



Ingeniería Energética

ISSN: 1815-5901

Instituto Superior Politécnico José A. Echeverría.Cujae

Torres Suquilanda, Cristian Ivan; Hernández Areu, Orestes
Comparación de métodos de cálculo de la reactancia de dispersión
en transformadores de devanados helicoidales concéntricos
Ingeniería Energética, vol. XL, núm. 1, 2019, Enero-Abril, pp. 42-52
Instituto Superior Politécnico José A. Echeverría.Cujae

Disponible en: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=329164315006>

- Cómo citar el artículo
- Número completo
- Más información del artículo
- Página de la revista en redalyc.org

UAEH redalyc.org

Sistema de Información Científica Redalyc
Red de Revistas Científicas de América Latina y el Caribe, España y Portugal
Proyecto académico sin fines de lucro, desarrollado bajo la iniciativa de acceso
abierto



TRABAJO TEORICO EXPERIMENTAL

Comparación de métodos de cálculo de la reactancia de dispersión en transformadores de devanados helicoidales concéntricos

Comparison of methods of calculation of leakage reactance in transformers of helicoid concentric windings

Cristian Ivan Torres Suquilanda¹
Orestes Hernández Areu²

¹Universidad Nacional de Loja (UNL), Loja, Ecuador

²Universidad Tecnológica de La Habana, Cujae. Cuba.

E-mail: cristivantorres@gmail.com

Recibido: abril de 2018

Aprobado: septiembre de 2018

Licencia de uso y distribución Creative Commons Reconocimiento-No Comercial 4.0 Internacional.



ABSTRACT/RESUMEN

Para estudiar los fenómenos que se originan durante la operación de los transformadores, empleando las herramientas de simulación existentes con resultados de una exactitud aceptable, es necesaria la obtención de datos reales del transformador y su aplicación en un modelo adecuado para cada fenómeno. Entre estos datos, tienen gran relevancia las reactancias del transformador. En este artículo se presenta y evalúan los métodos de cálculo de la reactancia de dispersión en transformadores de devanados helicoidales concéntricos más generalizados en la literatura especializada y se propone la adecuación del método descrito por Kulkarni-Khaparde para su aplicación a devanados rectangulares. Se realiza el cálculo de la reactancia por los métodos descritos y por la variante propuesta, a un transformador de distribución, comparando los resultados teóricos con los valores obtenidos experimentalmente sobre el mismo transformador, y determinándose el error relativo que arroja cada procedimiento con relación al valor numérico de la medición realizada.

Palabras clave: inductancia; reactancia de dispersión; transformadores.

In order to study the phenomena that originate during the operation of the transformers, using the existing tools of simulation with results of an acceptable accuracy, is necessary to obtain real data of the transformers and apply these in a suitable model for each phenomenon. Between these data, the reactances of transformers have great relevance. This paper presents and evaluates the two methods more generalized in the specialized literature of calculation of leakage reactance in transformers of helicoidal concentric windings and is proposed the adjusting of a method described by Kulkarni-Khaparde for its application in rectangular windings. It begins with a brief description of these methods and a discussion of them. The calculation of reactance by the described methods and the proposed variant is developed to a distribution transformer, comparing the theoretical results with the values obtained experimentally on the same transformer, and determining the relative error that yields each procedure with respect to the numerical value of the realized measurements.

Key words: inductance; leakage reactance; transformers.

INTRODUCCIÓN

Desde hace algunos años, la modelación y simulación de fenómenos transitorios en los transformadores han ganado espacio en el campo de la ingeniería. La exactitud de los resultados obtenidos mediante un proceso de simulación depende del grado de detalle que se tenga en el modelo empleado y de la exactitud de los datos aportados, donde el valor de la reactancia de dispersión de los transformadores, tiene gran relevancia.

La reactancia de dispersión del transformador puede determinarse experimentalmente, mediante mediciones cuando existen las condiciones y es posible realizar el ensayo. También puede obtenerse de forma analítica con resultados razonablemente buenos. Algunos autores han documentado métodos teóricos de obtención de las reactancias de dispersión estableciendo una altura equivalente para cada bobina del transformador, como el resultado de la suma de la longitud axial de cada bobina más dos veces su espesor [1- 3]

Las expresiones de reactancias de dispersión que aportan estas publicaciones no pueden ser aplicadas directamente a transformadores con devanados de sección rectangular, dado que los autores realizan sus desarrollos sobre transformadores de devanados de secciones circulares.

El método descrito por Kulkarni-Kharpade realiza su desarrollo también sobre transformadores de devanados de secciones circulares, pero establece una altura equivalente común para todas las bobinas del devanado como el cociente de la altura real del devanado entre un factor menor que la unidad llamado Factor de Rogowski (K_R) [4; 5].

Las expresiones de reactancias de dispersión que aporta tampoco pueden ser aplicadas directamente a transformadores con devanados de sección rectangular.

Ambos autores plantean expresiones de aplicación en transformador de devanados helicoidales cuyos perímetros estén inscritos en un círculo, sin embargo, la gran mayoría de los transformadores de mediana potencia y de distribución tienen devanados cuyos perímetros están inscritos en un rectángulo, por lo que es necesario realizar modificaciones a estos métodos para poder aplicarlos a estos últimos.

MATERIALES Y MÉTODOS

En el campo magnético de dispersión de un transformador tiene notables diferencias entre la distribución del flujo de dispersión que existe en la dirección axial de la ventana del núcleo y la que existe en la dirección perpendicular a esta. Cuando las bobinas de alta tensión (AT) y baja tensión (BT) tienen la misma altura, los amper-vueltas, se encuentran distribuidos uniformemente en la altura de los devanados, entonces el flujo de dispersión es predominantemente axial, excepto en los extremos, donde se deforma buscando el camino más corto para cerrar a través del yugo o la columna del núcleo [1 - 5]. Ver figuras 1a y 1b.

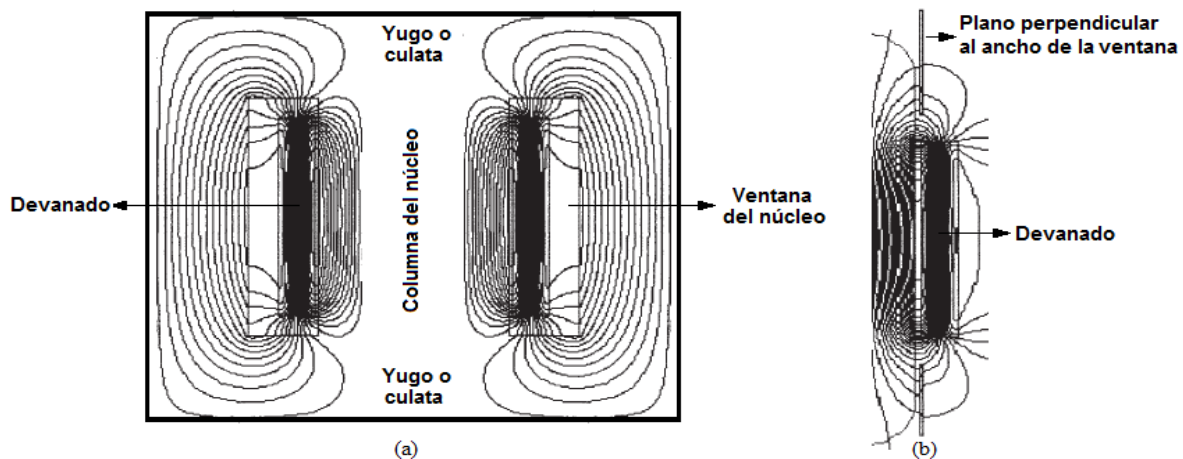


Fig. 1. (a) Líneas de flujo en la dirección axial de la ventana.
(b) Líneas de flujo en la dirección radial de la ventana.

El modelo del flujo de dispersión típico que se muestra en la figura 1a, puede ser reemplazado por líneas de flujo paralelas, todas de una longitud igual a una altura equivalente como se muestra en la figura 2a.

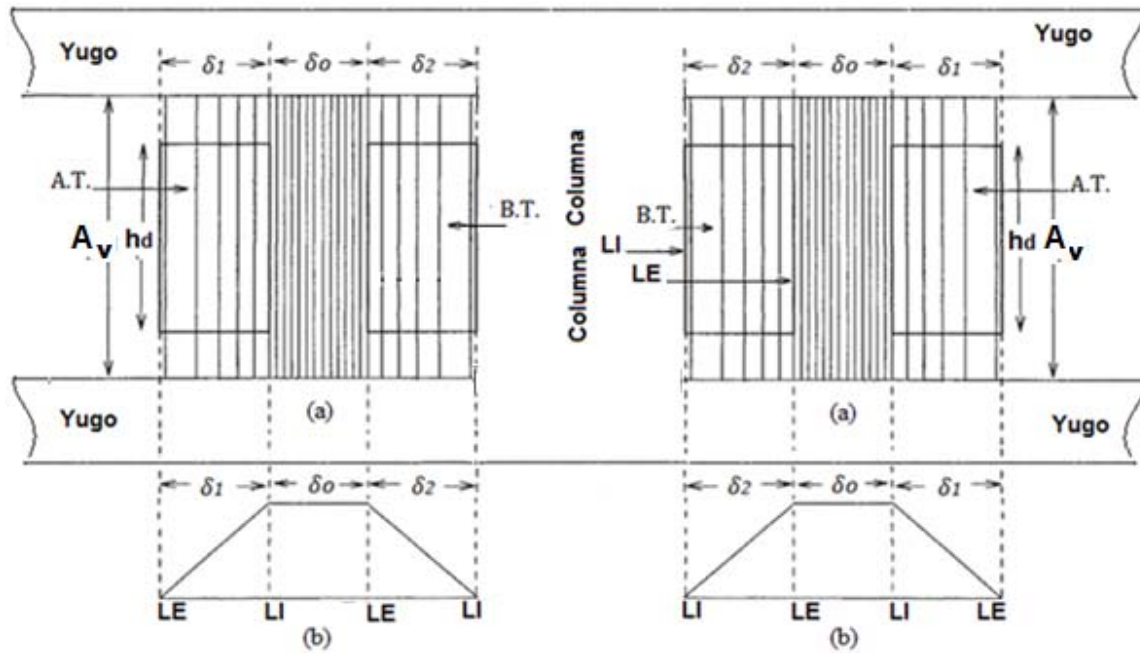


Fig. 2. (a) Líneas del campo de dispersión con altura equivalente.
(b) Diagrama de fuerza magnetomotriz.

En la figura:

A.T.: Devanado de alta tensión.

B.T.: Devanado de baja tensión.

δ₁: Espacio que ocupa radialmente el conductor en A.T.

δ₂: Espacio que ocupa radialmente el conductor en B.T.

δ₀: Espacio entre el conductor de A.T. y B.T. También llamado entre cara activa.

LI: Lado más interno del devanado.

LE: Lado más externo del devanado.

h_d: Altura real del devanado.

A_v: Altura de la ventana del núcleo.

Método de Juan Corrales Martín [1].

Plantea que las alturas equivalentes primaria y secundaria para las trayectorias del flujo de dispersión son las siguientes. Vea ecuación (1-6).

$$heq_1 = h_{d1} + 2 \delta_1 \quad (1)$$

$$\text{Si } heq_1 > A_v, \quad Leq_1 = A_v \quad (2)$$

$$heq_2 = h_{d2} + 2 \delta_2 \quad (3)$$

$$\text{Si } heq_2 > A_v, \quad Leq_2 = A_v \quad (4)$$

$$X_1 = 2\pi F N_1^2 \mu_0 \left(\frac{\delta_0 \cdot Lm_0}{2 \cdot heq_1} + \frac{\delta_1 \cdot Lm_1}{3 \cdot heq_1} \right) [H] \quad (5)$$

$$X_2 = 2\pi F N_2^2 \mu_0 \left(\frac{\delta_0 \cdot Lm_0}{2 \cdot heq_2} + \frac{\delta_2 \cdot Lm_2}{3 \cdot heq_2} \right) [H] \quad (6)$$

Donde:

heq1: Altura equivalente del devanado primario.

h_{eq2} : Altura equivalente del devanado secundario.
 h_{d1} : Altura real del devanado primario.
 h_{d2} : Altura real del devanado secundario.
 X_1 : Reactancia de dispersión del devanado primario.
 X_2 : Reactancia de dispersión del devanado secundario.
 F : Frecuencia del sistema eléctrico.
 μ_0 : Permeabilidad del vacío; $4\pi \cdot 10^{-9}$ H/cm
 N_1 : Número de vueltas del devanado primario.
 N_2 : Número de vueltas del devanado secundario.
 L_{m1} : Perímetro medio del devanado primario.
 L_{m2} : Perímetro medio del devanado secundario.
 L_{m0} : Perímetro medio de la entre cara activa.

Método de Kulkarni-Khaparde [4, 5].

Plantea que una altura equivalente para todos los devanados como se muestra en las ecuaciones (7) y (8).

$$h_{eq} = \frac{h_d}{K_R} \quad (7)$$

Donde:

K_R : Factor de Rogowski.

$$K_R = 1 - \frac{1 - e^{-\pi \cdot h_d / (\delta_1 + \delta_0 + \delta_2)}}{\pi \cdot h_d / (\delta_1 + \delta_0 + \delta_2)} \quad (8)$$

El factor de corrección de Rogowski es utilizado para tener en cuenta el flujo de dispersión en la parte superior e inferior de los devanados y el efecto del núcleo magnético [6;7].

Los autores consideran un trayecto cerrado de flujo a una distancia x desde el lado interior (LI) del devanado, estableciendo la densidad de flujo como se muestra en la ecuación (9).

$$B_x = \frac{\mu_0 \cdot (N \cdot I)_x}{h_{eq}} [T] \quad (9)$$

Para llegar a la ecuación de la reactancia, se obtiene una expresión general de las concatenaciones de flujo de un tubo de flujo con una altura equivalente h_{eq} y una pared de grosor δ , como se aprecia en la figura 1.4.

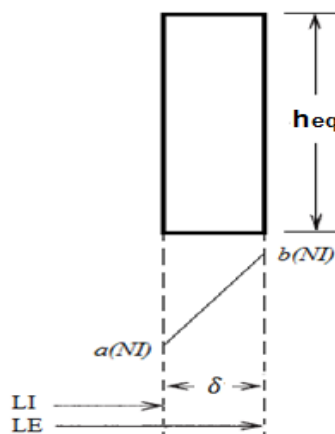


Fig. 3. Tubo de flujo con una altura equivalente h_{eq} y una pared de grosor δ .

En la figura; NI es el valor de los amper-vueltas nominales del devanado, a(NI) y b(NI) son las fracciones de amper-vueltas correspondientes a LI y LE respectivamente.
Para un punto a una distancia x desde LI la f.m.m. se puede plantear según la ecuación (10).

$$f.m.m._x = a(NI) + \left[b(NI) - a(NI) \right] \frac{x}{\delta} \quad [A - v] \quad (10)$$

Sustituyendo 9 en 8 y sacando factor común NI; el valor eficaz de la densidad de flujo a una distancia x de LI queda según la ecuación (11).

$$B_x = \frac{\mu_0}{h_{eq}} \left[a + \frac{b-a}{\delta} x \right] NI \quad [T] \quad (11)$$

Las concatenaciones de flujo de un tubo de flujo incremental de ancho dx emplazado en x, son las expresadas en la ecuación (12).

$$d\psi = N_x \cdot \phi_x \quad (12)$$

Donde:

ϕ_x : Flujo que concatena con las vueltas N_x

N_x : Cantidad de vueltas en el punto x. Se puede obtener de acuerdo con la ecuación (13).

$$N_x = aN + (bN - aN) \frac{x}{\delta} \quad [\text{vueltas}] \quad (13)$$

Si se tiene en cuenta lo que se expresa en la ecuación (14):

$$\Phi = B \cdot A \quad [Wb] \quad (14)$$

Donde:

A: Área de la pared del tubo de flujo, m².

Entonces la ecuación (11), se puede transformar en ecuación (15).

$$d\psi = N_x \cdot B_x \cdot dA \quad (15)$$

Donde dA es el área incremental del tubo de flujo.

Sustituyendo las ecuaciones (11) y (13) en (15), quedan las ecuaciones (16) y (17).

$$d\psi = \left\{ \left(a + \frac{b-a}{\delta} x \right) N \right\} \left\{ \frac{\mu_0}{h_{eq}} \left(a + \frac{b-a}{\delta} x \right) NI \right\} dA \quad (16)$$

$$d\psi = \left\{ \frac{\mu_0}{h_{eq}} \left(a + \frac{b-a}{\delta} x \right)^2 N^2 I \right\} dA \quad (17)$$

En devanados circulares concéntricos, como se muestra en la figura 4, el área incremental del tubo de flujo se obtiene según la ecuación (18).

$$dA = \pi(LI + 2x) dx \quad (18)$$

Sustituyendo la ecuación (18) en (17) queda la ecuación (19).

$$d\psi = \left\{ \frac{\mu_0}{h_{eq}} \left(a + \frac{b-a}{\delta} x \right)^2 N^2 I \right\} [\pi (LI + 2x) dx] \quad (19)$$

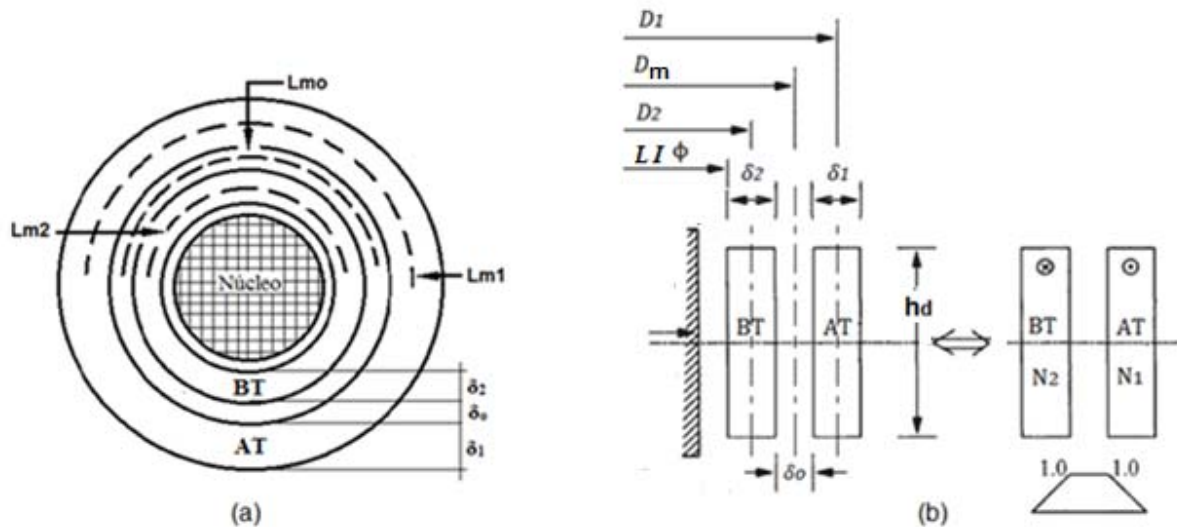


Fig. 4. Devanados helicoidales circulares concéntricos.

En la figura:

D_1 : Diámetro medio del devanado primario.

D_2 : Diámetro medio del devanado secundario.

D_m : Diámetro medio de todo el devanado o la entre cara activa.

Por lo tanto, el flujo total del tubo se obtiene de la siguiente integral. Vea ecuación (20).

$$\psi = \int_0^{\delta} d\psi = \frac{\mu_0 \pi N^2 I}{h_{eq}} \int_0^{\delta} \left\{ \left(a + \frac{b-a}{\delta} x \right)^2 \right\} (LI + 2x) dx \quad (20)$$

Integrando y resolviendo, la ecuación (20) queda de la siguiente manera. Vea ecuación (21)

$$\psi = \frac{\mu_0 \pi N^2 I}{h_{eq}} \cdot \frac{\delta}{3} \cdot \left[(a^2 + ab + b^2) LI + \frac{(a^2 + ab + b^2) 3\delta}{2} - \frac{(2a^2 + ab) \delta}{2} \right] \quad (21)$$

El último término dentro de los corchetes puede ser despreciado sin que esto arroje un error apreciable [4, 5]. Vea ecuación (22).

$$\psi = \frac{\mu_0 \pi N^2 I}{h_{eq}} \cdot \frac{\delta}{3} \cdot (a^2 + ab + b^2) \left[LI + \frac{3\delta}{2} \right] \quad (22)$$

El término $[LI + 3\delta/2]$ puede ser considerado igual al diámetro medio (D_m) del tubo de flujo (esto es admisible, principalmente, para arrollamientos que tienen valores de diámetro comparativamente más grande que los valores de sus espesores radiales) [4; 5]. Vea ecuación (23).

$$\psi = \frac{\mu_0 \pi N^2 I}{h_{eq}} \cdot \frac{\delta}{3} \cdot (a^2 + ab + b^2) D_m \quad (23)$$

Se considera. Vea ecuación (24).

$$ATD_C = \frac{\delta}{3} \cdot (a^2 + ab + b^2) D_m \quad (24)$$

Que corresponde al área del Diagrama de Amper – Vueltas para el caso del devanado de forma circular. La inductancia de dispersión de un transformador con n tubos circulares de flujo se puede obtener como se muestra en la ecuación (25). [4; 5]:

$$L = \frac{\sum_{k=1}^n \Psi}{I} = \frac{\mu_0 \pi N_1^2}{h_{eq}} \cdot \sum_{k=1}^n ATD_C \quad (25)$$

Y la correspondiente expresión para la reactancia de cortocircuito X_{cc} es como se muestra en la ecuación (26). [8-10]:

$$X_{cc} = 2\pi f \cdot \frac{\mu_0 \pi N_1^2}{h_{eq}} \cdot \sum_{k=1}^n ATD_C \quad (26)$$

Las constantes a y b de la ecuación (24) tienen los valores de 0 y 1 para BT, 1 y 1 para la entre cara activa y 1 y 0 para AT. Entonces, utilizando la ecuación (26) se obtiene el área del Diagrama de Amper – Vueltas para devanados cilíndricos como se muestra en la ecuación (27).

$$\sum ATD_C = \frac{1}{3} (\delta_1 D_1) + (\delta_0 D_m) + \frac{1}{3} (\delta_2 D_2) \quad (27)$$

Modificación del método de Kulkarni-Khaparde para devanados helicoidales con forma rectangular.

Cuando el núcleo y el devanado tienen sección rectangular el Diagrama de Amper – Vueltas no es el mismo dado que el área incremental del tubo de flujo y los perímetros de los devanados tienen otra forma de obtención.

Haciendo el análisis para un trayecto cerrado de flujo a una distancia x desde el lado interior de un devanado de forma rectangular como se muestra en la figura 5, se tiene:

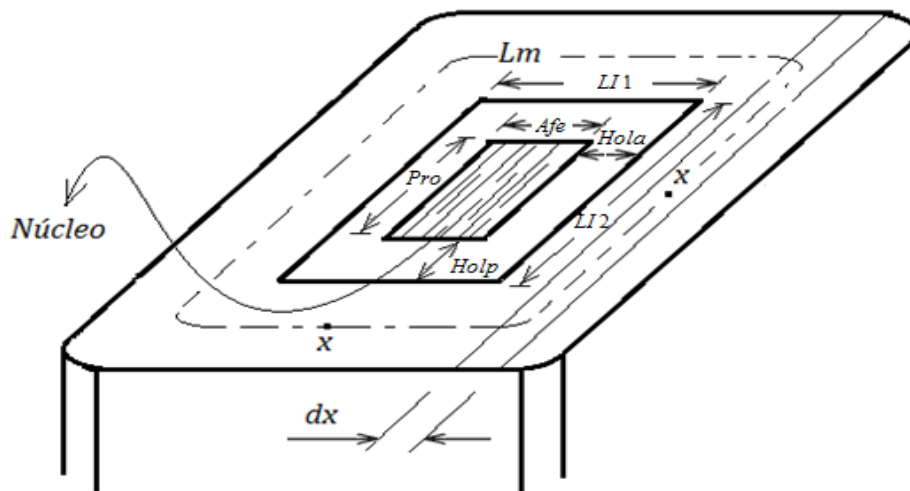


Fig. 5. Vista superior de la sección del tubo de flujo de forma rectangular.

En la figura:

Afe: Longitud del lado menor de la columna del núcleo magnético rectangular.

Pro: Longitud del lado mayor de la columna del núcleo magnético rectangular.

LI1: Longitud del lado interior menor del devanado.

LI2: Longitud del lado interior mayor del devanado.

Lm: Longitud media de la espira del devanado a una distancia x.

Hola: Holgura entre el núcleo y el devanado por su lado de mayor longitud.

Holp: Holgura entre el núcleo y el devanado por su lado de menor longitud.

En este caso, el área incremental del tubo rectangular de flujo se obtiene según la ecuación (28).

$$dA = (2LI_1 + 2LI_2 + 2\pi x) dx \quad (28)$$

Donde:

Dado que $(2LI_1 + 2LI_2)$ es el perímetro interno del tubo rectangular, la ecuación (28) se escribe como se muestra en la ecuación (29)

$$dA = (P_{int} + 2\pi x) dx \quad (29)$$

Donde:

P_{int} : perímetro interno del tubo rectangular.

Sustituyendo la ecuación (29) en (17) queda la ecuación (30).

$$d\psi = \left\{ \frac{\mu_0}{h_{eq}} \left(a + \frac{b-a}{\delta} x \right)^2 N^2 I \right\} [(P_{int} + 2\pi x) dx] \quad (30)$$

Por lo tanto, el total de las concatenaciones de flujo de un tubo de forma rectangular está dado por la ecuación (31).

$$\psi = \int_0^\delta d\psi = \frac{\mu_0 N^2 I}{h_{eq}} \int_0^\delta \left(a + \frac{b-a}{\delta} x \right)^2 (P_{int} + 2\pi x) dx \quad (31)$$

Resolviendo la integral, aplicando la regla de integración por partes, queda de la siguiente manera. Vea ecuación (32).

$$\begin{aligned} \int_0^\delta \left(a + \frac{b-a}{\delta} x \right)^2 (P_{int} + 2\pi x) dx &= \\ &= \frac{\delta}{3} \left[(a^2 + ab + b^2) \left(P_{int} + \frac{1}{2} \pi \delta \right) + \frac{1}{2} \pi \delta (ab + 2b^2) \right] \end{aligned} \quad (32)$$

Sumando y restando a^2 en el último término dentro del paréntesis de la ecuación (32), y sacando factor común, queda de la siguiente manera. Vea ecuación (33).

$$\begin{aligned} \int_0^\delta \left(a + \frac{b-a}{\delta} x \right)^2 (P_{int} + 2\pi x) dx &= \\ &= \frac{\delta}{3} \left[(a^2 + ab + b^2) \left(P_{int} + \frac{1}{2} \pi \delta \right) + \frac{1}{2} \pi \delta (a^2 + ab + b^2) - \frac{1}{2} \pi \delta (a^2 - b^2) \right] \\ \int_0^\delta \left(a + \frac{b-a}{\delta} x \right)^2 (P_{int} + 2\pi x) dx &= \\ &= \frac{\delta}{3} \left[(a^2 + ab + b^2) (P_{int} + \pi \delta) - (a^2 - b^2) \frac{\pi \delta}{2} \right] \end{aligned} \quad (33)$$

Sustituyendo la ecuación (33), en la ecuación (31), queda la ecuación (34):

$$\psi = \frac{\mu_0 N^2 I \delta}{h_{eq}} \left[(a^2 + ab + b^2)(P_{int} + \pi\delta) - (a^2 - b^2) \frac{\pi\delta}{2} \right] \quad (34)$$

El Diagrama de Amper – Vueltas para el caso de devanado de forma rectangular, sería como se muestra en la ecuación (35).

$$ATD_R = \frac{\delta}{3} \left[(a^2 + ab + b^2)(P_{int} + \pi\delta) - (a^2 - b^2) \frac{\pi\delta}{2} \right] \quad (35)$$

El ATD_R para el devanado primario, se tiene la ecuación (36).

$$ATD_{R1} = \frac{\delta_1}{3} \left(P_{int1} + \frac{1}{2} \pi\delta_1 \right) \quad (36)$$

El ATD_R para la entre cara activa del devanado, es la ecuación (37).

$$ATD_{R0} = \delta_0 (P_{int0} + \pi\delta_0) \quad (37)$$

Y el ATD_R para el devanado secundario, se tiene la ecuación (38).

$$ATD_{R2} = \frac{\delta_2}{3} \left(P_{int2} + \frac{3}{2} \pi\delta_2 \right) \quad (38)$$

El ATD_R para el cálculo de la inductancia tanto del primario como secundario, es la suma del área del devanado primario ecuación (36), y/o devanado secundario ecuación (38), más la mitad del área de la entre cara activa ecuación (37), por lo tanto las reactancias de dispersión primaria y secundaria tendrán la siguiente forma. Vea las ecuaciones (39) y (40).

$$X_1 = 2 \pi F \frac{N_1^2 \mu_0}{h_{eq}} \cdot \left[\frac{\delta_0}{2} (P_{int0} + \pi\delta_0) + \frac{\delta_1}{3} \left(P_{int1} + \frac{1}{2} \pi\delta_1 \right) \right] [\Omega] \quad (39)$$

$$X_2 = 2 \pi F \frac{N_2^2 \mu_0}{h_{eq}} \cdot \left[\frac{\delta_0}{2} (P_{int0} + \pi\delta_0) + \frac{\delta_2}{3} \left(P_{int2} + \frac{3}{2} \pi\delta_2 \right) \right] [\Omega] \quad (40)$$

De la reactancia de dispersión del devanado primario y secundario, se puede calcular la reactancia de cortocircuito, por la ecuación (41).

$$X_{cc} = X_1 + \left[X_2 \cdot \left(\frac{N_1}{N_2} \right)^2 \right] \quad (41)$$

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Cálculo de la reactancia por los métodos descritos.

Se muestran los resultados del cálculo de la reactancia de dispersión de un transformador de distribución de dos devanados cuya reactancia de cortocircuito medida según [11] es 39,618 Ω . Los parámetros físicos del transformador, se muestra en la tabla 1.

Tabla 1. Parámetros físicos del transformador de 50 kVA, 7620/240 – 480 V.

Descripción	Símbolo	Magnitud	Unidad
Ancho de la columna del núcleo del transformador	Afe	11,60	[cm]
Profundidad de la columna del núcleo del transformador	Pro	20,00	[cm]
Holgura por el ancho de la columna del núcleo	Hola	0,30	[cm]
Holgura por la profundidad de la columna del núcleo	Holp	0,40	[cm]
Altura de la bobina del devanado primario	h _{d1}	15,80	[cm]
Altura de la bobina del devanado secundario	h _{d2}	15,80	[cm]
Espesor de la bobina primaria	δ ₁	2,32	[cm]
Espesor de la entre cara activa	δ _o	0,52	[cm]
Espesor de la bobina secundaria	δ ₂	3,01	[cm]
Perímetro medio del devanado de AT	L _{m1}	101,30	[cm]
Perímetro medio de la entre cara activa	L _{m0}	89,63	[cm]
Perímetro medio del devanado de BT	L _{m2}	76,16	[cm]
Perímetro interno del devanado primario	P _{int1}	89,62	[cm]
Perímetro interno de la entre cara activa del devanado	P _{into}	86,32	[cm]
Perímetro interno del devanado secundario	P _{int2}	66,00	[cm]
Frecuencia	F	60,00	[Hz]
Número de vueltas del devanado primario	N ₁	890,00	[vueltas]
Número de vueltas del devanado secundario	N ₂	52,00	[vueltas]

El valor de h_{eq} se calcula por medio de la ecuación (6), en la cual el factor de Rogowski está dado por la ecuación (7).

$$K_R = 0,8819$$

$$h_{eq} = 17,9059 \text{ [cm]}$$

Cálculo de las reactancias por el método de Kulkarni-Khaparde

Para la aplicación del método, dado que la sección de la columna del núcleo del transformador en cuestión es rectangular, el diámetro interior (LI) del devanado de BT, se tiene que obtener como el valor promedio entre los valores LI₁ y LI₂ del tubo rectangular de flujo. Estos son la suma de los lados de la columna del núcleo más las holguras, ver figura 5 y ecuación (42):

$$LI = \frac{LI_1 + LI_2}{2} = \frac{(Afe + 2HOLA) + (Pro + 2Holp)}{2} = 16,5 \text{ [cm]} \quad (42)$$

Los diámetros medios de los devanados de BT y AT, y del espacio entre BT y AT se calcula a partir de las ecuaciones (43), (44) y (45).

$$D_2 = LI + \delta_2 = 19,51 \text{ [cm]} \quad (43)$$

$$D_0 = LI + 2\delta_2 + \delta_0 = 23,045 \text{ [cm]} \quad (44)$$

$$D_1 = LI + 2\delta_2 + 2\delta_0 + \delta_1 = 25,89 \text{ [cm]} \quad (45)$$

El valor de $\sum ATD_C$ se calcula a partir de la ecuación (26):

$$\sum ATD_C = 51,7357 \text{ [cm}^2\text{]}$$

Aplicando la ecuación (25), para calcular la reactancia de cortocircuito para devanados de forma circular, se tiene:
 $X_{cc} = 34,055 \text{ } [\Omega]$

El error relativo que se obtiene con la aplicación de este método se obtiene por la ecuación (46):

$$\text{Error relativo} = \frac{X_{\text{medida}} - X_{\text{calculada}}}{X_{\text{medida}}} \cdot 100 = \frac{39,618 - 34,055}{39,618} \cdot 100 = 14,04 \% \quad (46)$$

Cálculo de las reactancias con la modificación del método de Kulkarni-Khaparde

Para la aplicación del método de Kulkarni-Khaparde modificado para devanados rectangulares, las reactancias de dispersión y de cortocircuito se calculan mediante las ecuaciones (39), (40) y (41):

$$X_1 = 19,956 \quad [\Omega]$$

$$X_2 = 0,0740765 \quad [\Omega]$$

$$X_{cc} = 41,656 \quad [\Omega]$$

El error relativo que se obtiene con la aplicación de este método se obtiene por la ecuación (46):

$$\text{Error relativo} = 5,14 \%$$

CONCLUSIONES

1. Mediante la modificación del método de Kulkarni-Khaparde, se llega a un área del Diagrama de Amper – Vueltas para devanados rectangulares más exacta que la obtenida por los métodos clásicos Kulkarni-Khaparde y de Juan Corrales Martín.
2. El cálculo de la reactancia de dispersión para devanados de forma rectangular mediante la modificación del método de Kulkarni-Khaparde, es más exacto que por los métodos de Kulkarni-Khaparde y de Juan Corrales Martín.

REFERENCIAS

1. CORRALES MARTÍN, Juan. Cálculo industrial de máquinas eléctricas. ISBN: 8426704387. Idioma: SPA. P. imprenta: Barcelona, Marcombo, 1982. 2 v. : 23 cm. Edición ; 1. ed.
2. DEL VECCHIO, Robert M., et al. Transformer Design Principles With Applications 3e: With Applications to Core-Form Power Transformers. CRC press, 2017. ISBN 9781498787536 - CAT# K30258. Edición; 3. ed
3. MCLYMAN, Colonel Wm T. Transformer and inductor design handbook. CRC press, 2011. ISBN 9781439836873 - CAT# K11667. Edición; 4. ed
4. KULKARNI, Shrikrishna V.; KHAPARDE, S. A. Transformer engineering design and practice. Editorial Marcel Dekkerinc. .New York. EE.UU, 2004. ISBN 0824756533, 9780824756536.
5. KULKARNI, Satish V.; KHAPARDE, S. A. Transformer engineering: design, technology, and diagnostics. CRC Press, 2012. ISBN 9781439853771 - CAT# K12483. Edición; 2. ed
6. ARIVANMUDHAN, M.; SANTHI, S. et al. FEM based reactance computation for transformers winding deformation detection. International Journal of Computer Applications (0975-8887). National Conference Potential Research Avenues and future Opportunities in Electrical and Instrumentation Engineering. 2014.[Consultado octubre 2017]. Disponible en: <https://www.ijcaonline.org/proceedings/eteiac/number1/17326-1401>
7. MEMIJE, D. Diseño del núcleo y bobinas para un transformador por medio de un simulador. Tesis de grado de ingeniería eléctrica. Instituto Politécnico Nacional. México. 2014.[Consultado junio 2017]. Disponible en: <https://es.scribd.com/document/342677611/DISENO-DEL-NUCLEO-Y-BOBINAS-PARA-UN-TRANSFORMADOR-POR-MEDIO-DE-UN-SIMULADOR-pdf>
8. OLIVEIRA, Luís MR; CARDOSO, AJ Marques. Modeling and characterization of leakage inductances for transformer winding fault studies. 2016. p.423-430. Disponible en: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-642-37291-9_45
9. AVEDAÑO, A.; MORK,, V.A.; HOIDALEN, H.K.. Transformer internal fault modeling in ATP. Paper submitted to the International Conference on Power Systems Transient (IPST2011) in Delph. Netherlands. 2011.[Consultado octubre 2017]. Disponible en: www.ipstconf.org/papers/Proc_IPST2011/11IPST017.pdf
10. CHACMANA, S. Diseño de un transformador multitap para pozos petroleros. Tesis de grado de ingeniería eléctrica. Universidad Nacional de Ingeniería. Lima. Perú. 2013.[Consultado septiembre 2017]. Disponible en: <http://cybertesis.uni.edu.pe/handle/uni/8435>
11. RAMOS GUARDARRAMA, et al. Ensayos de pérdidas en vacío y con carga en transformadores mediante la adquisición de datos. Ingeniería Energética, 2016, vol. 37, n 1, p. 73-80. ISSN 1815-5901.[Consultado octubre 2017]. Disponible en: http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1815-59012016000100009