

Short-Circuit Impedance Calculation of 25 MVA Autotransformer with Tertiary Winding using FEM

Victor M. Jimenez-Mondragon , *Member, IEEE*, Victor J. Fernández-Carrazana , *Non-Member, IEEE*, Juan C. Olivares-Galvan , *Senior Member, IEEE* and Rodrigo Ocón-Valdez , *Senior Member, IEEE*

Abstract—In this article, the percentage of short-circuit impedance is calculated using the finite element method for a single-phase power autotransformer with tertiary winding. The autotransformer specifications are: 25 MVA, 230 kV, 60 Hz, three-legged core type. A detailed 3D model where mixed formulations in terms of scalar and vector potential and circuit coupling is used. This type of study is essential to design the autotransformer and guarantee the impedance value, and so the safety and operability of electrical power systems. To calculate the percentage of short-circuit impedance the voltage relationship between the short-circuit voltage and the nominal voltage is used. In addition, the magnetic energy storage technique is presented as another alternative to calculate this parameter. The results are validated with the data from the laboratory tests obtaining differences of less than 5%.

Index Terms—Autotransformer, finite element method, impedance, short-circuit, tertiary winding

I. INTRODUCCIÓN

El desarrollo alcanzado hoy en día no sería posible sin el uso de la energía eléctrica y en ese sentido el autotransformador de potencia cobra gran relevancia. La invención del autotransformador fue propuesta en 1836 por C. J. Page utilizando un núcleo abierto y corriente directa [1]. A nivel industrial el autotransformador se utilizó por primera vez en 1908 como arrancador para motores de inducción o arrancador Korndorfer [2]. Un autotransformador es un transformador especial que cumple las mismas funciones que un transformador convencional, con la diferencia de hacerlo no solo mediante inducción electromagnética sino también por conducción, ya que presenta un solo devanado que opera como primario y secundario simultáneamente. El autotransformador presenta ventajas económicas respecto a los transformadores convencionales, cuando se tienen valores de tensión similares (por ejemplo 230 a 115 kV o 230 a 400 kV) en la redes eléctricas [3].

Para el caso de autotransformadores con conexión estrella-estrella (en este caso la conexión delta-estrella no es posible porque los devanados están interconectados) es común el uso de devanados terciarios, el propósito principal de este es mantener un balance de amperes-vuelta en las tres fases, independientemente de la condición de conexión del neutro

y al mismo tiempo modifica las características de secuencia cero. Además, permite la circulación de corrientes de tercer armónico al tener conexión en delta. En otros casos también puede ser utilizado como devanado para alimentar carga auxiliar [4].

Determinar el porcentaje de impedancia de cortocircuito ($\%Z_{cc}$) en autotransformadores es fundamental para diseñar sistemas de potencia fiables y seguros. La tendencia actual para realizar el cálculo preciso del $\%Z_{cc}$ es mediante el uso de software comerciales basados en el Método de los Elementos Finitos (MEF) [5]. Con este método, dado que se toman en cuenta todos los detalles de la geometría y los materiales del dispositivo, se logra un modelo muy cercano a la realidad. Este tipo de modelos permite realizar el cálculo del $\%Z_{cc}$ y brindar recomendaciones a las empresas antes de construir el autotransformador, lo cual representa un ahorro de dinero y esfuerzo.

Debido a que en un autotransformador existe conexión física entre los devanados, la impedancia de cortocircuito es baja y en consecuencia la corriente de cortocircuito y las fuerzas de cortocircuito son elevadas [6]. Esto justifica la importancia de realizar estudios a este tipo de dispositivo con el fin de garantizar la seguridad y operatividad de los sistemas eléctricos de potencia. Existen algunos estudios desarrollados sobre la impedancia de cortocircuito en *transformadores* y *autotransformadores* [5], [7]–[9]. En [5] se modela un transformador de potencia trifásico sin devanado terciario usando software de elementos finitos en 3D. Se obtienen los valores de la impedancia de cortocircuito y se comparan con los datos de laboratorio para validar el modelo. En [7] se analiza la inestabilidad del devanado interno de un autotransformador de potencia trifásico usando un modelo de elementos finitos en 3D. Se calcula la distribución del flujo disperso del devanado interno y la distribución de la fuerzas eléctricas bajo un cortocircuito repentino. El modelo se valida al comparar los valores medidos con el cálculo de la impedancia de cortocircuito. Sin embargo, no toman en cuenta los elementos estructurales, ni el tanque en el modelo; tampoco tienen en cuenta la curva B-H del material del núcleo. En [8] se simula un cortocircuito trifásico en el devanado terciario de un transformador de potencia trifásico para verificar que el devanado cumpla con las especificaciones técnicas solicitadas por el cliente, en el modelo no toman en cuenta los elementos de sujeción ni el tanque del dispositivo. Con una fuente de alimentación de bajo voltaje se calculan las impedancias de cortocircuito y se valida técnicamente el devanado terciario. En [9] se presenta un método para calcular la impedancia de cortocircuito de

Victor M. Jimenez and Juan C. Olivares are with Departamento de Energía, Universidad Autónoma Metropolitana-Azcapotzalco, México (e-mail: vmjm@azc.uam.mx, jolivares@azc.uam.mx)

Victor J. Fernández is student of Maestría en Ciencias en Ingeniería Electromagnética, Universidad Autónoma Metropolitana-Azcapotzalco, México (e-mail: al2203802002@azc.uam.mx)

Rodrigo Ocón is with FES Aragón, Universidad Nacional Autónoma de México (e-mail: rodrigoocón99@aragon.unam.mx)

Corresponding author: Juan C. Olivares-Galvan

un transformador sin devanado terciario usando software de elementos finitos en 3D. No se analiza a profundidad el campo magnético de fuga del devanado y se comparan los cálculos con los resultados medidos ignorando el efecto de saturación del núcleo.

Solo se han encontrado 7 artículos sobre autotransformadores con devanado terciario publicados desde 1959 hasta el 2018 ([10]–[16]). En [10] se realiza la compensación del voltaje terciario en un autotransformador de 250 MVA. En [11] se demuestra que los resistores de tierra a neutro no son una solución efectiva para limitar la corriente de falla a tierra en el lado de bajo voltaje de un autotransformador con devanado terciario en delta. En [12] se determinan las condiciones para mantener el voltaje de devanado terciario de un autotransformador dentro de los límites de la norma bajo la operación del cambiador de derivaciones bajo carga. En [13] se calculan los parámetros del devanado terciario para describir la condiciones de regulación de voltaje de varios autotransformadores. En [14] se analiza un autotransformador trifásico con devanado terciario altamente saturado durante un transitorio de cortocircuito. En [15] se analiza el efecto de las corrientes inducidas geomagnéticamente en los devanados terciarios de un autotransformador. En [16] se estudia un circuito especial de polarización de la corriente de falla a tierra en un autotransformador con devanado terciario.

En la literatura no se reporta ningún estudio sobre cálculo de impedancias de cortocircuito en autotransformadores con devanado terciario utilizando el MEF, con un modelo a detalle considerando los elementos estructurales y tanque. Estas impedancias son más pequeñas que en un transformador de la misma capacidad, por lo que el cálculo requiere mayor precisión (lo que se puede obtener con el MEF) para cumplir con los valores de garantía en las pruebas finales, de aquí la novedad del estudio realizado. Además estas impedancias determinan las corrientes de cortocircuito y de ahí parte el cálculo de los esfuerzos mecánicos por cortocircuito en los devanados.

II. IMPEDANCIA DE CORTOCIRCUITO

Para determinar la impedancia de cortocircuito en un transformador convencional de dos devanados se cortocircuita el devanado secundario y se alimenta con voltaje reducido variable el primario hasta lograr que circule por el devanado cortocircuitado la corriente nominal.

En el laboratorio la forma más sencilla de calcular el $\%Z_{cc}$ es a través de (1).

$$\%Z_{cc} = \frac{V_{cc}}{V_n} \cdot 100 \quad (1)$$

donde, V_{cc} es el voltaje de cortocircuito y V_n es el voltaje nominal.

Otra alternativa para calcular el $\%Z_{cc}$ es usando el MEF a través del método de almacenamiento de energía magnética ya que es simple y preciso [17].

La impedancia (Z) es la suma de la resistencia (R) y la reactancia (X), pero debido a que $X \gg R$ se puede despreciar (R) [18] y por tanto:

$$Z \cong X \quad (2)$$

Para calcular X se utiliza la siguiente ecuación:

$$X = \frac{4\pi f W_m}{I^2} \quad (3)$$

donde, f es la frecuencia del sistema, I es la corriente y W_m es la energía magnética almacenada, que a su vez puede ser calculada como:

$$W_m = \int_v \left(\int_0^B \mathbf{H} \cdot d\mathbf{B} \right) dV \quad (4)$$

\mathbf{H} es la intensidad del campo magnético y \mathbf{B} es la densidad de flujo magnético. La impedancia de cortocircuito está dada como un porcentaje de la impedancia base (Z_b) del autotransformador, la misma puede ser calculada como:

$$Z_b = \left(\frac{V_r^2}{S_r} \right) \quad (5)$$

donde, V_r es el voltaje entre fases en kV y S_r es la potencia aparente del autotransformador en MVA.

Una vez que tenemos la impedancia de cortocircuito y la impedancia base se utiliza la siguiente ecuación para determinar el $\%Z_{cc}$:

$$\%Z_{cc} = \left(\frac{Z}{Z_b} \right) \cdot 100 \quad (6)$$

III. FORMULACIÓN ELECTROMAGNÉTICA

El MEF es un método numérico para la solución de ecuaciones diferenciales parciales en el que se subdivide la geometría en elementos más pequeños, definidos como elementos finitos, en los que la aproximación a partir de la solución exacta se resuelve por interpolación de una solución aproximada. Este método ha ganado relevancia debido a que permite modelar problemas geométricos complejos [19]. Empleando la formulación de potenciales (magnético vectorial, magnético escalar, magnético reducido y eléctrico escalar) en las diferentes regiones del autotransformador es posible calcular la energía almacenada para posteriormente obtener el $\%Z_{cc}$. Esta sección es importante ya que se define de forma precisa la formulación en términos de potenciales utilizada para resolver el problema del autotransformador, y así el método de solución basado en elementos finitos no se ve como una caja negra. Dentro de las distintas formulaciones disponibles se podría haber sólo utilizado la del potencial magnético vectorial, pero requiere de tiempos de cómputo largos.

Los campos electromagnéticos están gobernados por las ecuaciones de Maxwell, que están expresadas en términos de la intensidad de campo magnético (\mathbf{H}), la densidad de flujo magnético (\mathbf{B}), la intensidad de campo eléctrico (\mathbf{E}), la densidad de campo eléctrico (\mathbf{D}) y la densidad de corriente (\mathbf{J}). Expresadas en forma diferencial y en el dominio de la frecuencia son:

$$\nabla \times \mathbf{E} = -j\omega\mathbf{B} \quad (7)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0 \quad (8)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{D} = \rho \quad (9)$$

$$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J} \quad (10)$$

Estas ecuaciones se complementan con relaciones que expresan las propiedades de los materiales, es decir, relaciones constitutivas:

$$\mathbf{J} = \sigma \mathbf{E} \quad (11)$$

$$\mathbf{B} = \mu \mathbf{H} \quad (12)$$

donde, $\mu = \mu_0 \mu_r$ que para el caso del autotransformador es un término no lineal, μ_0 es la permeabilidad magnética del vacío, μ_r es la permeabilidad relativa del material y σ es la conductividad eléctrica del material.

A la hora de abordar los problemas electromagnéticos de baja frecuencia existen varias formas de darle solución, una de ellas es basándose en las formulaciones en términos los siguientes potenciales:

- Potencial magnético vectorial (\mathbf{A}).
- Potencial magnético escalar (ψ).
- Potencial magnético escalar reducido (ϕ).

Para el caso de estudio se divide el autotransformador en tres regiones:

- La región compuesta por el tanque y los elementos de sujeción, zona conductora con corrientes de remolino.
- La región compuesta por los devanados, zona con conductores delgados o filamentosos.
- La región compuesta por el núcleo, zona magnética no conductora con comportamiento no lineal.

A. Región de los devanados

La intensidad del campo magnético se puede calcular como:

$$\mathbf{H} = \mathbf{H}_s + \mathbf{H}_m \quad (13)$$

donde, \mathbf{H}_s es la intensidad de campo magnético debido a la presencia de la fuente de corriente y \mathbf{H}_m es el resto del campo.

Para esta región se toman los devanados como conductores filamentosos, bajo esta suposición \mathbf{H}_s puede ser calculada a partir de la Ley de Biot-Savart [20], la cual establece que es posible calcular la intensidad del campo magnético producido por un conductor filamento a cualquier distancia de éste mediante la siguiente ecuación:

$$\mathbf{H}_s = -\frac{1}{4\pi} \int_{\Omega} \mathbf{J}_s \times \nabla \left(\frac{1}{r} \right) d\Omega \quad (14)$$

\mathbf{J}_s es la densidad de corriente de la fuente de la bobina y su distribución es perfectamente conocida, r es la distancia entre el conductor filamento y el punto en que se quiere calcular \mathbf{H} y Ω denota el volumen ocupado. En el resto del campo al no existir fuente de corriente, $\nabla \times \mathbf{H}_m = 0$, permite expresar \mathbf{H}_m como el gradiente negativo del potencial magnético escalar reducido (ϕ), por lo tanto (13) se puede escribir como:

$$\mathbf{H} = \mathbf{H}_s - \nabla \phi \quad (15)$$

Sustituyendo la ecuación (15) en (8) se obtiene la ecuación a resolver en esta región del autotransformador:

$$\nabla \cdot \mu \mathbf{H}_s - \nabla \cdot \mu \nabla \phi = 0 \quad (16)$$

B. Región del núcleo

Para esta región no hay densidad de corriente ($\mathbf{J} = 0$), se puede calcular la intensidad del campo magnético a través del potencial magnético escalar (ψ):

$$\mathbf{H} = -\nabla \psi \quad (17)$$

Al sustituir la ecuación (17) en (12) se tiene:

$$\mathbf{B} = -\mu \nabla \psi \quad (18)$$

Aplicando la divergencia a (18) se obtiene como resultado la ecuación que gobierna el comportamiento de la región del núcleo del autotransformador considerando la no linealidad del material del mismo:

$$\nabla \cdot (\mu \nabla \psi) = 0 \quad (19)$$

C. Región del tanque y los elementos estructurales

Debido a la propiedad solenoidal de la densidad de flujo magnético, el mismo se puede obtener a partir de un potencial magnético vectorial (\mathbf{A}):

$$\mathbf{B} = \nabla \times \mathbf{A} \quad (20)$$

Ahora, si se sustituye (20) en la ecuación de la Ley de Faraday (7), se puede reescribir la intensidad de campo eléctrico como:

$$\nabla \times \mathbf{E} + \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} = 0 \quad (21)$$

$$\nabla \times \left(\mathbf{E} + \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} \right) = 0 \quad (22)$$

la ecuación (22) permite definir el gradiente del potencial eléctrico escalar (V) como:

$$\mathbf{E} + \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} = -\nabla V \quad (23)$$

Si se relaciona (23) con (11), la densidad de corriente (\mathbf{J}) quedará como:

$$\mathbf{J} = \sigma \mathbf{E} = \sigma \left(-\nabla V - \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} \right) \quad (24)$$

Utilizando las ecuaciones (10), (12) y (20), se obtiene:

$$\nabla \times \mathbf{H} = \nabla \times \left(\frac{1}{\mu} \mathbf{B} \right) = \mathbf{J} \quad (25)$$

$$\nabla \times \left(\frac{1}{\mu} \nabla \times \mathbf{A} \right) = \mathbf{J} \quad (26)$$

Sustituyendo (24) en (26), se obtiene la ecuación que define el comportamiento electromagnético de la región conductora del autotransformador:

$$\nabla \times \left(\frac{1}{\mu} \nabla \times \mathbf{A} \right) = \sigma \left(-\nabla V - \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} \right) \quad (27)$$

$$\nabla \times \left(\frac{1}{\mu} \nabla \times \mathbf{A} \right) + \sigma \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} = -\sigma \nabla V \quad (28)$$

Como no existe la presencia de una fuente externa conectada a los componentes estructurales del autotransformador,

entonces el potencial eléctrico escalar es nulo, por lo tanto (28) queda como:

$$\nabla \times \left(\frac{1}{\mu} \nabla \times \mathbf{A} \right) + \sigma \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} = 0 \quad (29)$$

La ecuación (29) en el dominio de la frecuencia queda como:

$$\nabla \times \left(\frac{1}{\mu} \nabla \times \mathbf{A} \right) + \sigma j \omega \mathbf{A} = 0 \quad (30)$$

Para resolver esta ecuación en el problema del autotransformador en 3D, se deben calcular las tres componentes del potencial magnético.

IV. MODELADO

En la Tabla I se muestran los datos de la placa del autotransformador a modelar, se utilizó el software comercial *AltairFlux* [21] y la curva B-H correspondiente al material del núcleo (*acero al silicio de grano orientado de grado M3*). Los devanados se tomaron como bobinas no malladas para disminuir el esfuerzo computacional y se emplea una formulación acoplada circuito-campo. Solo se construyó la octava parte de la geometría, ya que se tiene una condición de simetría con respecto al eje *zx* y con respecto al eje *zy* donde la intensidad del campo magnético es tangencial, y otra condición de simetría respecto al eje *xy* en la cual la intensidad del campo magnético es normal. El autotransformador cuenta con cinco devanados: alta tensión (rojo), baja tensión (verde), terciario (azul) y dos devanados reguladores (magenta), ver Fig. 1. En la Fig. 2a se observan las componentes activas del equipo y en la Fig. 2b se muestra al autotransformador durante pruebas en la fábrica.

TABLA I
PLACA DE DATOS DEL AUTOTRANSFORMADOR BAJO ESTUDIO.

Características	Designación	Valor	Unidades
Número de fases		1	
Clase		ONAF	
Frecuencia nominal	f	60	Hz
Alta tensión	V_f	$230\,000/\sqrt{3}$	V
Capacidad	S	25	MVA
Corriente nominal	I_n	188.27	A (rms)
Conexión en banco		Y	
Baja tensión	V_f	$115\,000/\sqrt{3}$	V
Capacidad	S	25	MVA
Corriente nominal	I_n	376.52	A (rms)
Conexión en banco		Y	
Terciario	V_{LL}	13 800	V
Capacidad	S	7.5	MVA
Corriente nominal	I_n	543.48	A (rms)
Conexión en banco		Δ	

Los datos de diseño son :

- El devanado de alta tensión (rojo) y baja tensión (verde) cuentan con 500 vueltas, el terciario (azul) tiene 104 vueltas y los reguladores (magenta) tienen 104 vueltas.
- El núcleo es monofásico de 3 piernas, cruciforme en 28 pasos, formado por grupos de laminaciones de acero de grano orientado, grado M3, de diferentes anchos. Para el presente modelo se utilizó la curva B-H correspondiente

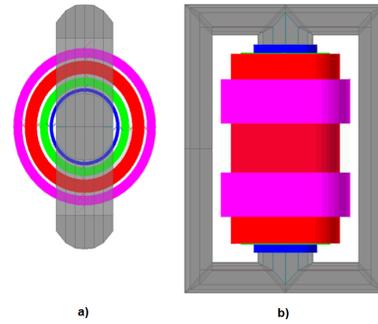


Fig. 1. Devanados del autotransformador, a) vista superior y b) vista frontal.

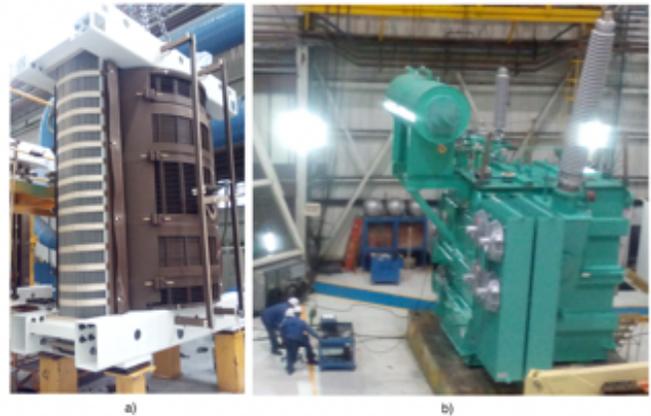


Fig. 2. Autotransformador, a) núcleo y devanados y b) dispositivo bajo pruebas.

del material (*acero al silicio de grano orientado grado M3*).

- Las paredes del tanque y elementos de sujeción están fabricados con acero estructural A36 [22].

A. Condiciones de frontera

Para el cálculo del $\%Z_{cc}$ en un núcleo de tres piernas es importante tener en cuenta la profundidad de penetración δ [17], ya que el flujo producido por los devanados fluye por la superficie de las paredes del tanque [18], la cual se define como:

$$\delta = \sqrt{\frac{2}{\omega \mu \sigma}} = \frac{1}{\sqrt{\pi f \mu_0 \mu_r \sigma}} \quad (31)$$

En este trabajo se modelan las paredes del tanque y los elementos estructurales con la condición de frontera de impedancia superficial (ver Fig. 3), para reducir la densidad de la malla en esta región y por tanto disminuir el esfuerzo computacional [23]. En la Tabla II se muestra el valor de la profundidad de penetración (δ) y el ancho de las láminas de las paredes del tanque y los elementos de sujeción. Se aprecia que δ es menor que el espesor de la pared del tanque, lo que justifica el uso de esta condición de frontera.

B. Mallado

Cuando se usa el método de elementos finitos, la calidad de la solución aproximada depende en parte del número y de

TABLA II
PROFUNDIDAD DE PENETRACIÓN.

Región	δ	Espesor de las láminas
Paredes del tanque (A36)	1.91 mm	9.52 mm
Elementos de sujeción (A36)	1.91 mm	6.35 mm

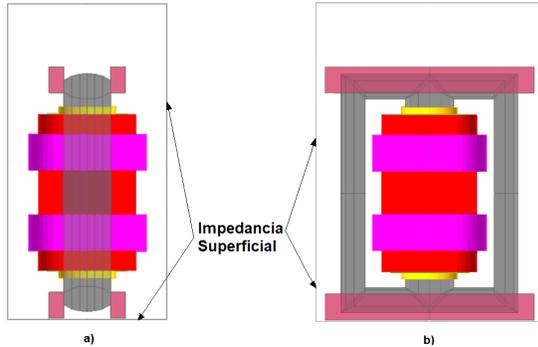


Fig. 3. Ilustración de la condición de frontera de impedancia superficial, a) vista lateral y b) vista frontal.

las dimensiones de los elementos finitos [24]. En las zonas donde el campo magnético tiene cambios abruptos es donde la malla debe ser más densa y en las zonas donde el campo magnético tiene poca variación se puede disminuir la cantidad de elementos [25].

Generar una buena malla es una de las acciones fundamentales en el proceso de modelado, y para ello hay que tener en cuenta las propiedades físicas del problema a resolver. Además el tamaño de sus elementos se debe tener en cuenta, ya que influye en el tiempo de cálculo y en los resultados a obtener. Cuando se emplean elementos muy pequeños se obtienen resultados más precisos pero a la vez se compromete el tiempo de cálculo, si por el contrario se usan elementos muy grandes se reduce el tiempo de cálculo pero los resultados pueden alejarse de la realidad [26]. Por esto es importante encontrar un balance entre esfuerzo computacional y fiabilidad de los resultados.

La malla definitiva se obtiene tras varias pruebas de mallado y es por ello que se utiliza una malla mixta donde se emplea el generador de malla *asistida* [21], ver Fig. 4. Con este tipo de mallas se obtienen elementos cúbicos y tetraédricos, la malla que se propuso en el modelo del autotransformador tiene 9,906 nodos y 45,316 elementos volumétricos. Esta malla tiene 65.35 % elementos de excelente calidad, 24.72 % de buena calidad, 2.81 % de calidad regular, 0.55 % de calidad baja y 6.58 % elementos no evaluados.

V. RESULTADOS

El modelo se resuelve mediante un estudio magneto-armónico a la frecuencia nominal del dispositivo [21]. Se determinan dos % de impedancias y para ello se emplean dos modelos:

- **% Z_{cc} alta-baja:** se alimenta el devanado de alta tensión con voltaje reducido variable hasta que circule por el devanado de baja tensión la corriente nominal, el devanado terciario se deja abierto.

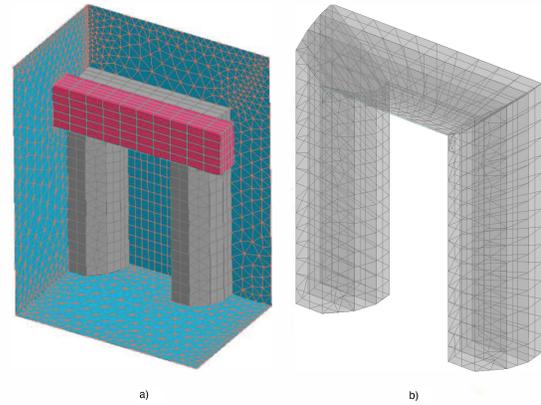


Fig. 4. Mallado del autotransformador, a) núcleo, tanque y elementos de sujeción y b) tanque.

- **% Z_{cc} alta-terciario:** se alimenta el devanado de alta tensión con un voltaje reducido variable hasta obtener la corriente nominal en el devanado terciario, el devanado de baja tensión se deja abierto.

Para los modelos se utilizan los circuitos de la Fig. 5, donde el circuito a) se utiliza para determinar la impedancia entre *alta – baja* y el circuito b) para determinar la impedancia *alta – terciario*. Para simular un circuito abierto o un cortocircuito usando la formulación circuito-campo, a la resistencia de circuito abierto R_{ca} se le asigna un valor muy elevado y a la resistencia que pone en cortocircuito el devanado R_{cc} se le asigna un valor muy pequeño. AV es el devanado de alto voltaje, TV es el devanado terciario y BV es el devanado de bajo voltaje.

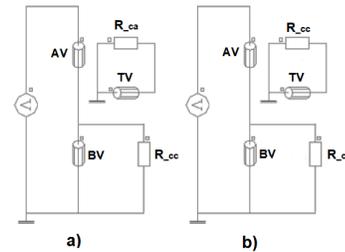


Fig. 5. Circuito eléctrico del autotransformador. a) Impedancia *alta-baja* y b) Impedancia *alta-terciario*.

En la Fig. 6 se muestra la distribución de la densidad de flujo magnético en el núcleo y elementos de sujeción del autotransformador para la prueba alta-terciario, alcanzando valores de hasta 0.14 T. Se observa que el campo magnético es muy pequeño en la pierna central, debido a que en la condición de cortocircuito los ampere-vuelta de cada devanado se anulan y por lo tanto el campo se concentra en las piernas laterales, elementos de sujeción y el tanque. En la Fig. 7 se observa la distribución de la densidad de flujo magnético para 1/8 de la sección del tanque. La región donde la magnitud de la densidad de flujo magnético es mayor, alcanzando un valor de hasta 0.57 T, corresponde con la menor distancia que se tiene del tanque a la mitad de la pierna central. En esta zona se inducen corrientes de remolino que pueden llegar a generar puntos calientes en el equipo. De aquí la importancia de incorporar los elementos

estructurales en el modelo de elemento finito, para un correcto cálculo de la impedancia de cortocircuito.

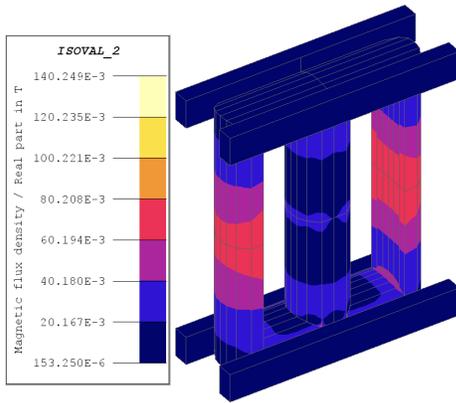


Fig. 6. Magnitud de la densidad de flujo magnético en el núcleo en la prueba alta-terciario.

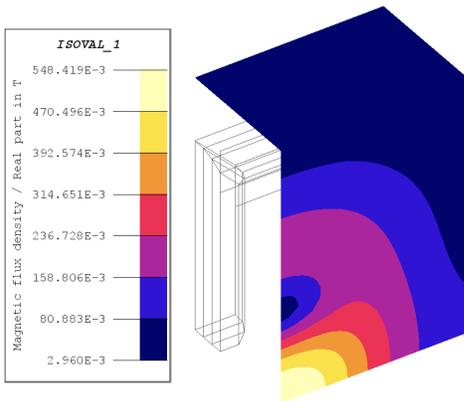


Fig. 7. Magnitud de la densidad de flujo magnético en el tanque en la prueba alta-terciario.

En la Tabla III se muestran los valores de voltaje de cortocircuito para cada uno de los modelos, con estos valores se garantiza que circule la corriente nominal por los devanados cortocircuitados durante las pruebas.

TABLA III
VOLTAJES DE ALIMENTACIÓN REDUCIDO PARA LAS PRUEBAS DE CORTOCIRCUITO.

Prueba	Voltaje cortocircuito	Voltaje teórico-calculado
alta-baja	5.47 kV	5.22 kV
alta-terciario	5.07 kV	4.84 kV

En la Tabla IV se muestran los valores de $\%Z_{cc}$ calculados usando (1), los valores calculados a partir de las mediciones de voltaje en las pruebas de laboratorio y el $\%$ de error.

En la Tabla V se muestran los valores de energía calculados mediante el software de elementos finitos para cada una de las pruebas. Con estos valores de energía se utiliza (3) para hallar los valores de $\%Z_{cc}$ alta-baja y alta-terciario, luego se utilizan las ecuaciones (5) y (6) para obtener los $\%Z_{cc}$ y compararlos con los resultados obtenidos en las pruebas de laboratorio, ver Tabla VI.

TABLA IV
COMPARACIÓN ENTRE $\%Z_{cc}$ CALCULADA USANDO (1) Y $\%Z_{cc}$ MEDIDA.

Prueba	$\%Z_{cc}$ calculado	$\%Z_{cc}$ medida	$\%$ error
alta-baja	4.11	3.93	+ 4.69
alta-terciario	3.81	3.65	+ 4.48

TABLA V
ENERGÍA TOTAL ALMACENADA EN EL AUTOTRANSFORMADOR DURANTE LAS PRUEBAS.

Prueba	Energía almacenada
alta-baja	340.97 J
alta-terciario	44.95 J

En las Tablas IV y VI se aprecia que los valores de $\%Z_{cc}$ obtenidos, tanto por el método de relación de voltajes, como por el método de energía almacenada, difieren en menos de un 5% de los resultados obtenidos en las pruebas de laboratorio cumpliendo con la norma ($\pm 10\%$) [27]. Los errores obtenidos se atribuyen a las variaciones dimensionales que se presentan durante la manufactura del equipo respecto a las dimensiones nominales (tolerancias de fábrica), tolerancias dimensionales durante el proceso de fabricación de los devanados, incertidumbre de los instrumentos de medición en las pruebas, efecto de los cables de conexión de las bobinas a las terminales (reactancia de los cables) y simplificaciones realizadas en el modelo respecto a las geometrías reales (distribuciones precisas de vueltas, diferencias constructivas en cada sección de las bobinas, etc.)

VI. CONCLUSIONES

A través de dos métodos se calcularon los $\%Z_{cc}$ *alta-baja* y *alta-terciario* de un autotransformador de potencia usando el MEF. El análisis en 3D brinda la posibilidad de estudiar el comportamiento del campo magnético en las diferentes regiones del dispositivo. Los cálculos realizados mediante el MEF arrojan un error del 4.38 % (*alta-baja*) y 3.23 % (*alta-terciario*), respectivamente. Un estudio de este tipo permite analizar el autotransformador antes de construirlo, esto significa un ahorro de tiempo y esfuerzo para las empresas fabricantes de este tipo de máquinas. El MEF no solo permite conocer los $\%Z_{cc}$, además se puede observar el comportamiento del campo magnético así como otros parámetros (corrientes, pérdidas, etc) de importancia para el diseño de autotransformadores. Como trabajo futuro se puede analizar los casos de autotransformadores de alta impedancia, los cuales pueden emplearse para limitar las corrientes de cortocircuito del sistema de potencia. Además, el control del flujo de dispersión es una tarea adicional de los diseñadores para garantizar la operación confiable de los autotransformadores, por lo que esto será estudiado con mayor detalle en trabajos posteriores.

AGRADECIMIENTOS

This work was supported by the Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (Conacyt México).

TABLA VI

COMPARACIÓN ENTRE $\%Z_{cc}$ CALCULADA USANDO EL MÉTODO DE ALMACENAMIENTO DE ENERGÍA Y $\%Z_{cc}$ MEDIDA.

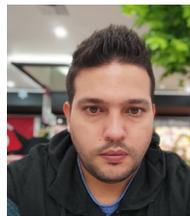
Prueba	$\%Z_{cc}$ calculado	$\%Z_{cc}$ medida	% error
alta-baja	4.10	3.93	+ 4.38
alta-terciario	3.76	3.65	+ 3.23

REFERENCIAS

- [1] A. A. Halacsy and G. H. Von Fuchs, "Transformer invented 75 years ago," *Electrical Engineering*, vol. 80, no. 6, pp. 404-407, 1961.
- [2] A. Mohd and R. Rupesh, "Transient over-voltages during switching of Korndorfer auto-transformer motor starters," *CIGRE India Journal*, vol. 9, no. 2, pp. 7-10, 2020.
- [3] G. Ion, S. Costinas, A. Stan and F. Balasiu, "Assessment of Life Cycle of Autotransformers," *2022 International Conference on Electrical, Computer and Energy Technologies (ICECET)*, Prague, Czech Republic, pp. 1-5, July 2022.
- [4] IEEE Guide for the Application of Tertiary and Stabilizing Windings in Power Transformers, C57.158-2017, IEEE Power and Energy Society, 2017.
- [5] P. Zhihua, Z. Hongfa, Y. Jintian, H. Guohua and T. Jie, "Three-dimensional leakage magnetic field simulation and short-circuit impedance calculation of large yoke transformer," *International Conference on Intelligent Computing, Automation and Systems*, Chongqing, China, pp. 479-482, 2021.
- [6] T. Pavičić, B. Filipović-Grčić, D. Filipović-Grčić and B. Jurišić, "Effects of autotransformer's stabilizing winding on current-voltage conditions during unsymmetrical faults," *Electric Power Systems Research*, vol. 196, pp. 107259, 2021.
- [7] H. Wang, Y. Li, Y. Jing, and D. Zou, "Research on radial stability of autotransformer inner winding under the short-circuit condition," *International Conference on Power Electronics and Drive Systems (PEDS)*, Honolulu, HI, USA, pp. 312-315, 2017.
- [8] T. Chiulan and B. Pantelimon, "A practical example of power transformer unit winding condition assessment by means of short-circuit impedance measurement," *2009 IEEE Bucharest PowerTech*, Bucharest, Romania, pp. 1-4, 2009.
- [9] Z. Ye et al., "A calculation method to adjust the short-circuit impedance of a transformer," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 223 848-223 858, 2020.
- [10] L. Tang and P. Zhao, "Tertiary voltage unbalance compensation for 500 kV single phase autotransformer banks," *Transmission and Distribution Conference and Exposition*, Denver, CO, USA, vol. 8, pp. 1-6, 2018.
- [11] C. Seneviratne and C. Ozansoy, "Why neutral earthing resistors are ineffective for autotransformers with the delta tertiary winding," *9th International Conference on Electrical and Electronics Engineering*, Bursa, Turkey, vol. 8, pp. 484-488, 2015.
- [12] I. V. YaYakimets, "Tertiary winding voltage stabilization in autotransformers with tap change load," *Electricity (in Russian)*, vol. 3, pp. 17-22, 1996.
- [13] I. V. Yakimets and V. G. Narovlyanskii, "Autotransformers with a voltage-stabilized tertiary winding," *Electrical Technology*, vol. 1, no. 95, pp. 21-30, 1995.
- [14] C. M. Arturi, "Model of a highly saturated three-phase autotransformer with tertiary winding and five-limb core and analysis of a time-varying short-circuit transient," *European Transactions on Electrical Power*, vol. 4, no. 6, pp. 513-524, 1994.
- [15] J. D. Aspnes and S. -I. Akasofu, "Effect of Solar Induced Current on Autotransformer Tertiary Windings," *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, vol. PAS-101, no. 3, pp. 635-638, March 1982.
- [16] P. A. Oakes, "Special Circuits Ror Ground Relay Current Polarization from Autotransformers Having Delta Tertiary," in *Transactions of the American Institute of Electrical Engineers. Part III: Power Apparatus and Systems* vol. 78, no. 4, pp. 1191-1194, 1959.
- [17] O. T. Farry, "Tertiary Windings in Autotransformers," *Transactions of the American Institute of Electrical Engineers. Part III: Power Apparatus and Systems*, vol. 80, pp. 78-82, 1961.
- [18] X. Yu, Y. Yu, J. Xu, Y. Liu, R. Liu and X. Zhang, "Research on Leakage Flux Control and Stray Loss Calculation on Metal Structure of Ultra High Voltage Autotransformer with Large Capacity," *2021 International Conference on Advanced Electrical Equipment and Reliable Operation (AEERO)*, Beijing, China, pp. 1-6, October 2021.
- [19] A. M. Sobrinho, J. R. Camacho, J. A. Malagoli and A. C. F. Mamede, "Analysis of the Maximum Inrush Current in the Optimal Design of a Single Phase Transformer," *IEEE Latin America Transactions*, vol. 14, no. 12, pp. 4706-4713, 2016.
- [20] J. A. Stratton, "Electromagnetic Theory," Swedenborg Press, 2010.
- [21] Flux 11: User Guide. CAD Package for Electromagnetic and Thermal Analysis using Finite Elements. CEDRAT Design Solutions for Electrical Engineering, 2013.
- [22] D. A. Aragon-Verduzco, J. C. Olivares-Galvan, E. Campero-Littlewood, R. Ocon-Valdez, L. Teuffer-Zuñiga and S. Magdaleno-Adame, "Behavior of magnetic properties of power transformers structural steel A36 at different temperatures," *IEEE International Autumn Meeting on Power, Electronics and Computing (ROPEC)*, Ixtapa, Mexico, pp. 1-5, 2019.
- [23] S. V. Yuferev and N. Ida, "Surface Impedance Boundary Conditions: A Comprehensive Approach," CRC Press, 2010.
- [24] L. J. Segerling, "Applied finite analysis," Wiley, New York, vol. 316, 1976.
- [25] J. C. Sabonnadiere and J. L. Coulomb, "Finite element methods in CAD: electrical and magnetic fields," Springer Science Business Media, 2012.
- [26] S. A. Holland, G. P. O'Connell and L. Haydock, "Calculating stray losses in power transformers using surface impedance with finite elements," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 28, no. 2, pp. 1355-1358, 1992.
- [27] Standard Test Code for Liquid-Immersed Distribution, Power and Regulating Transformers, C57.12.90-2021, IEEE Power and Energy Society, 2021.



V M Jiménez-Mondragón (M'14). He received the B.Sc. degree in electrical engineering from Universidad Autonoma Metropolitana (UAM), Mexico City, in 2009 and the M. Sc. and Ph. D. degrees from Universidad Nacional Autonoma de Mexico, Mexico City in 2013 and 2017, respectively. He is a full-time professor in the Departamento de Energia, UAM-Azcapotzalco.



V J Fernández-Carrazana. He received the B.Sc. degree in electrical engineering from Central University "Marta Abreu" de las Villas, Cuba, in 2014. He worked at the industry for 6 years in the design and start-up of electric motors and control centers. He is currently studying a Master of Science in Electromagnetic Engineering at the Universidad Autonoma Metropolitana-Azcapotzalco, Mexico city.



J C Olivares-Galvan (M'04-SM'10). He received a Ph.D. in electrical engineering at CINVESTAV, Guadalajara, Mexico in 2003. He was a Visiting Scholar at Virginia Tech, Blacksburg, U.S., in 2001. He was a Visiting Professor at the University of Alberta, Edmonton, Alberta, Canada during 2014. He was a transformer design engineer for eight years. He is currently a professor at the Universidad Autonoma Metropolitana.



R Ocón-Valdez (M'02-SM'18). He was received a M.Sc. degree on electrical power systems (2006). From 1995 to 2021, he worked at IEM Condux as design engineering and development manager in the area of transformer design. He is Professor at FES Aragón UNAM, since 1996 on electrical engineering. He also works as a Technical Consultant in areas of design, analysis, diagnosis and manufacturing of transformers.