

Evaluación de Protección para la Reducción de Corrientes Inducidas en el Tanque del Transformador

Investigación

M.C. Mario Salvador Esparza González¹, M.C. Manuel de Jesús Sánchez Ibarra¹, Dr. Juan Carlos

Olivares Galván², M.C. José Alejandro Morones Alba¹, Dr. Carlos Humberto Saucedo Zárate³

¹Departamento de Ingeniería Eléctrica, Instituto Tecnológico de Aguascalientes, Aguascalientes., México

²Departamento de Energía, Universidad Autónoma Metropolitana-Azcapotzalco, Cd. de México, México

³Departamento de Ingeniería Mecánica, Instituto Tecnológico de Aguascalientes, Aguascalientes., México

Tel. (449) 910-6470 Fax (449) 974-2589 E-mail: msespa@ieec.org

Resumen

En este trabajo se evalúa la distribución de blindajes electromagnéticos contra corrientes inducidas en las paredes del tanque de transformadores eléctricos mediante el método del elemento finito utilizando el software femm 4.2. Se evalúan arreglos: a) con laminaciones del shunt magnético paralelas a la pared del tanque y b) blindaje electromagnético de aluminio. Se evalúan 5 acomodos diferentes de las protecciones, considerando una separación entre el tanque y el conductor que varía de 5.08 cm hasta 25.4 cm; se considera en el estudio una geometría de 3 conductores paralelos al tanque con una corriente de 5kA por fase y cada fase desfasada 120 grados entre sí; se utiliza acero al carbón para la pared del tanque y acero al silicio convencional para los shunts magnéticos. La posición óptima de las laminaciones de los shunts se determina a partir de la evaluación de pérdidas totales inducidas tanto en la pared del tanque como en los shunts magnéticos o en el blindaje electromagnético, según sea el caso. De acuerdo con los resultados del modelado se determina que puede obtenerse el mismo nivel de reducción de pérdidas con menor cantidad de material de protección encontrando una distribución óptima de las mismas.

Palabras clave: Flujo disperso, corrientes inducidas, shunt magnético, blindaje de aluminio.

Abstract

This work present the distribution of electromagnetic shielding against induced currents in the walls of the tank electrical transformers analyzed by finite element method using femm 4.2 software. Arrangements are assessed: a) with magnetic shunt laminations parallel to the tank wall and b) electromagnetic shielding aluminum. 5 accommodations are evaluated different protections, considering a separation between the tank and the conductor varies 5.08 cm to 25.4 cm, is considered in the study of 3-conductor geometry parallel

to the tank with a 5kA current per phase and each phase 120 degrees out of phase with each other, and is used for carbon steel tank wall and conventional silicon steel magnetic shunt. The optimum position of the shunt laminations is determined from the assessment of total losses induced in both the tank wall shunts as magnetic or electromagnetic shielding, as applicable. According to the results of modeling is determined same reduction with different distribution protection.

Key words: Dispersed flow, *Eddy* current, magnetic shunt, aluminum shielding.

Introducción

Cuando circula corriente por un conductor eléctrico se crea un campo magnético alrededor de él; si se encuentra en la cercanía un metal en este se induce una corriente eléctrica [1], en el caso de los transformadores esto es conocido como pérdidas parásitas, las cuales consisten en las pérdidas del campo debido al flujo magnético que se escapa fuera del elemento activo (núcleo-bobinas) del transformador, también llamado flujo disperso. Estos flujos dispersos, producidos principalmente por los devanados, crean corrientes de *Foucault* o *Eddy* en cualquier componente metálico presente en la estructura del transformador; y como consecuencia reducen la eficiencia del transformador. A medida que el tamaño y la capacidad del transformador de potencia aumenta, las pérdidas producidas por los flujos dispersos también aumentan [1,2]. Además, pueden causar sobrecalentamiento local reduciendo la vida útil del transformador y su confiabilidad operativa [1]. Las pérdidas parásitas disminuyen la eficiencia de los mismos [1, 3, 4, 5] a medida que el tamaño y capacidad del transformador aumenta, las pérdidas producidas por flujos dispersos también aumentan [1,2]. Además las pérdidas parásitas pueden causar sobrecalentamiento local reduciendo la vida útil del transformador y su confiabilidad operativa [1].

Para disminuir las pérdidas en el tanque es necesario redireccionar el flujo magnético evitando que este

llegue a las partes metálicas, existen dos opciones para resolverlo, los blindajes electromagnéticos de aluminio y los shunt magnéticos de acero laminado [1, 4, 6, 7].

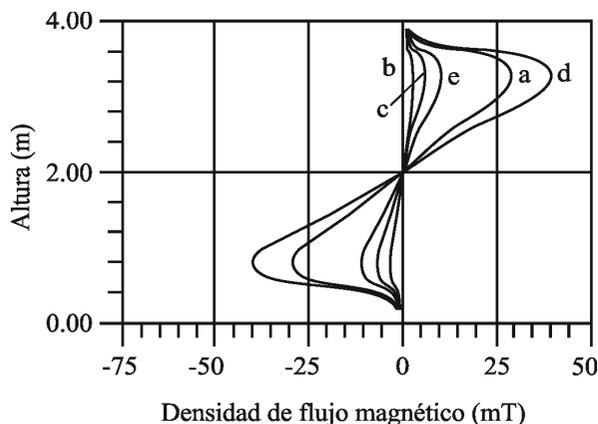


Figura 1. La densidad de flujo magnético a lo largo de la altura de la pared del tanque usando un blindaje magnético. (Derecho de autor IEEE, C. Yongbin et al., 1994 [1]).

Los shunts magnéticos, se fabrican de láminas de acero magnético apiladas una encima de otra, se usan para impedir que el flujo parásito golpee los componentes metálicos del transformador, se colocan en la pared del tanque y las estructuras del marco de sujeción del elemento activo. Aun cuando los flujos parásitos que alcanzan la pared del tanque son algunas veces de valores reducidos, debido a que el tamaño del tanque es grande, la mayor parte de las pérdidas parásitos ocurren allí [4]. Un shunt magnético provee un camino de baja de reluctancia para el flujo disperso que viaja hacia la pared del tanque y lo reencauza para los devanados. Consecuentemente, un shunt magnético reduce las pérdidas parásitas. En la práctica algunos fabricantes los hacen del desperdicio del acero al silicio que se genera internamente en la compañía.

Otra opción son los blindajes electromagnéticos que se fabrican de un material con conductividad alta (aluminio o cobre). Las corrientes de remolino inducidas en el blindaje se oponen al flujo disperso y así le impide alcanzar la pared del tanque [4]. Sin embargo, el blindaje también comprende pérdidas, debido al campo magnético generado, y por consiguiente si se diseñan inadecuadamente pueden generarse más pérdidas. La ventaja de blindaje es su versatilidad, ya que puede ser adaptado a cualquier lugar dentro del transformador.

Los shunts magnéticos representan la mejor opción en términos de reducir las pérdidas totales en el transformador según un análisis hecho para el flujo parásito en [1]. Se analiza la densidad de flujo magnético en el tanque del transformador bajo tres situaciones diferentes como se observa en la Fig. 1. Cuando no hay blindaje o shunt (curva a), con un shunt magnético

(curva b), y con una pantalla de aluminio (curva c). Las curvas d y e representan la densidad de flujo magnético en la superficie del shunt magnético y en la pantalla de aluminio respectivamente. Claramente, el shunt magnético provee la protección más efectiva a la pared del tanque para el flujo parásito.

La posición de los shunt o blindaje influye en la reducción de pérdidas [4,7], también tienen efecto la distancia entre la bobina y las partes metálicas y propiedades de los materiales del shunt o blindaje.

El objetivo de esta investigación es evaluar el efecto de la distribución de la protección sobre la pared del tanque en función del área cubierta por la misma para el shunt magnético y el blindaje de aluminio a diferentes distancias del conductor portador de corriente.

Fundamentos matemáticos

Si el campo magnético, es variante en el tiempo, se pueden inducir corrientes de remolino en los materiales con conductividad diferente de cero. Las ecuaciones de Maxwell relacionan la distribución de los campos electromagnéticos; se tiene que la intensidad de campo eléctrico E y la densidad de corriente J se da por [1]:

$$J = \sigma E \quad (1)$$

El campo eléctrico inducido es:

$$\nabla \times E = -\frac{\partial B}{\partial t} \quad (2)$$

Substituyendo el vector potencial por B en (2) se tiene:

$$\nabla \times E = -\nabla \times A \quad (3)$$

Para un problema en dos dimensiones (3) se puede reducir a:

$$E = -A - \nabla V \quad (4)$$

Al emplear la relación constitutiva (1) se tiene que:

$$J = -\sigma A - \sigma \nabla V \quad (5)$$

Ahora sí:

$$\nabla \times H = J \quad (6)$$

Se puede escribir (6) en la forma siguiente:

$$\nabla \times \left(\frac{1}{\mu \beta} \nabla \times A \right) = J \quad (7)$$

Si se sustituye (5) en (7) se obtiene:

$$\nabla \times \left(\frac{1}{\mu \beta} \nabla \times A \right) = -\sigma A + J_{src} - \sigma \nabla V \quad (8)$$

Donde J_{src} representa las fuentes de corriente aplicadas. ∇V es el gradiente de voltaje que, en problemas de dos dimensiones, es constante en un cuerpo conductor [1].

Estos aspectos matemáticos son considerados por el software para realizar las simulaciones.

La ecuación (8) se utiliza para el caso en el cual el campo magnético oscila en una frecuencia fija. Para este caso, el fasor transformación [1] produce una ecuación fija que se soluciona para la amplitud y la fase de A como en la siguiente ecuación:

$$A = Re[\alpha(\cos\omega t + j\text{sen}\omega t)] = Re[\alpha e^{j\omega t}] \quad (9)$$

el cual es un número complejo. Substituyendo en (7) y dividiendo el término complejo exponencial obtenemos:

$$\nabla x \left(\frac{1}{\mu_{eff}(b)} \nabla X \alpha \right) = -j\omega\sigma\alpha + J_{src} - \sigma\nabla V \quad (10)$$

Válida para solucionar los problemas armónicos magnéticos.

Materiales y métodos

La geometría se analizó por medio del MEF (Método del Elemento Finito), con la ayuda del software femm 4.2, la geometría consta de 3 conductores rectangulares fabricados de cobre de 1.27 cm x 7.62 cm, por cada uno de los cuales circula una corriente eléctrica de 5kA con un desfase de 120 grados entre fases; el tanque tiene un espesor de 0.95 cm y una longitud de 90 cm y está fabricado de acero al carbón con una permeabilidad relativa μ_r de 200 y una conductividad eléctrica σ de 4×10^6 S/m (Siemens por metro).

Se realizaron simulaciones considerando solamente el tanque, con blindaje electromagnético de aluminio y shunt magnético paralelos al tanque; como se muestra en la figura 3, la parte sombreada corresponde a la protección. El blindaje de aluminio utilizado tiene 1.27 cm de espesor, tiene una conductividad eléctrica σ de 34.45×10^6 S/m y una permeabilidad relativa de 1. Los shunts magnéticos paralelos al tanque se consideran elaborados de laminaciones de acero magnético tipo M-15 de 0.045 cm de espesor por lámina, en conjunto se simula un espesor total del shunt de 1.27 cm. Para cada caso se realizaron 5 simulaciones variando la distancia de los conductores rectangulares con respecto a la pared interna del tanque, dicha distancia se varió cada 5.08 cm partiendo de 5.08 cm y hasta 25.40 cm. La tabla 1 muestra la distribución del blindaje o shunt, la longitud total del tanque con shunt magnético o con

blindaje electromagnético en cada caso, la separación entre shunts magnéticos (o secciones blindajes electromagnéticos) y el porcentaje de blindaje del tanque.

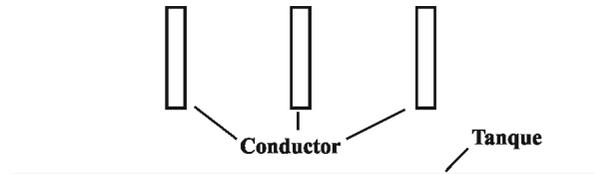


Fig. 2. El tanque considera solamente la pared del tanque (Caso A)

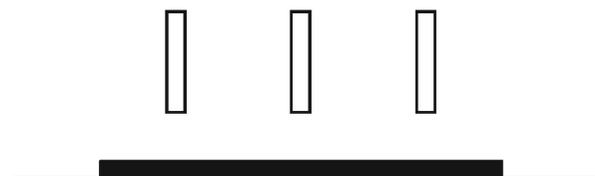


Fig. 3. El tanque considera una sección continua de shunt magnético o blindaje electromagnético (Caso B)

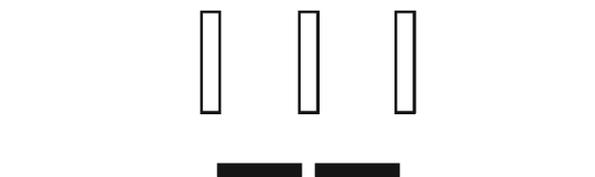


Fig. 4. El tanque considera dos secciones de shunt magnético o blindaje electromagnético (Caso C).

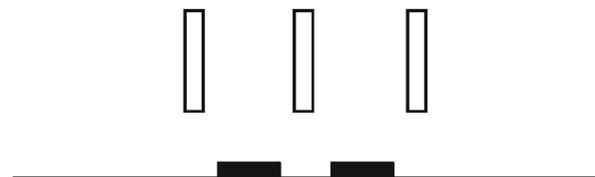


Fig. 5. El tanque considera dos secciones de shunt magnético o blindaje electromagnético continuo (Caso D).

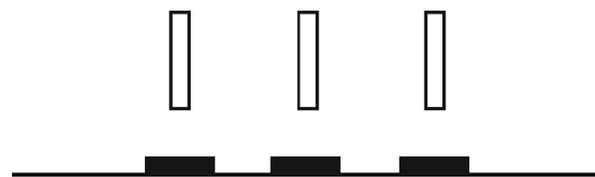


Fig. 6. El tanque considera tres secciones de shunt magnético o blindaje electromagnético continuo (Caso E).

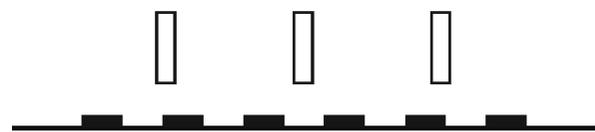


Fig. 7. El tanque considera seis secciones de shunt magnético o blindaje electromagnético continuo (Caso F).

La tabla 1 muestra la separación entre las diferentes protecciones, la longitud total del tanque protegida por los shunt o blindaje de aluminio, el número de secciones empleadas y el porcentaje de blindaje, en el caso A (Ver fig. 2) no se utilizó ningún tipo de blindaje, en el caso B (Ver Fig. 3) un blindaje o shunt con una longitud del 75% de la pared del tanque, en los casos C al E (Fig. 4 a Fig. 6) se seccionó el shunt o blindaje de diferentes maneras.

CASO	Separación (cm)	Long. total (cm)	Número de secciones	% Blindaje	Ver
Caso A	-----	-----	-----	0	Fig. 2
Caso B	-----	30.50	1	33	Fig. 3
Caso C	1.27	16.50	2	18	Fig. 4
Caso D	4.40	10.16	2	11	Fig. 5
Caso E	5.08	15.24	3	17	Fig. 6
Caso F	2.54	15.24	6	17	Fig. 7

Tabla 1. Casos de protección simulados.

Resultados y discusión

La figura 8 muestra la distribución del flujo magnético en la pared del tanque, se observa como penetra el tanque, lo cual produce corrientes parásitas y pérdidas, en la figura 9 se muestra instalando un blindaje de aluminio, que el flujo magnético es rechazado por el blindaje y alcanza la pared del tanque hasta el punto donde no hay blindaje pero en menor proporción. La función del shunt magnético es redireccionar el flujo magnético haciéndolo pasar por el shunt; sin embargo las pérdidas se reducen ya que las corrientes inducidas se minimizan debido a las laminaciones, de manera similar al caso del blindaje de aluminio el flujo golpea el tanque en las partes donde no existe shunt magnético o blindaje electromagnético (Ver Fig. 10).

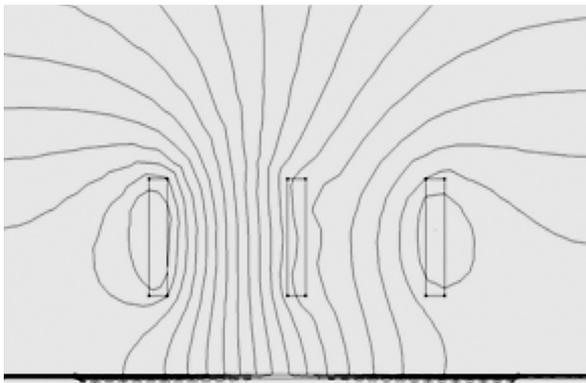


Figura 8. Distribución del flujo magnético considerando solamente la pared del tanque.

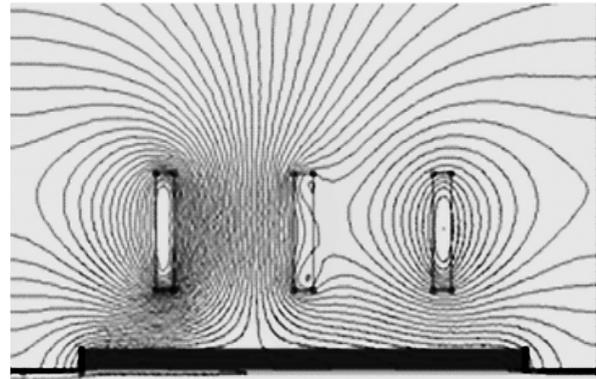


Figura 9. Distribución del flujo magnético empleando una sección continua de blindaje de aluminio.

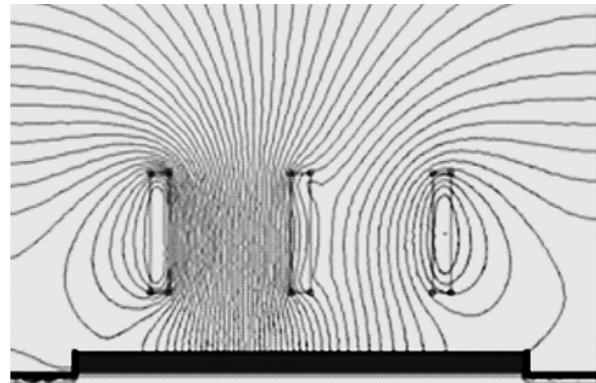


Figura 10. Distribución del flujo magnético empleando una sección completa de shunt magnético.

La figura 11 muestra las pérdidas obtenidas en la simulación para los diferentes acomodos, considerando el blindaje electromagnético de aluminio; puede observarse que aún cuando el área cubierta del tanque de acero por blindaje es la misma (Casos E y F) las pérdidas son diferentes, el punto de referencia es el blindaje completo (Caso A).

La figura 12 muestra las pérdidas obtenidas en la simulación para los diferentes acomodos, considerando el shunt magnético, los efectos son similares, sin embargo la respuesta a la distribución de la protección es diferente que para el caso del aluminio. Puede notarse que a partir de 10cm de separación se obtiene el mismo resultado con el caso F que con el caso A; sin embargo se utiliza el 50% del material para proteger el tanque lo que representa un menor peso en el diseño del equipo.

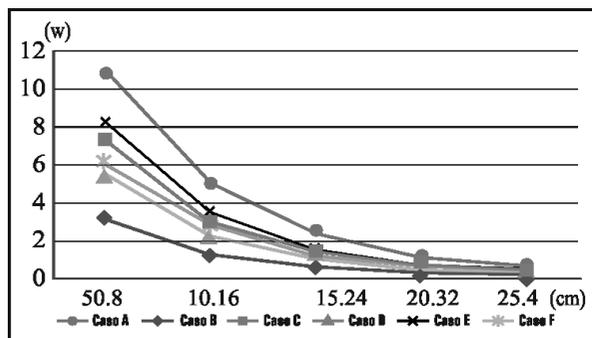


Figura 11. Pérdidas en el blindaje electromagnético de aluminio contra la distancia de separación entre los conductores y el tanque del transformador considerando 5 casos.

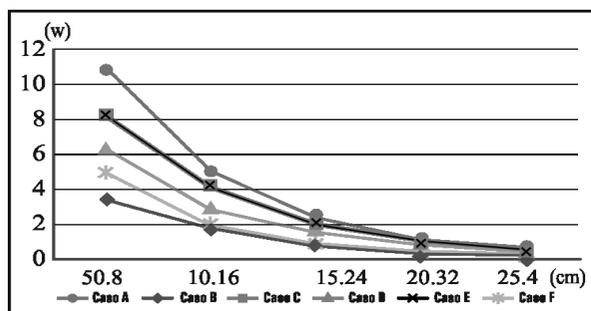


Figura 12. Pérdidas de shunt paralelo contra la distancia de separación entre los conductores y el tanque del transformador considerando 5 casos.

Conclusiones

En las figuras 12 y 13 se corrobora la importancia de usar blindaje electromagnético o shunts magnéticos para reducir las pérdidas parásitas en los tanques de transformadores de potencia ya que para todas las simulaciones el caso A (Sin protección) muestra la mayor cantidad de pérdidas.

Comparando la curva de pérdidas obtenida para el caso F con 6 secciones de protección en la figura 12 (blindaje de aluminio) se tiene una mayor cantidad de pérdidas que las mostradas en la figura 13 (shunt magnético). A una distancia de 5.08 cm se tiene una diferencia de 16% menos de pérdidas para el shunt magnético.

Controlar el flujo parásito en los dispositivos electromagnéticos es importante en muchas aplicaciones de ingeniería. El flujo parásito no sólo afecta a los transformadores, también pueden afectar el funcionamiento de los aparatos electrónicos que se encuentren cerca de las máquinas eléctricas. Por eso es importante usar las medidas apropiadas de blindaje en los transformadores y en cualquier otra máquina que base su operación en campos electromagnéticos.

Con el estudio presentado se demuestra que la distribución de las protecciones magnéticas influye en las pérdidas inducidas en el tanque del transformador, por ejemplo los casos E y F cubren una superficie del 17% de la pared del tanque pero la distribución en el primer caso es de 3 secciones y en el segundo de 6 secciones de una longitud igual a la mitad. En la figura 13 podemos resaltar que para una distancia de 5.08 cm las pérdidas se reducen de 8W a 5W para el shunt magnético.

El efecto de la disminución de pérdidas es diferente para el caso del blindaje de aluminio, en el caso anterior solo se reduce de 8W a 6 W. A través del modelado puede seleccionarse el acomodo que reduce más las pérdidas parásitas en el tanque con la menor cantidad de material. Para las condiciones simuladas la mejor protección con el blindaje de aluminio es el caso D; sin embargo para el shunt magnético es el caso F.

Referencias

- [1] C. Yongbin, Y. Junyou, Y. Hainian and T. Renyuan. "Study on Eddy Current Losses and Shielding Measures in Large Power Transformers," *IEEE Trans. on Magnetics*, Vol. 30, No. 5, pp. 3068-3071. Sep. 1994.
- [2] M. Djurovic and J. E. Monson. "3-Dimensional computation of the effect of the horizontal magnetic shunt on transformer leakage fields," *IEEE Trans. on Magnetics*, Vol. MAG-13, No. 5, pp. 1137-1139, Sept. 1977.
- [3] J.C. Olivares, J. M. Cañedo, P. Moreno, J. Driesen, R. Escarela, S. Palanivasagam, "Experimental Study to Reduce the Distribution-Transformers Stray Losses Using Electromagnetic Shields," *Electric Power Systems Research* 63 (2002).
- [4] S. Palanivasagam. *Analysis of effect of magnetic shunts on Eddy and stray losses in transformers*. M.E. thesis. Shivaji University, 1999.
- [5] A. Basak and H. G. Kendall. "Leakage Flux in the Steel Tank of a 2.5KVA Single Phase Transformer," *IEEE Trans. on Magnetics*, Vol. Mag-36, No. 5, pp. 3831-3835. Sep. 1987.
- [6] C. Hernández, M. A. Arjona and J. P. Sturgess. "Optimal Placement of a Wall-Tank Magnetic Shunt in a Transformer Using FE Models and a Stochastic-Deterministic Approach," in *Electromagnetic Field Computation, 2006 12th Biennial IEEE Conf.*, pp. 468.
- [7] Norma Mexicana ANCE, NMX-J-116 ANCE-2005, "Transformadores de distribución tipo poste y tipo subestación," Especificaciones, pp.7, 29-31.

Artículo recibido: 18 de enero de 2011

Aceptado para publicación: 27 de julio de 2011