

Fuerzas Eléctricas en Devanados de Transformadores de Potencia debidas a Fallas en el Sistema Eléctrico

Fausto Valencia, Mentor Poveda

Facultad de Ingeniería Eléctrica y Electrónica, Escuela Politécnica Nacional (EPN), Quito - Ecuador

Resumen.- Se presenta una descripción de los efectos que tienen las fuerzas electromecánicas en los devanados de los transformadores de potencia. Se desarrolla un modelo para el cálculo del campo magnético y las fuerzas electromecánicas a lo largo de los devanados, utilizado como herramienta el Análisis de Elementos Finitos. Se realizan simulaciones para diferentes configuraciones y se determina la influencia de diversos parámetros en el valor de fuerza electromecánica que se presenta en el transformador. Finalmente, se presenta una aplicación del modelo a un autotransformador del Sistema Nacional de Transmisión y se determina el tipo de conductor necesario para que soporte las fuerzas electromecánicas a las que se verá sometido en caso de falla.

I. INTRODUCCIÓN

Cuando circula una densidad de corriente \vec{J} por los devanados de un transformador, se genera un campo magnético \vec{B} que envuelve al devanado. La combinación de esta densidad de corriente con dicho campo eléctrico provoca la existencia de una fuerza por unidad de volumen \vec{f} que actúa sobre el mismo [1], tal como se observa en (1).

$$\vec{f} = \vec{J} \times \vec{B} \quad (1)$$

Si la corriente tiene un valor elevado, como en el caso de una corriente de falla, se pueden provocar fuerzas electromecánicas que podrían dañar al devanado del transformador [2], con deformaciones como por ejemplo:

- Pandeo Forzado
- Pandeo Libre
- Inclinación del devanado
- Inclinación de espiras
- Superposición de arrollamientos o
- Pandeo vertical

El estudio de las fuerzas electromecánicas que se presentan en un transformador cuando existe una corriente de falla permitirá determinar si un diseño es correcto mecánicamente, o si se requieren variaciones constructivas que permitan que el transformador trabaje adecuadamente durante su vida útil [3].

II. MODELO DE ELEMENTOS FINITOS DEL TRANSFORMADOR DE POTENCIA

El campo magnético conjuntamente con la corriente que circulan por un transformador obedecen la ecuación de Poisson (2) [4].

$$\nabla^2 \vec{A} = -\mu \vec{J} \quad (2)$$

A. Método de Elementos Finitos [5]

El método de elementos finitos o FEM por sus siglas en inglés es un método numérico basado en el cálculo variacional, que se utiliza en la resolución de problemas de derivadas parciales con condiciones de borde.

Para el caso de un problema de dos dimensiones, el FEM resuelve ecuaciones en derivadas parciales de la forma (3). Los coeficientes de cada derivada y de la función incógnita dependen de la naturaleza del problema, en tanto que f es el origen del campo que provoca la existencia de la función Φ , como por ejemplo una densidad de carga o una densidad de corriente.

$$-\frac{\partial}{\partial x} \left(\alpha_x \frac{\partial \Phi}{\partial x} \right) - \frac{\partial}{\partial y} \left(\alpha_y \frac{\partial \Phi}{\partial y} \right) + \beta \Phi = f \quad (3)$$

Adicionalmente al planteamiento de la ecuación, es necesario establecer una condición de borde. En este trabajo se ha utilizado la condición de borde de Dirichlet, en la cual se establece un valor de Φ para ciertos puntos Γ_1 dentro de la región del problema, es decir:

$$\Phi = p \text{ en el borde } \Gamma_1 \quad (4)$$

Las discontinuidades, aquellas regiones en las que varían los parámetros que definen el problema $(\alpha_x, \alpha_y, \beta)$, se incluyen mediante las ecuaciones (5) y (6).

$$\Phi^+ = \Phi^- \text{ en } \Gamma_d \quad (5)$$

$$\left(\alpha_x^+ \frac{\partial \phi^+}{\partial x} \vec{i} + \alpha_y^+ \frac{\partial \phi^+}{\partial y} \vec{j}\right) \vec{n} = \left(\alpha_x^- \frac{\partial \phi^-}{\partial x} \vec{i} + \alpha_y^- \frac{\partial \phi^-}{\partial y} \vec{j}\right) \vec{n} \quad (6)$$

En la ecuación anterior, los signos “+” y “-” indican uno u otro lado de la región Ω que está dividida por el borde Γ_d . Los vectores unitarios \vec{i} , \vec{j} y \vec{n} respectivamente, son los correspondientes a los ejes x , y y al eje normal a la superficie que divide las dos regiones distinguidas por la discontinuidad.

B. Aplicación del Método de Elementos Finitos al Transformador

El desarrollo del modelo del transformador consiste en encontrar una ecuación que describa los campos electromagnéticos que permiten su funcionamiento, a la vez que se ajuste a la ecuación (3) de tal manera que se pueda aplicar el FEM.

La ecuación (2) en coordenadas rectangulares se expresa en (7). Para poder adaptar a dos dimensiones el problema del campo magnético en el transformador, se ha asumido que la corriente ingresa por el eje z , lo cual implica que el campo magnético B esté en el plano xy y que por lo tanto el vector potencial magnético A se encuentre en el eje z .

$$-\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{1}{\mu_r} \frac{\partial A_z}{\partial x} \right) - \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{1}{\mu_r} \frac{\partial A_z}{\partial y} \right) = \mu_o J_z \quad (7)$$

En cuanto a las discontinuidades, se sabe que los campos magnéticos cumplen con las relaciones [4]:

$$A_z^+ = A_z^- \quad (8)$$

Para el eje z , en tanto que para los ejes x y y se tiene:

$$\frac{1}{\mu_r^+} \frac{\partial A_z^+}{\partial n} = \frac{1}{\mu_r^-} \frac{\partial A_z^-}{\partial n} \quad (9)$$

De esta manera, este problema del transformador, o cualquier problema magnetostático, puede ser resuelto mediante el FEM, ecuación (3), si se asume que:

$$\alpha_x = \alpha_y = \frac{1}{\mu_r} \quad \phi = A_z \quad f = \mu_o J_z \quad (10)$$

C. Inclusión de la Característica de Saturación [5]

La permeabilidad relativa a la que trabajará el transformador depende de la curva de saturación característica del material utilizado en la construcción del núcleo. Para determinar el punto de trabajo se ha implementado un proceso iterativo que compara en cada paso el valor asumido de

permeabilidad relativa con el valor que debería tener en función de la densidad de flujo resultado del cálculo. Ver figura 1.

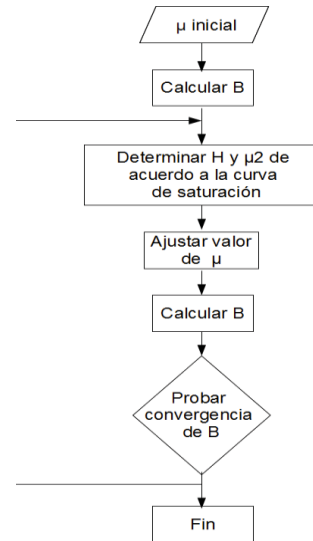


Fig. 1. Flujo para determinar la permeabilidad relativa y la densidad de flujo en la cual trabaja el transformador

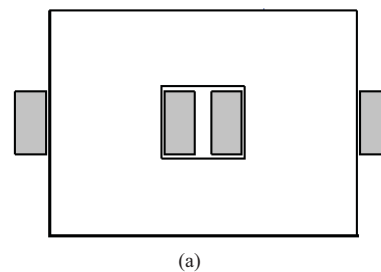
III. RESULTADOS Y EVALUACIONES PARA DIFERENTES CASOS DE DISEÑO

Se exponen a continuación casos comparativos entre diferentes configuraciones de la geometría interna del transformador.

Para todos los casos se ha considerado un transformador de 100 MVA, 60 Hz y 138 / 69 kV.

A. Geometría del Núcleo

Las configuraciones ingresadas en las simulaciones se muestran en la Figura 2.



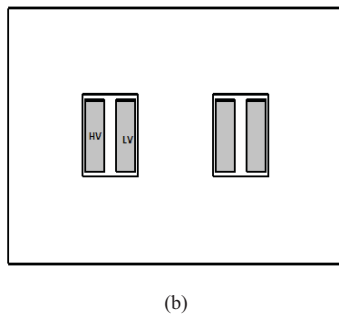


Fig. 2. Configuraciones de devanados en un transformador

En las Figuras 3 y 4 se muestra el comportamiento del campo magnético para cada una de las configuraciones cuando circula una corriente de falla por sus devanados. Se puede observar la existencia de un flujo de dispersión en el espacio entre los devanados.

En las Figuras 5 y 6 se muestra el comportamiento de la fuerza electromecánica total. En los dos casos la fuerza tiende a ser radial en la parte media de los devanados; conforme se dirige hacia los extremos, aumenta la componente axial de la fuerza.

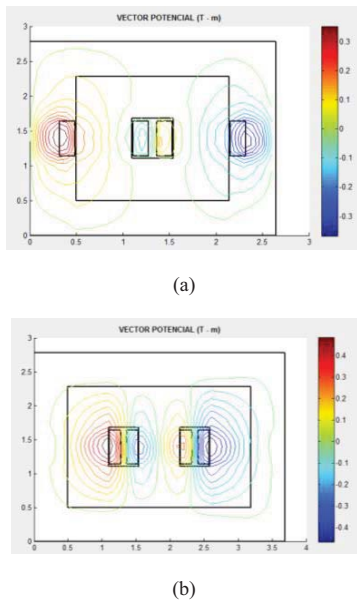
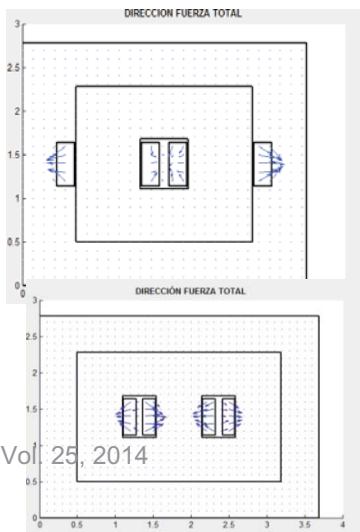


Fig. 3 Comportamiento del campo magnético cuando circula una corriente de diez veces la nominal para cada configuración del núcleo



(a)
(b)

Fig. 4 Dirección de la Fuerza Total para cada configuración del núcleo

El valor de las fuerzas para cada configuración se muestra en las Tablas 1 y 2.

Tabla 1
Valores de Fuerza para el diseño de transformador a dos columnas

Tipo de fuerza	Densidad de Fuerza (N/m ³)		
	Sin carga	Carga nominal	Corriente de falla
Axial	11.884,00	1,8332· 10 ⁶	7,8162· 10 ⁷
Radial	4.060,00	1,0324· 10 ⁶	5,2959· 10 ⁷
Total	12.027,00	2.0566· 10 ⁶	8,5690· 10 ⁷

Tabla 2
Valores de densidad de fuerza para el diseño de transformador a tres columnas

Tipo de fuerza	Densidad de Fuerza (N/m ³)		
	Sin carga	Carga nominal	Corriente de falla
Axial	10.255,00	0.5118· 10 ⁶	4.5447· 10 ⁷
Radial	4.470,00	1.0620· 10 ⁶	6.5727· 10 ⁷
Total	10.256,00	1.0717· 10 ⁶	6.6040· 10 ⁷

B. Espesor del devanado

Para determinar la influencia del espesor del devanado, se ha modificado el diseño de tres columnas de la sección anterior, con las mismas características de corriente nominal, curva de saturación e inducción magnética.

La dirección de las fuerzas electromecánicas se presenta en la Figura 5. Debido a la longitud de los devanados, la influencia de la componente radial de la fuerza se incrementa.

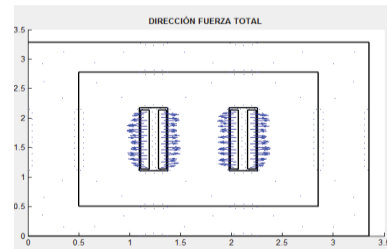


Fig. 5 Dirección de la fuerza electromecánica para un transformador de tres columnas de bajo espesor

Los valores para cada caso simulado se presentan en la Tabla 3.

Tabla 3
Valores de densidad de fuerza para el diseño de transformador con devanados de bajo espesor

Tipo de fuerza	Densidad de Fuerza (N/m ³)		
	Sin carga	Carga nominal	Corriente de falla
Axial	10.788,00	$3.5483 \cdot 10^5$	$2.2803 \cdot 10^7$
Radial	3.290,00	$6.6229 \cdot 10^5$	$5.7789 \cdot 10^7$
Total	11.000,00	$6.6574 \cdot 10^5$	$5.7893 \cdot 10^7$

C. Asimetría axial en la disposición de los devanados

Debido a las limitaciones constructivas pueden ocurrir asimetrías en la disposición de los devanados, aunque éstos tengan igual longitud. En la Figura 6 se observa el comportamiento del campo magnético y de las Fuerzas Electromecánicas.

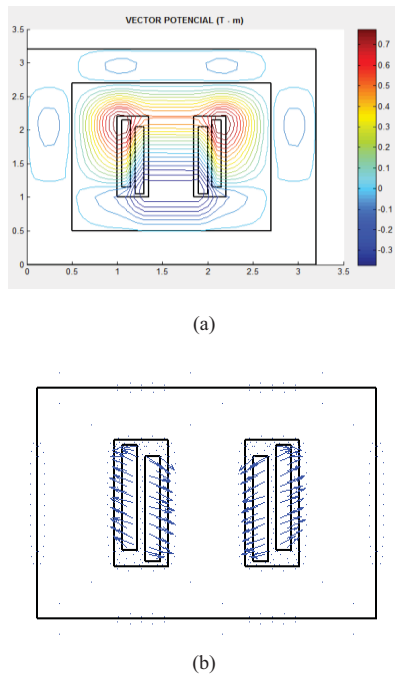


Fig. 6 Devanados con asimetría axial (a) Característica del campo magnético. (b) Característica de la fuerza electromecánica

Se realizan simulaciones para diferentes casos de asimetría axial. En la Figura 7 se muestra la variación de la densidad de fuerza en función de la asimetría relativa.

D. Disposición de devanados de diferente longitud

Debido a la característica del material de los devanados, se puede presentar el caso de que éstos no tengan igual longitud. Se presentan a continuación las simulaciones para devanados con diferente longitud pero que están dispuestos simétricamente con respecto al eje axial, y para devanados que se disponen con la base a la misma altura.

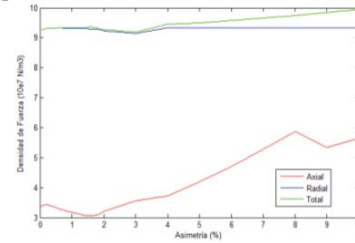
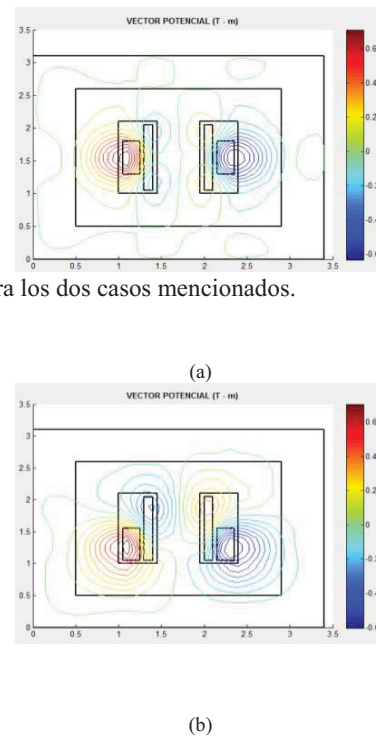


Fig. 7 Variación de las densidades de fuerza axiales, radiales y totales con respecto a la asimetría de los devanados

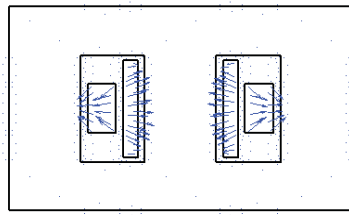
En la Figura 8 se presenta la característica del campo magnético para los dos casos mencionados.



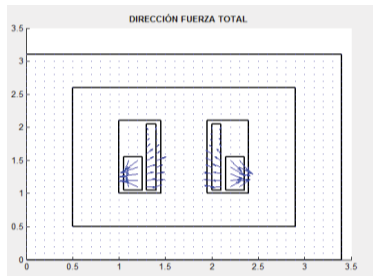
nético para los dos casos mencionados.

Fig. 8 Comportamiento del campo magnético para devanados con diferente longitud. (a) Devanados dispuestos simétricamente en el eje axial. (b) Devanados con la base a la misma altura

En la Figura 9 se observa la característica de las fuerzas electromecánicas para los dos casos expuestos.



(a)



(b)

Fig. 9 Característica de las Fuerzas Electromecánicas para devanados de diferente longitud. (a) Devanados dispuestos simétricamente en el eje axial. (b) Devanados con la base a la misma altura

Para devanados dispuestos simétricamente, los resultados de la simulación para la magnitud de las fuerzas electromecánicas cuando circula una corriente de falla son:

- Fuerza Total: $9,20 \cdot 10^7 \text{ N/m}^3$
- Fuerza Radial: $7,37 \cdot 10^7 \text{ N/m}^3$
- Fuerza Axial: $7,81 \cdot 10^7 \text{ N/m}^3$

En el caso de devanados con la base a la misma altura, las fuerzas electromecánicas son:

- Fuerza Total: $1,38 \cdot 10^8 \text{ N/m}^3$
- Fuerza Radial: $1,03 \cdot 10^8 \text{ N/m}^3$
- Fuerza Axial: $1,04 \cdot 10^8 \text{ N/m}^3$

IV. APLICACIÓN A UN TRANSFORMADOR DEL SISTEMA NACIONAL DE TRANSMISIÓN

El modelo desarrollado se aplica al siguiente autotransformador del Sistema Nacional de Transmisión:

- Número de fases: Monofásico
- Voltaje fase – fase: 230/138/13.8 kV
- Frecuencia: 60 Hz
- Potencia: 125/125/40 MVA

A. Características Principales

Para comprender las características físicas del autotransformador, se definen los siguientes términos ^[6]:

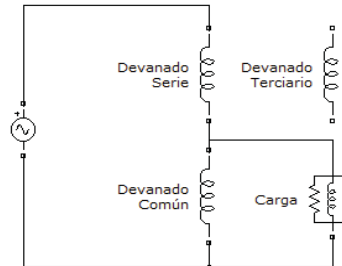
Devanado terciario: Es el devanado de 13,8 kV que formará parte de la configuración delta del banco de autotrans-

formadores.

Devanado común: En un autotransformador, es el devanado en el cual se encuentra el voltaje del secundario del transformador. Se denomina devanado común debido a que en la estructura final del autotransformador, también forma parte del devanado primario.

Devanado serie: Es la parte del devanado del autotransformador que sólo corresponde al primario del transformador.

En la Figura 10 se observa el significado de cada devana-



do.

Fig. 10 Definición de los devanados de un autotransformador

Las dimensiones para implementación del modelo se muestran en la Tabla 4. La disposición de los devanados es simétrica en el eje axial y alrededor de la columna central del núcleo.

Tabla 4

Devanado	Diámetro Interno (mm)	Diámetro Externo (mm)	Altura (mm)
Terciario	815,3	875,3	2.060,3
Común	1.095,3	1.175,3	2.256,0
Serie	1.575,3	1.647,3	2.175,0

Dimensiones de los devanados

Adicionalmente se tienen los siguientes datos:

- Diámetro de las columnas 0,7913 mm
- Diámetro de los yugos 0,8669 mm
- Densidad de corriente 3 A/mm²
- Distancia Terciario – Núcleo 12 mm
- Distancia Común – Núcleo 110 mm
- Distancia Serie – Núcleo 200 mm
- Distancia Serie – Común 200 mm

B. Determinación del soporte a las Fuerzas Electromecánicas

En la Figura 11 se muestra el comportamiento del campo magnético y de las fuerzas electromecánicas para una corriente de falla.

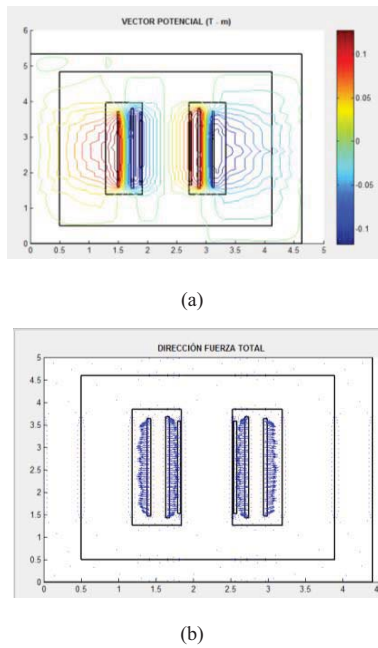


Fig. 11 Comportamiento del campo magnético y fuerzas electromecánicas para una corriente de falla

El valor de la densidad de fuerza máxima es de $4,558 \cdot 10^7$ N/m³, la misma que se presenta en el devanado exterior. De acuerdo a esta fuerza, la tensión promedio que soportará el conductor será $\sigma_{avg} = 2,29 \cdot 10^8$ N/m².

De acuerdo a la norma IEC 60076-5 el caso más crítico de fuerzas electromecánicas se evita con un conductor que cumpla:

$$\sigma \leq 0,9 \cdot R_{p0,2}$$

En la que $R_{p0,2}$ es el límite elástico del conductor, el cual se define como aquella tensión que cuando es aplicada deforma al conductor en un 0,2% de su longitud.

De acuerdo a lo anterior, el mínimo límite elástico para el conductor utilizado en este transformador deberá ser de:

$$R_{p0,2} > 0,9 \cdot 2,29 \cdot 10^8 \text{ N/m}^2$$

$$R_{p0,2} > 206 \text{ N/mm}^2$$

Los límites elásticos de los conductores con los que se construyen los devanados de un transformador de potencia varían de 90 a 280 N/mm², con lo que se puede concluir que el transformador soporta las fuerzas electromecánicas sin ningún problema.

C. Determinación del comportamiento térmico ^[7]

Se presenta a continuación el cálculo del efecto térmico cuando circula una corriente de falla.

Para el caso del cobre, la ecuación que indica el cambio de temperatura en función de la densidad de corriente viene

dada por (11).

$$\theta_1 = \theta_0 + \frac{2 \cdot (235 + \theta_0)}{\frac{J^2 \cdot t}{106.000} - 1} \quad (11)$$

θ_0 y θ_1 son las temperaturas antes y después de la falla respectivamente. J es la densidad de corriente de falla en A/mm².

Para el caso de estudio, se considera una temperatura previa de 95°C, una densidad de corriente de falla de 38,4 A/mm² y una duración de falla de 2 s, que es el tiempo comúnmente aplicado en diseño de transformadores de potencia. Al aplicar los datos anteriores en (11) se tiene:

$$\theta_1 = 113^\circ\text{C}$$

La temperatura para el cobre no debe sobrepasar de 250°C. El presente diseño cumple lo anterior con un amplio margen de seguridad.

V. CONCLUSIONES

La circulación de corrientes de alta intensidad por los devanados de un transformador, en conjunto con la existencia intrínseca de un campo magnético, crea fuerzas electromecánicas que podrían causar un daño permanente en el equipo.

En el presente trabajo se ha desarrollado un modelo que resuelve las ecuaciones de Maxwell para determinar el campo magnético en un caso cuasi-estático. Para ello se ha utilizado un método numérico basado en el análisis de elementos finitos.

Debido a la relación no lineal entre la intensidad de campo magnético y la inducción magnética, un proceso iterativo ha sido incluido dentro del modelo, el cual calcula en cada paso los valores de permeabilidad relativa e inducción magnética. El proceso continúa hasta tener una solución confiable. Estos pasos son importantes ya que sin ellos la solución es arbitraria y es muy probable que no correspondan a lo que sucede en la realidad.

El comportamiento de las fuerzas electromecánicas es diferente para el caso de un transformador de dos devanados y dos columnas con el de un transformador de dos devanados y tres columnas. En el primero las fuerzas del devanado primario y secundario provocarán una presión en los devanados hacia el núcleo del transformador. En el segundo caso, el devanado interno sufrirá la presión hacia el núcleo, en tanto que el devanado externo sufrirá tensiones que tenderán a estirar los conductores que forman parte del devanado.

Si el flujo magnético fuera uniforme y mantuviera la misma dirección en toda la longitud del camino magnético, no existirían fuerzas axiales, sólo existirían fuerzas radiales. El cambio de dirección del campo magnético hace que aparezcan fuerzas axiales justamente en aquellos puntos en

los que se da dicho cambio. Por esta razón, se encuentran fuerzas axiales en los extremos de los devanados. En la parte media de los devanados, al ser axial el campo magnético, las fuerzas electromecánicas serán predominantemente radiales.

Con datos de potencia y voltajes iguales, el diseño de un transformador de dos devanados a dos columnas tendrá una magnitud de fuerzas totales mayor a la que tiene un transformador de dos devanados a tres columnas. Es por lo tanto importante realizar un análisis del comportamiento del transformador ante corrientes de falla, para determinar las implicaciones de utilizar uno de los dos diseños.

Las fuerzas electromecánicas son mayores en los devanados de mayor espesor y menor longitud que en los devanados con menor espesor y mayor longitud.

Se minimizan las fuerzas electromecánicas cuando los devanados están distribuidos simétricamente a lo largo de la columna del núcleo. Al existir asimetrías estas fuerzas empiezan a aumentar debido al diferente comportamiento del campo magnético, el cual encuentra diferentes caminos para cerrarse de los que comúnmente se tienen en el núcleo del transformador.

Para devanados de diferente longitud y con simetría axial no existe la presión en la mitad del devanado debido a la acumulación de las fuerzas axiales, en tanto que para devanados cuya base inicia a la misma altura la presión está concentrada en la parte superior del devanado de mayor longitud.

Una vez que se tiene el diseño del transformador, el cálculo de las densidades de fuerza electromecánica y de las tensiones mecánicas a las que podría ser sometido el transformador es útil para determinar el tipo de conductor que conformará los devanados. Los conductores son fabricados para soportar cierta tensión con una deformación de 0,2% con respecto a su longitud.

Debido a la dinámica del fenómeno de cortocircuito en un sistema de potencia, los efectos electromecánicos serán más relevantes que los efectos térmicos. En este tipo de fenómeno, el efecto térmico será despreciable por los altos valores de constantes de tiempo que se tienen para la conducción del calor del devanado al aceite y al papel.

VI. REFERENCIAS

1. Del Vecchio R., *Transformer Design Principles with Application to Core Form Power Transformers*. CRC Press
2. Giorgio Bertanolli, *Short Circuit Duty of Power Transformers*, ABB 2006
3. IEC 60076-5 Annex A, *Theoretical Evaluation of the Ability to Withstand the Dynamic Effects of Short Circuit*, 2006
4. Julius A. Stratton, *Electromagnetic Theory*, IEEE Press
5. Jianning Jin, *The Finite Element Method in Electromagnetics*, IEEE Press, 2002
6. Staff del MIT, *Circuitos Magnéticos y Transformadores*, Reverté, 1965
7. Khulkharni S.V., *Transformer Engineering, Design and Practice*, Marcel Dekker Inc. New York 2004

VII. BIOGRAFÍAS

Fausto Valencia, Ingeniero Eléctrico y Magíster en Ingeniería Eléctrica en la Escuela Politécnica Nacional en 1999 y 2013 respectivamente.

Desde el año 1999 hasta el año 2002 ha participado en proyectos de diseño y construcción de instalaciones eléctricas residenciales, industriales y de sistemas de distribución como profesional independiente y como parte del Cuerpo de Ingenieros del Ejército. En CELEC EP TRANSELECTRIC desde el 2002 hasta el 2008 trabajó en el Departamento de Operación como operador del Centro de Operaciones de Transmisión y realizando estudios de flujos de potencia, estabilidad transitoria y análisis estadísticos; desde el año 2008 hasta el presente se desempeña en el Departamento de Mantenimiento como ingeniero de pruebas de equipo primario y realizando análisis de especificaciones técnicas y diagnóstico de equipos de subestaciones del Sistema Nacional de Transmisión. Sus áreas de incluyen el estudio y aplicación de campos electromagnéticos en modelos de ingeniería eléctrica.

Fausto Valencia es miembro del IEEE y de las siguientes sociedades: IEEE Power & Energy Society, IEEE Magnetics Society y de la IEEE Dielectrics and Electrical Insulation Society.

Mentor Poveda, Consultor internacional de la Organización Latinoamericana de Energía (OLADE). Consultor registrado en el BID, Banco Mundial y GTZ.

A la presente fecha, colabora como consultor en OLADE en temas relacionados con uso eficiente de la energía, manejo de la demanda y el subsector eléctrico. Profesor Principal del Departamento de Energía Eléctrica de la Escuela Politécnica Nacional del Ecuador. Participó como consultor en el diseño de las obras más importantes del sector eléctrico ecuatoriano, como la Central Hidroeléctrica Paute y el Sistema Nacional de Transmisión. Su experiencia incluye importantes estudios de sistemas de distribución eléctrica y reducción de pérdidas, para varias ciudades del Ecuador, América Central y Argentina. 35 años de experiencia técnica, administrativa y docente. Master of Science in Electrical Engineering en Purdue University, USA, 1976. Ingeniero Eléctrico de la Escuela Politécnica Nacional, Ecuador, 1972.