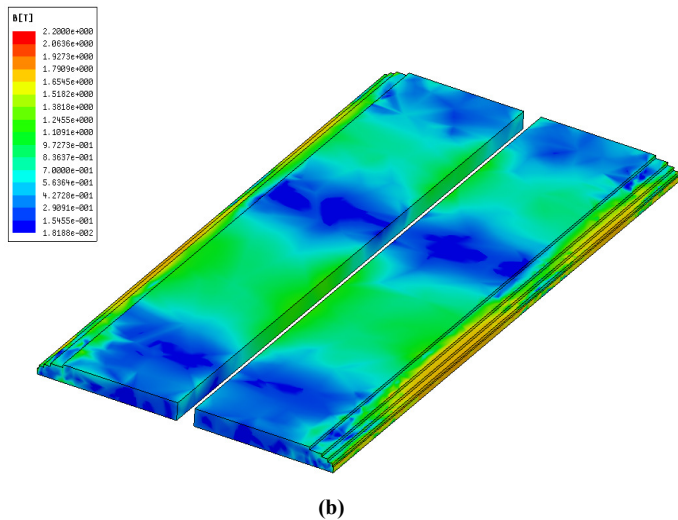
Figura 7. Curvas de magnetización en la dirección de rolado y en la dirección transversal de los shunts magnéticos

En la Figura 8 se muestra un mapeo de las densidades de flujo magnético en los shunts situados en la pared del tanque y en las vigas T. El flujo magnético que circulan por el área de sección transversal de cada shunt de la pared del tanque, varía en un rango de 0.05 T hasta 1.05 T, calculado en el área de sección transversal localizada a la mitad de la longitud de cada shunt, ver Figura 8(a).

La Figura 8(b) muestra el mapeo de densidad de flujo sobre la viga T. Se determinó el flujo disperso en diferentes áreas de sección transversal de los shunts de las vigas T, tanto en las regiones de las bobinas de alta tensión como en las regiones de las bobinas de baja tensión. En la misma figura se puede ver que las mayores densidades de flujo magnético tienen un valor de 1.6 T y están localizadas en las regiones de las bobinas de alta tensión. Estas regiones son principalmente los escalones exteriores de los shunts. Esto es debido a que la sección transversal de los escalones es más pequeña que en la parte del shunt que no tiene escalones y por lo tanto tiende a tener valores mayores de densidad de flujo magnético.



Magnitud de la densidad de flujo magnético en los shunts del tanque



Magnitud de la densidad de flujo magnético en los shunts de las vigas T

Figura 8. Densidad de flujo magnético en los shunts del transformador

Integrando matemáticamente el flujo magnético que pasa por la sección transversal del shunt, en la región de las bobinas de alta tensión, a la mitad del arreglo de las bobinas, nos arroja un valor promedio de densidad de flujo magnético de 0.9 T.

La Figura 9 muestra la densidad de flujo magnético en la superficie de las vigas T; verificando de esta forma que la densidad de flujo en los miembro horizontales de las vigas T es menor de 0.1 T. Lo anterior ratifica la eficiencia de los blindajes (shunts) en las vigas T. En los miembros verticales el valor de densidad de flujo magnético es 10 veces menor.

6. PÉRDIDAS EN COMPONENTES ESTRUCTURALES Y ELEVACIÓN DE TEMPERATURA

A partir de las distribuciones de campo disperso se analizan las pérdidas generadas por este campo en las vigas T usando un análisis armónico a la frecuencia fundamental de 60 Hz. Principalmente se analizan las pérdidas en las vigas T ya que son una de las partes estructurales que es más afectada por el flujo disperso. Las vigas T de los transformadores acorazados están formadas por un miembro vertical y uno horizontal, en algunas ocasiones las vigas T están hechas en su totalidad de acero inoxidable pero en este caso las vigas están hechas de dos materiales: el miembro vertical es acero al carbón y el miembro horizontal es de acero inoxidable.

Para el análisis de pérdidas fue necesario el uso de fronteras de impedancia [5] en los miembros verticales de las vigas T, para evitar hacer una malla muy fina en esos volúmenes debido a que el espesor de esos miembros es mayor que la penetración de campo (*skin depth*) del acero al carbón. Esto ayuda a disminuir enormemente el tiempo de cómputo.

En la Figura 10 se pueden ver la distribución de densidades de corriente inducida en las vigas T.

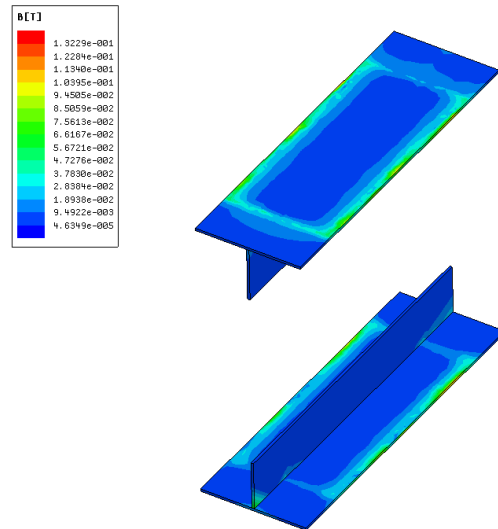
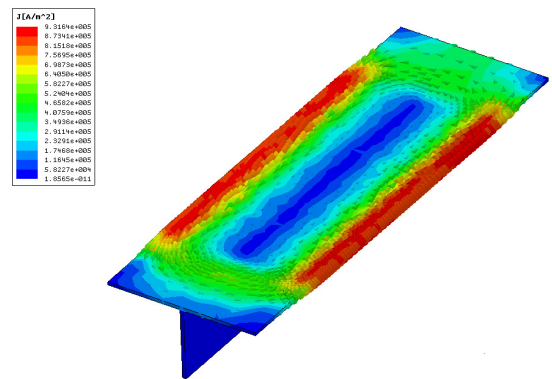
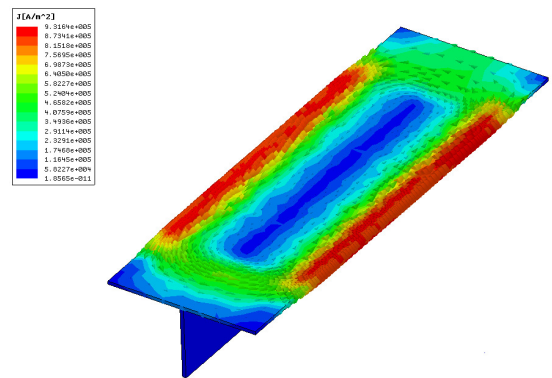


Figura 9. Distribución de la densidad de flujo magnético en las vigas T



Distribución de la densidad de corriente inducida en la viga T superior



Distribución de la densidad de corriente inducida en la viga T inferior

Figura 10. Distribución de las densidades de corriente inducida en las vigas T

En la Tabla 2 se muestran los valores de pérdidas calculadas en las vigas T, tanto superior como inferior.

Tabla 2. Pérdidas en vigas T del transformador acorazado

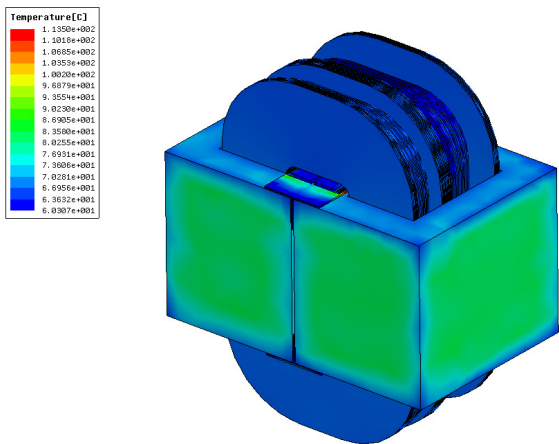
Vigas T	Miembro horizontal (W)	Miembro vertical (W)	Total (W)
Viga superior	6176.41	0.069	6176.479
Viga inferior	5940.71	0.085	5940.795

Posteriormente ya calculadas las pérdidas en las vigas T se procede a realizar el análisis térmico estático. El mismo modelo es analizado añadiendo las propiedades térmicas a los materiales del transformador.

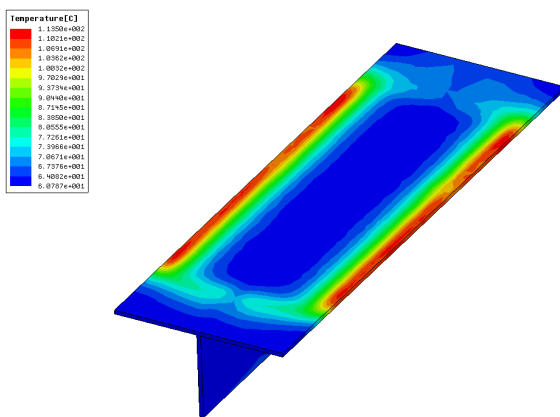
Para el análisis térmico se utilizan como fuentes de calor las pérdidas obtenidas en los miembros verticales y horizontales de las vigas T, las pérdidas por bobina y las pérdidas del núcleo, estas dos últimas calculadas con ayuda del programa de diseño.

Para el análisis térmico fue necesario agregar fronteras de convección a las diferentes partes del transformador para simular la interacción de las bobinas con el aceite circulante y su acción refrigerante. Estas mismas fronteras requieren un coeficiente de convección (h), el cual fue obtenido mediante una simulación de fluido-térmico calculada con ANSYS®. El valor promedio calculado y utilizado para este caso es de 100 W/m²·°C. De igual forma, esta frontera requiere una temperatura uniforme, que representa la temperatura del aceite circundante. El valor asignado corresponde con la temperatura del aceite en la parte superior del transformador (*top oil*) igual a 60.2°C en este caso. La Figura 12 muestra la distribución de temperatura calculada en el núcleo y vigas T.

Las vigas T alcanzaron una temperatura promedio de 64°C en los miembros horizontales y una temperatura promedio de 62°C en los miembros verticales; el núcleo en sus caras laterales alcanzó una temperatura de 80°C, en este caso.



(a) Distribución de temperatura en el núcleo magnético



(b) Distribución de temperatura en vigas T

Figura 12. Distribución de temperatura en el transformador

7. CONCLUSIONES

Debido a la falta de simetría en las regiones superiores e inferiores de un transformador tipo acorazado, normalmente es necesario recurrir a modelos complejos en 3D para estudios de distribución de campos. La metodología anteriormente descrita, en general, es aplicable para cualquier otro dispositivo eléctrico.

El uso de programas especializados, para el cálculo preciso en 3D de la distribución de flujo disperso en transformadores y equipos complejos, es una práctica indispensable para garantizar las óptimas condiciones de operación durante la vida útil de los equipos.

Reconociendo que el transformador es un sistema tridimensional con campos multi-acoplados (térmico, electromagnético, mecánico, fluidos, etc.) e incluyendo materiales no lineales y anisotrópicos, el cálculo preciso de sus parámetros sigue siendo un reto para los diseñadores, especialmente ahora que los objetivos perseguidos se encaminan a fabricar equipos compactos, altamente confiables y económicamente accesibles.

8. REFERENCIAS

- [1] R. S. Girgis, D. A. Yannucci, J. B. Templeton, "Performance Parameters of Power Transformers using 3D Magnetic Field Calculations", IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, vol. PAS-103, No. 9, page(s): 2708–2713, September 1984.
- [2] Triumphant N, Gérard M, J. Claude S, "2-D Finite Element Calculation of Shell Losses in Power Transformers, taking 3rd dimension into account by means of a correction factor", IEEE Transactions on Magnetics, vol. 26, No. 2, page(s): 925–928, March 1990.
- [3] Xiang Cui; Guoqiang Zhang, "Automatic design of impedance in shell form power transformer", IEEE Transactions on Magnetics, vol 36, No. 4, page(s):1822–1825, July 2000.
- [4] Jose A. Rodriguez R, "Cálculo de pérdidas por flujos dispersos en transformadores de potencia utilizando el método del elemento finito", Tesis que para obtener el título de Ingeniero Mecánico Electricista, UNAM, México, 2008.
- [5] Raj Ahuja, Robert M. Del Vecchio, "Transformer Stray Loss and Flux Distribution Studies Using 3D Finite Element Analysis", Waukesha Electric Systems, USA.

AUTORES



Salvador Magdaleno A (La Piedad, Mich, 1983). En el 2008 obtuvo el grado de Ingeniero Electricista por parte de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. Desde el 2003 ha realizado algunas investigaciones sobre campos electromagnéticos en transformadores toroidales incluyendo la aplicación de entrehierros virtuales dentro de núcleos magnéticos

toroidales. Desde Septiembre del 2008 labora como Ingeniero en Investigación y Desarrollo en el área de Tecnología de Transformadores de Potencia de Industrias IEM, S.A. de C.V. Sus áreas de investigación incluyen cálculos numéricos de campos electromagnéticos utilizando el método de elemento finito y modelado de transformadores y reactores de potencia utilizando el principio de dualidad.



Rodrigo Ocón V. Egresado de la Escuela Nacional de Estudios Profesionales Aragón U.N.A.M. donde obtuvo el título de Ingeniero Mecánico-Electricista en 1995. Desde 1995 labora en el área de Ingeniería y desarrollo de Transformadores de Potencia de Industrias IEM, S.A de C.V.

Diplomado en Máquinas Eléctricas en la sección de estudios de posgrado del I.P.N. en el 2000. En el 2004 obtuvo el grado de Maestro en Ciencias en Ingeniería Eléctrica en la sección de estudios de posgrado del I.P.N y es profesor definitivo de Ingeniería en la Facultad de Estudios Superiores (FES) Aragón U.N.A.M.



Armando Rodriguez Romero. Egresado de la Facultad de Estudios Superiores "Aragón" (U.N.A.M.) en 2002 como Ingeniero Mecánico Electricista. Desde 2004 labora en el área de Ingeniería y Desarrollo de Transformadores de Potencia de Industrias IEM, S.A. de C.V. como Ingeniero Investigador, donde ha realizado diversos análisis y simulaciones vinculados al fenómeno eléctrico y magnético del Transformador.



Álvaro Cancino Quiroz. Egresado de la Universidad Nacional Autónoma de México (U.N.A.M) en 1975 como Ingeniero Mecánico Electricista. Maestría en Ingeniería Económica en la Universidad la Salle en 1995. Diplomado en Máquinas Eléctricas en la sección de estudios de posgrado del I.P.N. en el 2000. 30 años de experiencia en Industrias IEM como Ingeniero de Pruebas, Ingeniero de Diseño e Ingeniero de Desarrollo. Miembro Senior del I.E.E.E. y Coordinador del Subcomité 12 de CIGRE sección México de Transformadores. Actualmente: Gerente de Tecnología de Transformadores en Industrias IEM, S.A. de C.V.