

Determinación de las Pérdidas en el Hierro de un Transformador de Potencia Empleando Elementos Finitos

Cesar Castillo Cáceres, Ms.¹, Jorge Castro Valdivia, Ms.²

¹Universidad Católica de Santa María, Arequipa, Perú, ccastill@ucsm.edu.pe

²Universidad Católica de Santa María, Arequipa, Perú, jlcastro@ucsm.edu.pe

Resumen.— El cálculo de las pérdidas de potencia en el núcleo de un transformador trae consigo pérdidas por el ciclo de histéresis y pérdidas por corrientes parasitas, para hallar tales magnitudes es necesario partir de la ecuación de difusión que se deduce a partir de las ecuaciones de Maxwell. La dificultad de resolución de esta ecuación es muy grande cuando se aplica a geometrías complejas como las que nos encontramos en las máquinas eléctricas.

La aplicación del método de los elementos finitos a los cálculos en electromagnetismo, a la ingeniería eléctrica y por supuesto las máquinas eléctricas han supuesto la superación de esta dificultad. La aplicación del método de los elementos finitos permite el cálculo del campo magnético en prácticamente cualquier geometría, incluso tridimensional esto con ayuda de un software especializado.

En este sentido se puede considerar que el problema del cálculo de pérdidas en el núcleo de un transformador aplicando elementos finitos es posible con la ayuda de un software adecuado y el correcto modelamiento del problema.

Aplicando el presente tema de investigación basado en el Método de Elementos Finitos con aplicación en la Ingeniería Eléctrica se calculara las pérdidas producidas en el núcleo de un transformador sin necesidad de construirlo y realizar el ensayo en vacío, esto en la etapa de simulación con resultados viables, este tema en el ámbito industrial será de gran ayuda para las empresas dedicadas a diseñar transformadores ya que podrán diseñar prototipos de núcleos de transformadores sin la necesidad de construirlos.

Palabras clave- Pérdidas en el hierro, elementos finitos, núcleo del transformador, campo magnético.

I. INTRODUCCIÓN

El método de los elementos finitos es relativamente nuevo, ya que sus inicios datan del año 1941, pero no fue hasta 1960 cuando Clough, utilizó por primera vez el término de elemento finito y en 1967 fue publicado el primer libro de elemento finito por Zienkiewicz y Chung. Fueron muchos los desarrollos, trabajos, investigaciones, experimentos, análisis e inversiones de tiempo y dinero para poder tener en el método de los elementos finitos, una poderosa herramienta de trabajo.

Con los grandes avances tecnológicos que se han logrado en el área de la computación y sobre todo en los sistemas de diseño asistido por computadora, ahora es relativamente más fácil la modelación de prototipos, en los cuales podemos tener geometrías y superficies complicadas e irregulares.

El Método de los elementos finitos (FEM) permite realizar un modelo matemático de cálculo del sistema real, más fácil y económico de modificar que un prototipo. Sin embargo, no deja de ser un método aproximado de cálculo debido a las hipótesis básicas del método. Los prototipos, por lo tanto, siguen siendo necesarios, pero en menos número, ya que el primer ensayo puede acercarse bastante más al diseño óptimo.

El emplear los elementos finitos, puede llegar a ser un método matemático muy complejo, ya que sus fundamentos están basados en el estudio de los cuerpos como elementos discretos (discretización) y debido a la existencia de muchas divisiones se debe realizar una o más ecuaciones para representar el comportamiento de cada división del cuerpo.

Para poder emplear este método correctamente se deberá de asumir ciertas consideraciones o aspectos tales como:

Una función continua bajo un dominio global, puede aproximarse por una serie de funciones operando bajo un número finito de pequeños subdominios, éstas series de funciones son continuas y pueden aproximarse a la solución exacta, así como el número de subdominios se aproxima infinitamente a la pieza de estudio.

El dominio global del cuerpo está dividido es subdominios llamados *elementos*.

- Los puntos que definen las uniones y conexiones entre los elementos son llamados *nodos o puntos nodales*.
- Los elementos son especificados como uniones en sus nodos comunes, y son asumidos de esta manera para ser agrupaciones continuas a lo largo de sus fronteras, y cualquier función que represente el comportamiento de este

nodo, es asumida para ser igualmente continua en las fronteras.

- c. La función que existe bajo el dominio, es resuelta explícitamente para los puntos nodales. Se asume que el valor de la función en cualquier punto interno puede ser definido en términos de variables nodales del elemento de estudio.
- d. La colección completa de elementos representa una aproximación a los dominios de la geometría, y con ello tener una gran exactitud de la pieza de estudio.
- e. Los puntos nodales se refieren a puntos para una evaluación de la función, y no representan físicamente puntos de conexión en el dominio.

II. MATERIALES Y METODOS

Antes de pretender efectuar la simulación del diseño del núcleo del transformador, se deberá de efectuar la etapa del Pre-Procesamiento, que no es más que dibujar el modelo para luego asignarle los diferentes componentes con sus respectivas propiedades (material del núcleo, material de las bobinas, etc.), para finalmente demarcar las fronteras o restricciones que puedan en forma efectiva acercarse a las condiciones de operación de un transformador real (corrientes, tensiones, flujos, potencia, etc.).

El software informático Maxwell Power, nos servirá entonces para encontrar la intensidad de flujo magnético H, la densidad de corriente y finalmente las pérdidas en el hierro, estos valores nos servirán para poder determinar parte de los valores del circuito equivalente del transformador, básicamente en lo que corresponde a las pérdidas en el núcleo, a continuación, se detalla la metodología de desarrollo:

- a) Primero se explica de manera detallada los pasos y criterios necesarios para el diseño de un núcleo de transformador de distribución, bajo estos criterios se diseñó y construyó, el transformador nos servirá para tomarlo como modelo de nuestro caso de estudio y realizar la prueba en vacío.
- b) Se definirá la estrategia de resolución analítica del problema con ayuda de las ecuaciones de Maxwell, métodos numéricos y la ecuación de difusión en H.
- c) Posteriormente se procede a simular el problema hallando las pérdidas en el núcleo del transformador por elementos finitos.

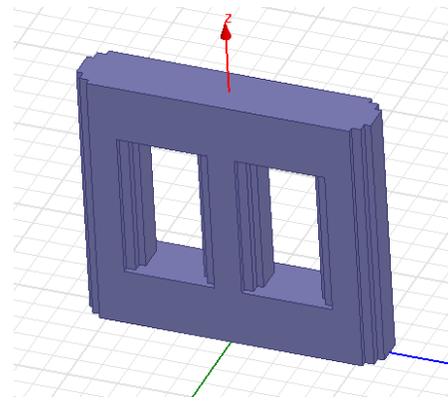


Fig. 1 Simulación del núcleo del transformador

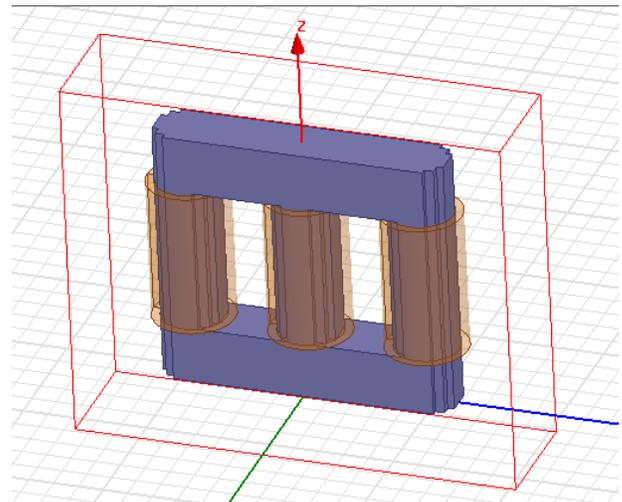


Fig. 2 Simulación del núcleo y las bobinas del transformador

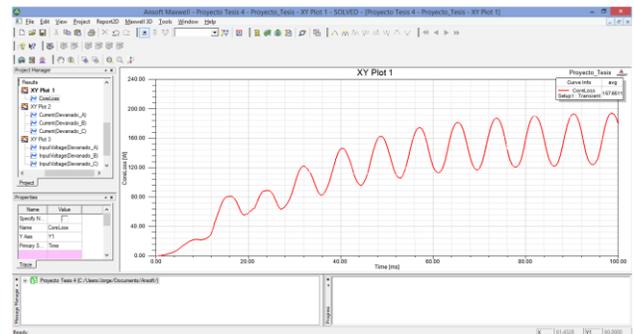


Fig. 3 Pantalla de presentación del software Mawell Power para la simulación

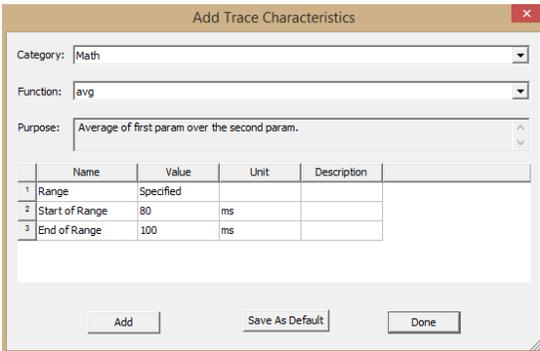


Fig. 4 Cuadro de resultados del software MP

III. RESULTADOS

Para efectos de validación, empleamos un transformador de potencia de 40 KVA., 60 Hz., 10.3/380 V. al mismo que se le sometió al ensayo a circuito abierto, en el mismo, los instrumentos de medición como es el vatímetro trifásico registro una potencia de 203.63 watts., habiendo efectuado una corrida del software Maxwell Power, se obtuvieron resultados cercanos al valor referido el mismo que puede representarse mediante su circuito equivalente.

El resultado obtenido mediante el método de los elementos finitos arroja un valor en el modelo simulado y es de 197.34 watts.

Por lo que se puede comparar en porcentaje de la siguiente forma:

$$\% = 197.34/203.63 * 100 = 96\% \text{ (6.29 watts de diferencia)}$$

IV. DISCUSIÓN

De los resultados obtenidos, se pueden detectar posibles fuentes de error, los cuales ocasionan que los resultados que nos proporciona el software Maxwell Power no coincidan exactamente con los valores obtenidos mediante el ensayo de vacío, y se pueden mencionar:

- 1) El enmallado se ha realizado con una frontera de 12,000 elementos para el núcleo del transformador lo cual es un valor promedio, esto tomando en cuenta las limitaciones computacionales y el tiempo de análisis.
- 2) Se ha considerado un modelo asimétrico de tal forma que se suponen los arrollamientos perfectamente circulares pero que en la realidad tienen una forma ovalada, pudiendo diferir la inducción magnética que producen estos.

- 3) En las medidas reales puede haber condiciones distintas a las teóricas como un porcentaje de error en el instrumento de medida para la potencia, es decir el vatímetro trifásico.
- 4) Los valores de conductividad, permeabilidad y curva B-H, pueden diferir en un pequeño porcentaje de los valores reales.

CONCLUSIONES

Utilizando el Método de los Elementos Finitos podemos diseñar núcleos para transformadores de diferentes potencias, materiales y anticiparnos en saber cuáles serán sus pérdidas en el núcleo, de esta manera no necesitaríamos construir transformadores para realizar el ensayo en vacío sino crear prototipos de núcleos antes de construirlos.

RECOMENDACIONES

Se recomienda estudiar y utilizar el método de los Elementos Finitos ya que actualmente se consolida como uno de los mejores sistemas de resolución para este tipo de problemas.

REFERENCIAS

- [1] Ramón Bargallo, Numerical Solution Fundamentals and Basic Methods, "Finite Elements for Electrical Engineering", Pag. 96-118, 1ra Edición, España, 2006.
- [2] Kulkarni, S.V. & Khaparde S.A., Eddy Current and Winding Stray Losses, "Transformer Engineering. Design and Practice", Pag. 74-201, 1ra Edición, India, 2004.
- [3] Lopez-Fernandez, X.M., Introduction to FEM Analysis, "Finite Element Method Applied to Design and Analysis in Power Transformers", Pag. 14-83, 1ra Edición, España, 2010.
- [4] Jianming, J., Application Finite Element Method, "The Finite Elements Method in Electromagnetics", Pag. 15-56, 3ra Edición, U.S.A., 1993.
- [5] Del Vecchio R.M., "Losses, Transformer Design Principles: With Applications to Core-Form Power Transformers", Pag 447-487, 2da Edición, U.S.A., 2002.
- [6] Silvester, P.P., Elementos Finitos Aplicados a Campos Electromagnéticos, "Elementos Finitos en Ingeniería Eléctrica", Pag. 117-135, 1ra Edición, España, 1989.
- [7] Escobar, A. & Betancourt, G., "Cálculo de los Valores Máximos de Campo Magnético utilizando el Método de los Elementos Finitos", Pag. 82-86, Scientia et Technica, No 30, España, Mayo 2006.
- [8] Ehsan Hajipour, "Power Transformer No-Load Prediction with FEM Modeling and Building Factor Optimization", Pag. 1-9, Scientific Research Journal of Electromagnetic, Iran, 2011.