

Análisis de Pérdidas de una Placa Conductora Producidas por un Conductor Paralelo a la Placa

Salvador Magdaleno Adame, Jaime Bernal Ruiz, Juan C. Olivares Galván, Víctor Manuel Jiménez
Mondragón, Rafael Escarela Pérez

Resumen— Este artículo presenta un análisis de pérdidas en una placa conductora no magnética la cual es sometida a un campo magnético variable en el tiempo que es producido por un conductor paralelo a la placa y el cual lleva una corriente de CA de 25 kA. Se calculó la pérdida total en la placa cuando el conductor está localizado a una distancia de 1cm de la placa usando una fórmula analítica. Para comprobar la fórmula analítica se realizó un análisis armónico usando una simulación de elemento finito donde se calculó la pérdida total en la placa. En este artículo se propone una metodología de análisis de pérdidas en placas conductoras no magnéticas que son sometidas a campos magnéticos variantes en el tiempo creados por conductores cercanos a las mismas placas y que llevan altas corrientes.

Temas claves— Elemento finito, Corriente de remolino, Flujo disperso, Blindaje magnético.

I. INTRODUCCIÓN

Actualmente las paredes internas de los tanques de los transformadores de potencia están sometidas a flujos dispersos que son originados por las bobinas del transformador. Las paredes de los tanques están hechas de acero al carbón, el cual es un material conductor y magnético. Por esta razón, cuando las paredes son sometidas al flujo disperso, se originan altas pérdidas en ellas. Esto produce puntos calientes en las regiones de las paredes expuestas al flujo disperso.

Existen algunos métodos que ayudan a disminuir las pérdidas y el calentamiento en las paredes internas de los transformadores. Por ejemplo, los tanques de los transformadores de potencia tipo acorazados son protegidos por medio de blindajes magnéticos [1]-[6]. Estos blindajes están hechos de varias laminaciones de acero al silicio de grano orientado que son colocadas en las mismas paredes internas del tanque. Los blindajes desvían el flujo disperso que incide sobre las paredes internas del tanque evitando que el flujo disperso penetre las paredes internas del tanque. Estos blindajes disminuyen las pérdidas y evita los puntos calientes en dichas paredes. Además, en los transformadores de potencia tipo columna se usan grandes placas de material conductor no magnéticas en las paredes internas del transformador [7], [8].

Salvador Magdaleno Adame esta con el Instituto Tecnológico de Morelia, 58120, Morelia, MEX (e-mail: smagdalenoa@hotmail.com).

Jaime Bernal Ruiz, Juan C. Olivares Galván, Víctor Manuel Jiménez Mondragón y Rafael Escarela Pérez están con la Universidad Autónoma Metropolitana, 02200, México D.F., MEX (e-mail: jolivares@correo.azc.uam.mx).

Estas placas conductoras no magnéticas funcionan como blindajes electromagnéticos. Por lo general, se usan placas de cobre o de aluminio. Estas placas se colocan sobre las paredes internas del tanque del transformador, frente a las bobinas del transformador (a lo largo de la altura de las bobinas). Las placas son sometidas al flujo disperso producido por las bobinas, este flujo disperso penetra las placas induciendo en ellas corrientes de remolino, las cuales a su vez, producen un flujo magnético contrario al flujo disperso que las penetra y que las produce. De esta forma el flujo disperso y el flujo magnético producido por las corrientes de remolino se contrarrestan, evitando que gran parte del flujo disperso penetre las paredes internas del transformador. Estas placas disminuyen las pérdidas y la generación de puntos calientes en las paredes internas de los tanques de los transformadores.

Por otra parte también se generan altas pérdidas en las regiones de los tanques que son sometidas a campos magnéticos producidos por los conductores del lado de bajo voltaje. Estos conductores llevan relativamente altas corrientes que producen altas pérdidas en las regiones del tanque cercanas al conductor [9]-[13].

En este artículo se presenta un análisis de pérdidas en una placa de cobre, la cual es sometida a un campo magnético variante en el tiempo. Este campo magnético es generado por medio de un conductor que lleva una corriente de 25 kA y el cual está localizado en forma paralela a la placa. Se propone una metodología de análisis de pérdidas en placas conductoras no magnéticas que son sometidas a campos magnéticos variantes en el tiempo creados por conductores cercanos a las mismas placas y que llevan altas corrientes.

II. CALCULO DE PÉRDIDAS POR CORRIENTES DE REMOLINO EN PLACAS CONDUCTORAS

En esta sección se calcula mediante una fórmula analítica la pérdida total de una placa conductora no magnética de dimensiones infinitas sometida a un campo magnético variante en el tiempo $H(t)$, el cual es producido por una corriente de CA de 25 kA que lleva un conductor de cobre localizado en las cercanías a la placa. Posteriormente para comprobar el resultado de la fórmula analítica se realiza un análisis armónico a una frecuencia de 60 Hz usando una simulación de elemento finito y se calcula la pérdida total en la placa.

A. Fórmula Analítica

Considere una corriente I que circula hacia dentro de la página, a través de un conductor de cobre localizado a una distancia “ a ” de una placa conductora no magnética, ver Fig. 1[14].

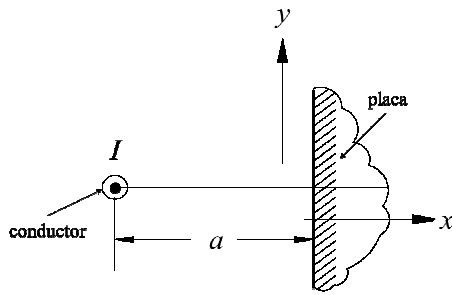


Fig. 1. Conductor separado una distancia “ a ” de la placa conductora.

Las dimensiones de la placa van desde $-\infty < x < 0$ y de $-\infty < y < \infty$. Se considera que la placa y el conductor de cobre están rodeados de aire. El aire tiene una conductividad $\sigma_2 = 0$ S/m y una permeabilidad $\mu_2 = 4\pi \times 10^{-7}$ H/m. El conductor de cobre tiene una conductividad $\sigma_1 = 5.8 \times 10^7$ S/m y una permeabilidad $\mu_1 = 4\pi \times 10^{-7}$ H/m.

Para explicar como penetra la placa conductora el flujo magnético producido por la corriente del conductor se usan las condiciones de frontera magnéticas entre dos materiales diferentes. Las condiciones de fronteras magnéticas deben satisfacer a la interfaz entre dos medios diferentes. Considerando la Ley de Gauss para campos magnéticos [15]:

$$\oint_S \mathbf{B} \cdot d\mathbf{S} = 0 \quad (1)$$

y la Ley de Ampere [15]:

$$\oint_l \mathbf{H} \cdot d\mathbf{l} = I \quad (2)$$

Estas dos leyes otorgan las condiciones de frontera requeridas a la interfaz de dos medios o de dos materiales [15].

$$\mathbf{B}_{1n} = \mathbf{B}_{2n} \quad (3)$$

$$\frac{\tan \theta_1}{\tan \theta_2} = \frac{\mu_1}{\mu_2} \quad (4)$$

Considere que la frontera es formada por el medio 2 que es el aire que rodea la placa y el medio 1 es la placa conductora no magnética. El medio 1 tiene una permeabilidad $\mu_1 = 4\pi \times 10^{-7}$ H/m y el medio 2 tiene una permeabilidad $\mu_2 = 4\pi \times 10^{-7}$ H/m. El campo magnético producido por el conductor produce un campo magnético circular, en el cual, predomina la componente tangencial del campo magnético. Analizando la situación cuando \mathbf{B}_1 es tangencial a la placa conductora con un ángulo $\theta_1 = 45^\circ$ y substituyendo los valores de permeabilidad en (4), obtenemos

$$\theta_2 = 45^\circ \quad (5)$$

Esto implica que \mathbf{B}_2 golpea la placa conductora tangencialmente.

Para este caso la pérdida total en W en la placa está dada por [14]:

$$P = \frac{\mu_o \omega I^2}{\pi k a \sqrt{2}} \left(1 - \frac{1}{ka \sqrt{2}} \right) \quad (6)$$

donde:

I = corriente del conductor, A

μ_o = permeabilidad del vacío ($= 4\pi \times 10^{-7}$), H/m

ω = frecuencia angular, rad por seg

a = distancia entre conductor y placa, m

k = factor $\left(= \frac{I}{2\pi} \right)$, A/rad

Para este caso, se considera que $a = 0.01$ m, que $I = 25$ kA, que $\omega = 377$ rad/seg y que el factor $k = 3978.873577$ A/rad. Al substituir los valores anteriores en (6) se obtuvo una pérdida total en la placa de 1645.16 W. Observe que la fórmula (6) no considera la conductividad de la placa y tampoco considera el factor de efecto piel.

B. Simulación de Elemento Finito

Mediante una simulación de elemento finito en 3D se realizó un análisis armónico a una frecuencia de 60 Hz usando el programa de elemento finito Maxwell ANSYS®.

El modelo consiste de una placa rectangular de cobre en paralelo con un conductor también de cobre cuyo diámetro es muy pequeño o despreciable, por lo tanto, la placa se considera de dimensiones muy grandes en comparación con las dimensiones del conductor. En la Fig. 2 se muestra la geometría de la placa y el conductor.

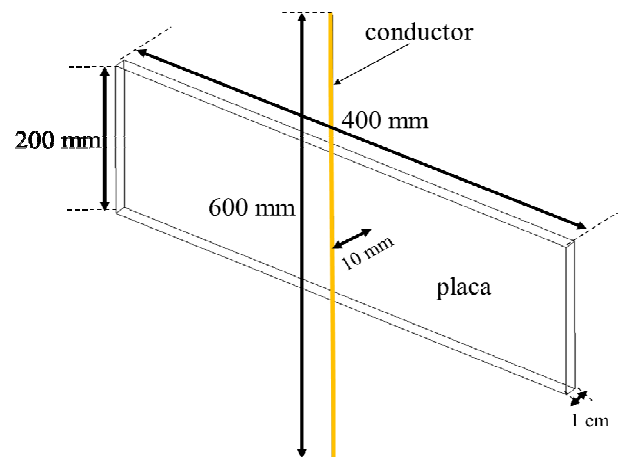


Fig. 2. Geometría de placa-conductor.

La placa tiene de largo 400 mm, de ancho 200 mm y de espesor 1cm. El conductor se simuló usando un poliedro de 12 lados con una longitud de 600 mm y un diámetro de 0.5 mm. La separación entre la placa y el conductor es desde 10 mm.

El conductor y la placa son de cobre con una permeabilidad relativa $\mu_r = 1$ y una conductividad $\sigma = 5.8 \times 10^7$ S/m. Estas propiedades fueron tomadas de la biblioteca de materiales de

Maxwell ANSYS®. Al conductor se le inyectó una corriente $I = 25$ kA.

El modelo conductor-placa fue encerrado en un espacio de aire formado por un poliedro de 24 lados, el cual tiene un radio de 220 mm. Este espacio de aire tiene una permeabilidad relativa $\mu_r = 1$ y una conductividad $\sigma = 0$ S/m. En las caras del poliedro se colocó una frontera infinita. En Fig. 3 se muestra el modelo de la placa-conductor dentro del poliedro de aire.

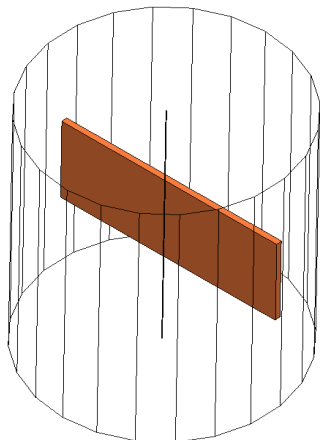


Fig. 3. Modelo placa-conductor dentro del espacio de aire.

La malla de elementos finitos del modelo consta de un total de 84,339 elementos finitos. El cobre tiene un factor de efecto piel a 60 Hz de 8.53 mm y el espesor de la placa es de 10 mm por lo que no fue necesario el uso de una malla relativamente fina dentro de la placa. Usamos la malla automática que realiza Maxwell-ANSYS® para realizar el cálculo. En la Fig. 4 se muestra la malla de elementos finitos de la placa.

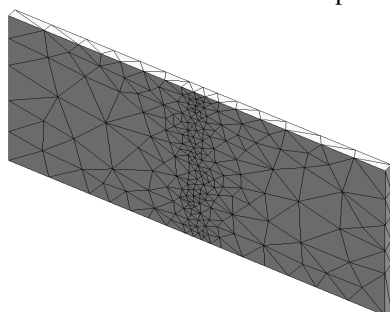


Fig. 4. Malla de elementos finitos de la placa.

En Fig. 5. se muestra la distribución de densidad de flujo magnético en la placa.

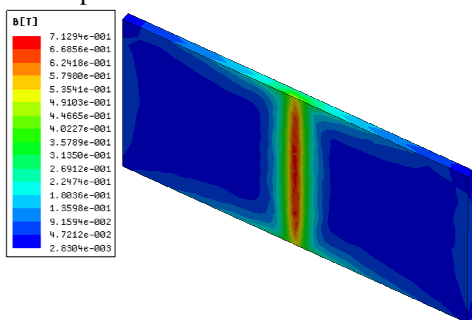


Fig. 5. Distribución de densidad de flujo magnético en la placa.

Se puede ver que la zona de la placa cercana al conductor

tiene una densidad de flujo máxima de 0.71 T. En esta zona es donde se genera la mayor concentración de pérdidas de la placa. En las zonas alejadas de la placa existe una densidad de flujo de 2 mT. En Fig. 6. se muestra la distribución de pérdidas en W/m^2 en la placa.

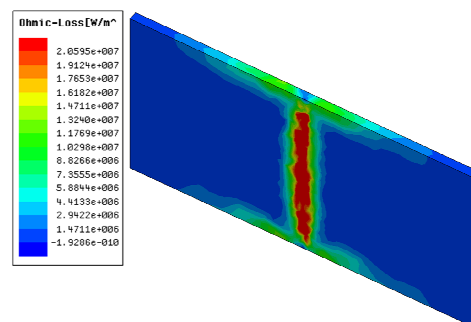


Fig. 6. Distribución de pérdidas en W/m^2 en la placa.

Se puede ver que la zona de la placa cercana al conductor tiene una pérdida máxima de 2×10^7 W/m^3 . En las zonas de la placa alejadas del conductor existe una pérdida de 1.5×10^6 W/m^3 .

Para calcular la pérdida total P de la placa, integramos las pérdidas en el volumen entero V de la placa usando [16]:

$$P = \frac{1}{2} \operatorname{Re} \left[\sum_{i=1}^n (\rho_i J_{e_i}^* \cdot J_{e_i}) V_i \right] \quad (7)$$

donde n representa el número de elementos, ρ_i es un tensor diagonal de resistividad del cobre de la placa, J_{e_i} es el vector de densidad de corriente del elemento i , y V_i es el volumen de cada elemento i . La densidad de corriente J_{e_i} está dada por [16]:

$$J_{e_i} = -j\sigma\omega\mathbf{A}_i = -\sigma \frac{1}{n} \sum_{i=n}^n \mathbf{N}_A^T \mathbf{A}_i \quad (8)$$

donde \mathbf{N}_A representa las funciones de forma del elemento para el vector de potencial magnético \mathbf{A} .

En este caso usando (7) se obtuvo una pérdida total en la placa de 1385.40 W. Esto representa un porcentaje de error de 15.78% entre el resultado obtenido con la fórmula analítica y la simulación de elemento finito. Existe una diferencia de 259.76 W entre el resultado de la simulación y la fórmula analítica. Quiere decir que la fórmula analítica no da buenos resultados en el cálculo de pérdidas para una placa con dimensiones finitas cercana a un conductor que lleva una alta corriente. Esto debido a que la fórmula analítica está considerando una placa de dimensiones infinitas. La fórmula analítica solo nos da una aproximación de la cantidad de pérdidas en la placa.

III. CONCLUSIONES

Un análisis de pérdidas de una placa conductora no magnética localizada cerca de un conductor que lleva 25 kA ha sido realizado. Se calcularon las pérdidas en la placa usando

una fórmula analítica. Posteriormente se realizó una simulación de elemento finito para comprobar el resultado de la fórmula analítica. Un porcentaje de error del 15.78% fue calculado entre la simulación y la fórmula analítica. Se propuso una metodología para calcular pérdidas aproximadas en una placa conductora no magnética de dimensiones finitas cercana a un conductor que lleva una alta corriente de CA.

IV. TRABAJOS FUTUROS

Se propone la búsqueda de una mejor fórmula analítica para calcular pérdidas para una placa no magnética conductora. Como trabajos futuros se propone el estudio de pérdidas en la misma placa usando diferentes configuraciones de conductores cercanos a una placa magnética conductora. Además se propone el desarrollo de una nueva fórmula analítica para calcular pérdidas debidas a conductores que llevan altas corrientes y que están cercanos a placas conductoras magnéticas, como las paredes de los tanques de los transformadores que están hechas de acero al carbón. Esta nueva fórmula analítica podría ser comparada y validada mediante simulaciones de elemento finito y mediante varias pruebas experimentales.

V. REFERENCIAS

- [1] Salvador Magdaleno A, Rodrigo Ocón V, Armando Rodríguez R, and Alvaro Cancino Q, "Análisis de flujo disperso en 3D y distribución de temperatura en transformadores de potencia tipo acorazado," RVP-AI/2009-TRO-13, Acapulco, Guerrero, México, Julio 2009.
- [2] A. Soto, D. Souto, J. Turulski, X.M. Lopez Fernandez, and D. Couto, "Software for fast interactive three-dimensional modeling of electromagnetic leakage field and magnetic shunts design in shell type transformers," XVIII International Conference on Electrical Machines (ICEM), 2008, Vilamoura, Portugal, pp. 1-6.
- [3] R. S. Girgis, D. A. Yannucci, and J. B. Templeton, "Performance parameters of power transformers using 3D magnetic field calculations," *IEEE Trans. Power Apparatus and Systems*, Vol. PAS-103, No. 9, Sept. 1984, pp. 2708-2713.
- [4] M. J. Sanchez I, J.C. Olivares G, M. S. Esparza G, and R. Ocón V, "Shunts magnéticos en tanques de transformadores de potencia," 6th International Conference on Electrical and Electronics Engineering Research, Nov. 2008, pp. 315-322.
- [5] Karsai K., Kerényi D., and Kiss L., *Large Power Transformers*, Amsterdam: Elsevier, 1987, pp. 182-183.
- [6] S. V. Kulkarni and S. A. Khaparde, *Transformer Engineering: Design and Practice*, New York: Marcel Dekker, 2004, pp. 208-216.
- [7] A. Rodríguez, R. Ocón V., Marco A. Espíndola, and A. Cancino Quiroz, "Cálculo de pérdidas por flujos dispersos en componentes estructurales de transformadores de potencia, utilizando el método del elemento finito (3D) y fronteras de impedancia," RVP-AI/2007-TRO-13, Acapulco, Guerrero, México, Julio 2007.
- [8] R. Ahuja and R. M. Del Vecchio, "Transformer stray loss and flux distribution studies using 3D finite element analysis," *Proc. Inst. Elect. Eng. Elect. Power Appl.*, Vol. 144, pp. 435-440, 1997.
- [9] D. A. Koppikar, S. V. Kulkarni, S. A. Khaparde, and S.K. Jha, "Evaluation of eddy losses due to high current leads in transformers," *IEE Proc.-Sci. Meas. Technol.*, Vol. 144, No. 1, Jan. 1997.
- [10] J. C. Olivares-Galvan, S. Magdaleno-Adame, E. Campero-Littlewood, R. Escarela-Perez, and P. S. Georgilakis, "Techno-economic evaluation of reduction of low voltage bushings diameter in single-phase distribution transformers," *Electric Power Components & Systems-Taylor & Francis*, Vol. 39, No. 13, 2011.

- [11] J. C. Olivares, R. Escarela-Perez, S.V. Kulkarni, F. de León, Enrique Melgoza-Vasquez, and Octavio Hernández-Anaya, "Improved insert geometry for reducing tank-wall losses in pad-mounted transformers," *IEEE Trans. Power Delivery*, Vol. 19, No. 3, July 2004.
- [12] K. Okuyama and H. Otani, "Eddy currents in structure surrounding large current bushings of a large capacity transformer," *IEEE Trans.*, 1981, PAS-100, (II), pp. 4502-4509.
- [13] G. B. Kumbhar, S. M. Mahajan, and W. L. Collett, "Reduction of loss and local overheating in the tank of a current transformer," *IEEE Trans. Power Delivery*, Vol. 25, No. 4, Oct. 2010.
- [14] S. Milos, *Electrodynamics of electrical machines*, 2nd Edition, Prague: Czechoslovak Academy of Sciences-Academy, 1967.
- [15] M.N.O. Sadiku, *Elements of Electromagnetics*. New York: Oxford University Press, Inc., 2001, pp. 330-332.
- [16] I. Hernandez, J. C. Olivares-Galvan, P.S. Georgilakis, and J.M. Canedo, "A novel octagonal wound core for distribution transformers validated by electromagnetic field analysis and comparison with conventional wound core," *IEEE Trans. Magnetics*, Vol. 46, No. 5, May 2010, pp. 1251-1258.

VI. BIOGRAFÍA

Salvador Magdaleno A. Nació en la Piedad Michoacán, México en el año de 1983. En 2008 obtuvo su Licenciatura en Ingeniería Eléctrica por parte de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo en Morelia, México. Del 2003 al 2008 trabajo en investigación relacionada a campos electromagnéticos en transformadores toroidales y convencionales, incluyendo la aplicación de entrehierros virtuales a núcleos toroidales. De Septiembre de 2008 a Diciembre de 2010 trabajó en la Industria como Ingeniero en Investigación y Desarrollo (R&D) en el Departamento de Tecnología de Transformadores y Reactores de Potencia en Industrias IEM S.A. de C.V. Sus áreas de investigación incluyen cálculo de campos electromagnéticos usando el método de elemento finito, modelado de transformadores y reactores usando el principio de dualidad y análisis térmico de transformadores de potencia, transformadores secos y de reactores de potencia. En este momento se encuentra estudiando su Maestría en Ingeniería Eléctrica en el área de diseño de máquinas eléctricas y equipos eléctricos en el Instituto Tecnológico de Morelia. Actualmente, está interesado en las áreas de investigación sobre almacenamiento de energía eléctrica producida por rayos y la transmisión de energía eléctrica inalámbrica.

Juan C. Olivares G. (Zamora, Mich., 1969). En 1993 obtuvo el grado de Ingeniero Electricista del Instituto Tecnológico de Morelia. En 1997 y 2004 obtuvo el grado de maestro en ciencias y el de doctor en el Instituto Tecnológico de Morelia y CINVESTAV, unidad Guadalajara respectivamente. Trabajo durante ocho años en la industria como diseñador de transformadores de distribución. En 2004 ingresó como profesor en el Instituto Tecnológico de Zapopan y a partir de septiembre del 2007 es profesor de tiempo completo de la Universidad Autónoma Metropolitana. Es miembro del Sistema Nacional de Investigadores (Nivel I) y Senior Member del IEEE.

Jaime Bernal Ruiz. En este momento está a punto de finalizar su Licenciatura en Ingeniería Eléctrica en la Universidad Autónoma Metropolitana-Azcapotzalco. Está interesado en el diseño, modelado y análisis de máquinas eléctricas y transformadores.

Víctor Manuel Jiménez Mondragón (San Bartolo Morelos, Estado de México, 1986). En 2009 obtuvo el grado de Ingeniero Electricista en la Universidad Autónoma Metropolitana-Azcapotzalco. Actualmente se desempeña como auxiliar de investigación en el Laboratorio de Energética Aplicada de la UAM-Azcapotzalco. Está interesado en el análisis de Máquinas Eléctricas y estudio de fuentes alternativas en la generación de energía eléctrica, especialmente en los sistemas eólicos.

Rafael Escarela Pérez. En 1992 obtuvo el grado de Ingeniero Electricista de la Universidad Autónoma Metropolitana-Azcapotzalco. En 1993 comenzó sus estudios de postgrado en el Imperial Collage de la Universidad de Londres donde obtuvo el grado de doctor en 1996. En 1996 ingresó como profesor de tiempo completo en la Universidad Autónoma Metropolitana. Es miembro del Sistema Nacional de Investigadores (Nivel II) y Senior Member del IEEE.