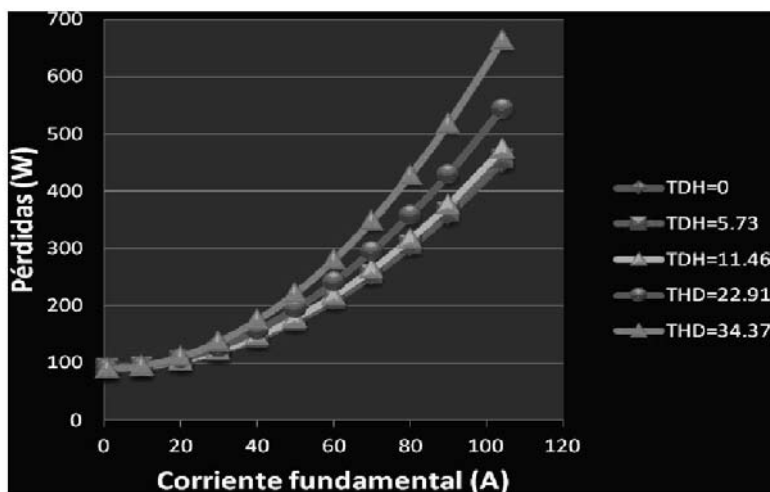


Influencia de los armónicos de corriente sobre las pérdidas en los transformadores de distribución monofásicos con derivación central

JULIO GÓMEZ-SARDUY*
ENRIQUE QUISPE**
ROYD REYES-CALVO***
VLADIMIR SOUSA-SANTOS****
PERCY VIEGO-FELIPE*



Resumen

Dentro de los componentes más importantes de los sistemas eléctricos se encuentran los transformadores de potencia, cuya eficiencia se ve afectada por problemas de calidad de energía eléctrica presentes en las redes. Uno de los problemas al que son sensibles los transformadores es a la circulación de corrientes no sinusoidales por sus devanados, cuando alimentan cargas no lineales. Esto produce un incremento en las pérdidas y, por tanto, en la temperatura de trabajo que tienen los esfuerzos del aislamiento, y una reducción de la vida útil y de la capacidad del transformador que debe ser considerada. Para estos casos, la norma ANSI/IEEE C57.110 permite determinar la reducción de la capacidad y la corriente permisible del transformador ante cargas no lineales. En este artículo se presenta un

(*) Centro de Estudios de Energía y Medio Ambiente, Universidad de Cienfuegos, Cuba.

(**) Grupo de Investigación en Energías, GIEN, Universidad Autónoma de Occidente, Colombia. Autor para correspondencia. Tel. +57 2 318 8000 - ext. 11856. Correo electrónico: ecquispe@uao.edu.co.

(***) Departamento de Mecánica, Facultad de Ingeniería, Universidad de Cienfuegos, Cuba.

(****) Grupo de Investigación en Optimización Energética, Giopen, Universidad de la Costa, Colombia.

modelo analítico basado en esta norma, se describe el procedimiento de cálculo para el caso de transformadores monofásicos con derivación central y se evalúa la influencia de los armónicos de corriente en el incremento de las pérdidas, utilizando como caso de estudio un transformador de 25 kVA para diferentes magnitudes de THD de corriente. Se desarrolla, además, un modelo en Simulink de Matlab, el cual es coincidente en sus resultados con el modelo analítico desarrollado.

Palabras clave: transformadores monofásicos, pérdidas en transformadores, armónicos de corriente.

Abstract

Among the most important components of the electrical systems are power transformers, whose efficiency is affected by power quality problems present in electrical power networks. One of the problems affecting the operation of the transformers is the circulation of non-sinusoidal currents in the windings when they are feeding nonlinear loads. This causes an increase in losses, and therefore an increase in temperature, isolation stress and reduced life and capacity of the transformer, all of which should be taken into account. For these cases, the ANSI / IEEE Standard C57.110 allows the determination of the transformer capacity reduction and the allowable current capacity of the transformer. In this paper an analytical model based on this standard is developed, the calculation method for the case of single-phase transformers with center tap is described and the influence of the harmonic content of the load in the losses increase is evaluated through a case study of a transformer of 25 kVA and different magnitudes of THD current. Furthermore, a model in Matlab Simulink which is consistent in its results to the analytical model developed is also established.

Keywords: single-phase transformers, losses in transformers, current harmonics..

1. Introducción

En la actualidad, el uso racional de los recursos energéticos juega un papel primordial en la economía de las naciones y en el cuidado del medio ambiente. La eficiencia energética sigue siendo una de las vías para contribuir a alcanzar un modelo energético sostenible. Por esta razón, es importante prestar mayor atención al conocimiento preciso del desempeño energético de los sistemas que tienen que ver con el uso final de la energía eléctrica. Dentro de los componentes de estos sistemas, uno de los más importantes son los transformadores, ya que constituyen la interfase entre los consumidores y la fuente de suministro. La eficiencia de los transformadores, al igual que otros equipos eléctricos, se ve afectada por problemas de calidad de la potencia eléctrica. Uno de los problemas al que son sensibles los transformadores es a la circulación de corrientes no sinusoidales por sus devanados, lo que se debe a la proliferación de cargas no lineales que generan armónicos de corriente. Esto produce un incremento en las pérdidas y, por tanto, en la temperatura de trabajo que tienen los esfuerzos del aislamiento, y una reducción de la vida útil y de la capacidad del transformador; aspectos que hay que tener en cuenta.

Estos problemas causados por las cargas no lineales y su efecto en el incremento de temperatura del transformador, fueron presentados en el comité de transformadores de la IEEE en 1980, aprobándose la norma ANSI/IEEE C57.110 –“Recomended practice for establishing transformer capability when supplyng non-sinusoidal load currents” (ANSI/IEEE Std, 1998)–, que provee un procedimiento para determinar la reducción de la capacidad y la corriente permisible del transformador cuando trabaja con corrientes no sinusoidales. La importancia de la operación de los transformadores, incentiva el estudio de varios aspectos en relación con su operación: la obtención de parámetros a partir de mediciones en línea (Aponte, Cadavid, Burgos & Gómez-Luna, 2012), la selección de la potencia (Merritt & Chaitkin, 2002; González, Quispe & Rivas, 2003; García-González & De Armas, 2009) y el análisis en condiciones de armónicos de tensión y corriente, donde los conceptos de potencia eléctrica son más generales con respecto a las condiciones sinusoidales (Quispe & Aguado, 2002; Santos, Palacios & Quispe, 2003).

En las redes de distribución abundan transformadores monofásicos con derivación central, los cuales pueden estar alimentando cargas por cada semi-devanado con diferente contenido armónico. Existen abundantes publicaciones sobre el efecto de la distorsión de la forma de onda que tiene la corriente en los transformadores, desde el punto de vista de desclasificación de potencia y de calentamiento, lo cual está directamente asociado al incremento de pérdidas que se produce en los mismos.

En este trabajo se presenta el desarrollo de una metodología generalizada, a partir de las recomendaciones de la norma ANSI/IEEE C57.110, para determinar las pérdidas en transformadores de distribución monofásicos con derivación central, alimentando cargas no lineales de diferentes contenidos armónicos por cada semidevanado. Se demuestra que en estos casos la energía cuantificada como pérdida puede ser considerable solo cuando se parte de valores elevados de THD de corriente, por lo que el efecto de circulación de corrientes armónicas no debe ser sobreestimado, aunque la calidad de la potencia es un aspecto a tener en cuenta al evaluar oportunidades de mejora en el desempeño energético en las redes actuales.

2. Modelo de pérdidas en los transformadores.

Las pérdidas que tienen lugar en los transformadores se dividen en dos grandes grupos (pérdidas en vacío y pérdidas con carga):

$$P_T = P_{NL} + P_L \quad [\text{Watt}] \quad (1)$$

Siendo:

P_{NL} : las pérdidas en vacío (no *load loss*).

P_L : las pérdidas con carga (*load loss*).

P_T : las pérdidas totales.

Las pérdidas en vacío o pérdidas de núcleo aparecen debido a la naturaleza variable en el tiempo del flujo electromagnético que circula en el material ferromagnético. Este tipo de pérdida es provocado por el fenómeno de histéresis y corrientes parásitas en el núcleo. Las pérdidas

específicas se pueden expresar por la fórmula de Steinmetz:

$$P_{NL} = P_H + P_{EC} = k_H \cdot f \cdot B_m^\alpha + k_{EC} \cdot f^2 \cdot B_m^2 \frac{W}{kg} \quad (2)$$

Donde:

P_H : son las pérdidas específicas por histéresis.

P_{EC} : son las pérdidas específicas por corrientes parásitas.

f : es la frecuencia de la tensión,

B_m : es la máxima densidad de flujo.

k_H : es el coeficiente de pérdidas por histéresis que depende del material.

k_{EC} : es el coeficiente de pérdidas por corrientes parásitas que depende del material.

α : coeficiente que varía entre 1.5 y 2, según las características de la chapa.

Como se puede apreciar, estas pérdidas son proporcionales a la frecuencia y a la máxima densidad de flujo, y, además, bajo condiciones operacionales, varían muy poco, por lo que son consideradas aproximadamente constantes.

Por otro lado, como normalmente en un sistema eléctrico los componentes armónicos de la tensión son menores del 5 % (Etezadi-Amoli, Reno, Choma & Louie, 2007), solo se tiene en cuenta la componente fundamental de la tensión en el cálculo de las pérdidas sin carga. El error de despreciar las componentes armónicas en el cálculo de las pérdidas en vacío es, en efecto, despreciable, y la norma ANSI/IEEE C57.110 considera que estas no aumentan con las cargas no lineales, pues supone que se mantienen constantes aun cuando las corrientes sean no sinusoidales.

Las pérdidas con carga se subdividen en pérdidas óhmicas y pérdidas adicionales. Las óhmicas son calculadas a partir de la resistencia de los devanados (medida con corriente directa) y la corriente de carga que circula por los mismos. Las adicionales obedecen al término dado por la acumulación de pérdidas adicionales experimentadas por el transformador, que incluyen pérdidas por corrientes parásitas en los devanados y pérdidas derivadas de los efectos del flujo de dispersión en las estructuras

metálicas internas. Las pérdidas con carga pueden ser obtenidas del ensayo de cortocircuito y su expresión general es:

$$P_{LL} = P_{dc} + P_{EC} + P_{OSL} \quad [\text{Watt}] \quad (3)$$

Donde:

P_{dc} : son las pérdidas en las resistencias de los devanados.

P_{EC} : son las pérdidas por corrientes parásitas en los devanados.

P_{OSL} : son otras pérdidas adicionales en las partes estructurales del transformador, tales como: tanque, abrazaderas, etc.

No existe un procedimiento práctico o experimental para la separación de las pérdidas por corrientes parásitas en los devanados de las otras pérdidas adicionales, por lo que se calculan las pérdidas adicionales totales (P_{TSL}). La suma de P_{EC} y P_{OSL} corresponde a las pérdidas adicionales totales y estas pueden ser calculadas como la diferencia entre las pérdidas con carga y las pérdidas óhmicas, según la expresión (4):

$$P_{TSL} = P_{EC} + P_{OSL} = P_{LL} - P_{dc} \quad [\text{Watt}] \quad (4)$$

2.1. Pérdidas óhmicas.

Estas pérdidas se calculan a partir de las mediciones que se le aplican a la resistencia de los devanados y de la corriente de carga. El valor RMS de la corriente de carga incrementa debido a las componentes armónicas y, por lo tanto, las pérdidas óhmicas se incrementan por el cuadrado del valor RMS de la corriente de carga. Las pérdidas óhmicas en presencia de armónicos, se pueden calcular como:

$$P_{dc} = R_{dc} \cdot I^2 = R_{dc} \cdot \sum_{h=1}^{h=h_{max}} I_h^2 \quad [\text{Watt}] \quad (5)$$

Donde:

R_{dc} : es la resistencia del devanado medida con corriente directa, en Ω .

I : es el valor rms de la corriente de carga, en A

h : es el orden del armónico, desde 1 hasta $h_{m\acute{a}x}$.

2.2 Pérdidas por corrientes parásitas en los devanados

Estas pérdidas son resultado del flujo electromagnético variable en el tiempo que concatena con los devanados. El efecto pelicular y el efecto de proximidad son los fenómenos más importantes que explican el incremento de estas pérdidas.

La mayor cantidad de estas pérdidas se produce en los conductores de la última capa del devanado, lo cual se debe a la alta densidad de flujo radial que hay en esta zona. Como se muestra en la expresión (6), dichas pérdidas son proporcionales al cuadrado de la frecuencia y al cuadrado de la corriente de carga:

$$P_{EC} = \frac{\pi \cdot \tau^2 \cdot \mu^2}{3\rho} \cdot f^2 \cdot H^2 \propto f^2 \cdot I^2 \quad (6)$$

Siendo:

τ : el ancho de un conductor perpendicular al campo.

ρ : la resistencia del conductor.

La norma ANSI/IEEE C57.110 recomienda estimar las pérdidas por corrientes parásitas en los devanados, como aproximadamente un 33 % de las pérdidas adicionales totales para transformadores en aceite y un 67 % para transformadores secos.

Como se aprecia en la ecuación (6), las pérdidas por corrientes parásitas son proporcionales al cuadrado de la corriente y al cuadrado de la frecuencia de los armónicos y pueden calcularse como:

$$P_{EC} = P_{EC-R} \cdot \sum_{h=1}^{h=h_{max}} h^2 \cdot \left(\frac{I_h}{I_R}\right)^2 \quad [\text{Watt}] \quad (7)$$

Donde:

P_{EC-R} : son las pérdidas nominales por corrientes parásitas en los devanados, en W.

I_h : es la corriente del armónico h , en A.

I_R : es la corriente nominal, en A, y h es el orden del armónico.

El factor de pérdidas armónicas para las pérdidas por corrientes parásitas en los devanados puede ser definido por la siguiente expresión:

$$F_{HL} = \frac{\sum_{h=1}^{h=h_{max}} h^2 \cdot I_h^2}{\sum_{h=1}^{h=h_{max}} I_h^2} = \frac{\sum_{h=1}^{h=h_{max}} h^2 \cdot (\frac{I_h}{I_R})^2}{\sum_{h=1}^{h=h_{max}} (\frac{I_h}{I_R})^2} \tag{8}$$

El factor de pérdidas armónicas (F_{HL}) es un factor de proporcionalidad aplicado a las pérdidas por corrientes parásitas en los devanados, el cual representa el valor efectivo del calentamiento debido a la corriente de carga armónica, y es la relación entre las pérdidas por corrientes parásitas totales debida a los armónicos, en relación con las pérdidas por corrientes parásitas en los devanados a la frecuencia de la red, como si no existieran armónicos.

El factor de pérdidas armónicas calculado por (8) es válido para transformadores cuyos conductores tengan dimensiones menores de 3 mm. Para conductores con dimensiones mayores a este valor, pueden hacerse correcciones para calcular un nuevo factor de pérdidas corregido (F'_{HL}), con el que se obtienen resultados más precisos; pero se requiere información de diseño como el ancho del conductor τ (Makarov & Enmanuel, 2000).

Debido al efecto pelicular, en los conductores con dimensiones mayores a 3 mm, el flujo electromagnético a altas frecuencias no puede penetrar completamente en los conductores. Por tanto, la permeabilidad (δ), que depende de la frecuencia, puede ser definida para diferentes frecuencias armónicas como:

$$\delta = \sqrt{\frac{\rho}{\mu\pi f h}} = \frac{\delta_R}{\sqrt{h}} \tag{9}$$

Donde:

δ_R : es la profundidad de penetración a la frecuencia nominal (por ejemplo, esta es a 50 Hz, aproximadamente 10 mm para el cobre y alrededor de 13 mm para el aluminio).

ρ : es la resistencia del conductor.

μ : es la permeabilidad del conductor.

f : es la frecuencia fundamental.

En presencia de armónicos, las pérdidas por corrientes parásitas y el factor de pérdidas se calculan como:

$$P_{EC} = \mu_o \omega \cdot H^2 \cdot F(\zeta) \tag{10}$$

Siendo $F(\zeta)$ una función de la altura virtual de la barra de los conductores del devanado:

$$F(\zeta) = \frac{1}{\zeta} \cdot \frac{\sinh \zeta - \sin \zeta}{\cosh \zeta + \cos \zeta} \tag{11}$$

La altura virtual de la barra de los conductores del devanado se calcula como:

$$\zeta = \frac{\tau}{\delta} \tag{12}$$

Para el caso del armónico h se tiene:

$$\zeta_h = \zeta_R \sqrt{h} \tag{13}$$

El factor de pérdidas armónicas corregido se determina como:

$$F'_{HL} = \frac{\sum_{h=1}^{h=h_{max}} h \cdot (\frac{F(\zeta_h)}{F(\zeta_1)}) \cdot (\frac{I_h}{I_R})^2}{\sum_{h=1}^{h=h_{max}} (\frac{I_h}{I_R})^2} \tag{14}$$

De acuerdo con la expresión (14), cuando se trabaja con corrientes no sinusoidales, las pérdidas por corrientes parásitas nominales se deben multiplicar por el coeficiente F'_{HL} (Makarov & Enmanuel, 2000).

2.3 Otras pérdidas adicionales

La parte de las pérdidas por corrientes parásitas que se produce en las partes estructurales del transformador (excepto en los devanados) se denomina otras pérdidas adicionales.

Estas pérdidas se originan en partes metálicas tales como el tanque, envoltura y abrazaderas, y depende de muchos factores como las dimensiones del núcleo, la tensión del transformador y los materiales utilizados para construir el tanque y las abrazaderas.

La norma ANSI/IEEE C57.110 asume que el valor nominal de otras pérdidas adicionales (P_{OSL-R}) es el 67 % de las pérdidas adicionales totales para transformadores en aceite y 33 % para transformadores secos.

Por otro lado, en presencia de corrientes no sinusoidales, el valor de las otras pérdidas adicionales cambia con el cuadrado del valor

RMS de la corriente y con la frecuencia de los armónicos elevada a 0.8, o sea:

$$P_{OSL} = P_{OSL-R} \cdot \sum_{h=1}^{h=hmax} h^{0.8} \cdot \left(\frac{I_h}{I_R}\right)^2 \quad [\text{Watt}] \quad (15)$$

El factor de pérdidas armónicas para otras pérdidas adicionales es:

$$F_{HL-STR} = \frac{P_{OSL}}{P_{OSL-R}} = \frac{\sum_{h=1}^{h=hmax} h^{0.8} \cdot \left(\frac{I_h}{I_R}\right)^2}{\sum_{h=1}^{h=hmax} \left(\frac{I_h}{I_R}\right)^2} \quad (16)$$

Para calcular las otras pérdidas adicionales con corrientes no sinusoidales, solo se necesita multiplicar el valor de otras pérdidas adicionales nominales por el factor de pérdidas armónicas F_{HL-STR} .

2. 4 Corriente de carga permisible

Cuando un transformador es utilizado en una red con armónicos de tensión y corriente, debido al incremento de las pérdidas, también aumenta la temperatura, y, por tal razón, su potencia nominal debe ser desclasificada. Esta acción resulta posible cuando se limitan las pérdidas totales del transformador bajo condiciones no sinusoidales, al valor de las pérdidas a corriente de carga y tensión sinusoidales. Es decir, la máxima corriente de carga del transformador con armónicos tiene que ser determinada por aquella que provocaría iguales pérdidas en condiciones sinusoidales.

Las pérdidas con carga por unidad (pu) sin armónicos y en condiciones nominales son iguales a:

$$P_{LL-R}(pu) = 1 + P_{EC-R}(pu) + P_{OSL-R}(pu) \quad (17)$$

Donde:

P_{LL-R} : son las pérdidas de carga nominales del transformador.

P_{EC-R} : son las pérdidas por corrientes parásitas en condiciones nominales.

P_{OSL-R} : son las otras pérdidas adicionales en condiciones nominales.

El valor 1 en la ecuación (17) es la cantidad en pu de las pérdidas óhmicas en relación con las pérdidas óhmicas nominales.

Ahora bien, en condiciones no sinusoidales se tiene:

$$P_{LL}(pu) = I^2(pu) \cdot [1 + F_{HL} \cdot P_{EC-R}(pu) + F_{HL-STR} \cdot P_{OSL-R}(pu)] \quad (18)$$

Para corrientes de carga no sinusoidales, la ecuación para el valor en pu de la corriente (con base a la corriente nominal) será:

$$I(pu) = \sqrt{\sum_{h=1}^{h=hmax} I_h(pu)^2} \quad (19)$$

Por lo tanto, la corriente máxima permisible para determinar la reducción de la capacidad del transformador se deduce a partir de (18) y se calcula como:

$$I_{max}(pu) = \sqrt{\frac{P_{LL-R}(pu)}{1 + F_{HL} \cdot P_{EC-R}(pu) + F_{HL-STR} \cdot P_{OSL-R}(pu)}} \quad (20)$$

Con la expresión (20) se puede determinar la corriente máxima permisible del transformador y también la reducción de la capacidad al trabajar con corrientes no sinusoidales.

3. Caso de estudio de un transformador monofásico de 25 kVA

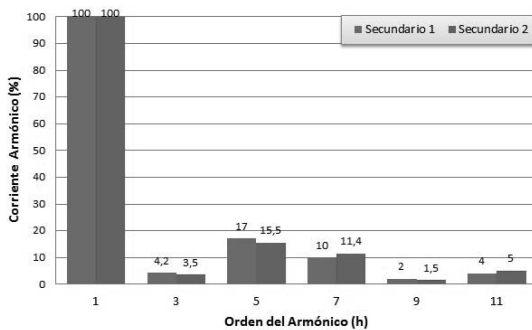
En esta sección se aplica la metodología desarrollada para el cálculo de las pérdidas de un transformador monofásico de 25 kVA con derivación central. Los datos del transformador se muestran en la Tabla 1. El espectro armónico de la carga que alimenta se muestra en la Figura 1.

Tabla 1. Parámetros del transformador

Parámetros	
Potencia nominal, S_R (kVA)	25
Tensión primaria, V_{1R} (V)	7620
Tensión secundaria, V_{2R} (V)	240
Pérdidas de vacío nominales aseguradas, P_{NL} (W)	90
Pérdidas de cobre nominales aseguradas, P_{LL} (W)	360
Resistencia óhmica primaria, R_1 (Ω)	11
Resistencia óhmica secundaria, R_2 (Ω)	0.012
% de impedancia	3.6
Corriente nominal por primario, I_{1R} (A)	3.28
Corriente nominal por secundario, I_{2R} (A)	104.17

Fuente: elaboración propia.

Figura 1. Espectro armónico de las corrientes de carga por cada sección del devanado secundario



Fuente: elaboración propia.

Los valores de la componente fundamental de las corrientes de carga para cada sección del devanado secundario son 80 y 95 A, con THD de corriente iguales a 20,65 % y 20,24 %, respectivamente.

Las pérdidas óhmicas totales en condiciones nominales son:

$$\begin{aligned}
 P_{dc} &= I_{1R}^2 \cdot R_1 + I_{2R}^2 \cdot R_2 \\
 &= 3,28^2 \cdot 11 + 104,17^2 \cdot 0,012 \\
 &= 248,61 \text{ W}
 \end{aligned}$$

Las pérdidas adicionales nominales son:

$$P_{TSL} = P_{LL} - P_{dc} = 360 - 248,61 = 111,39 \text{ W}$$

Según la norma ANSI/IEEE C57.110, las pérdidas por corrientes parásitas en los devanados constituyen aproximadamente un 33 % de las pérdidas adicionales totales para transformadores en aceite, por lo que las pérdidas nominales por corrientes parásitas en los devanados son:

$$P_{EC-R} = 0,33 \cdot P_{TSL} = 36,76 \text{ W}$$

Las otras pérdidas adicionales nominales son:

$$P_{OSL-R} = 0,67 \cdot P_{TSL} = 74,63 \text{ W}$$

La norma ANSI/IEEE C57.110 recomienda que la división de las pérdidas por corrientes parásitas entre los devanados se asuma de la siguiente forma:

a) 60 % para el devanado interior y 40 % para el devanado exterior de todos los transformadores

que tengan una corriente nominal inferior a 1000 A (sin tener en cuenta la relación de transformación).

b) 60 % para el devanado interior y 40 % para el devanado exterior de todos los transformadores que tengan una relación de transformación de 4:1 o inferior.

c) 70 % para el devanado interior y 30 % para el devanado exterior de todos los transformadores que tengan una relación de transformación mayor a 4:1 y uno o más devanados con corriente nominal mayor de 1000 A.

En ausencia de otra información, se considera que el devanado interior es el devanado de baja tensión. Para este caso, se tiene que las pérdidas nominales por corrientes parásitas en el devanado primario son:

$$P_{ECI-R} = 0,4 \cdot P_{EC-R} = 14,7 \text{ W}$$

Para el devanado secundario:

$$P_{ECI-R} = 0,6 \cdot P_{EC-R} = 22,05 \text{ W}$$

Los cálculos de los factores de pérdidas y las corrientes de carga en pu correspondientes a cada mitad de devanado secundario se muestran en la Tabla 2.

Tabla 2. Cálculo de los factores de pérdidas armónicas

Secundario 1							
H	I _h	I _h /I _R	(I _h /I _R) ²	h ²	h ^{0.8}	(I _h /I _R) ² ·h ²	(I _h /I _R) ² ·h ^{0.8}
1	80.00	0.7680	0.5898	1	1.0000	0.5898	0.5898
3	3.36	0.0323	0.0010	9	2.4082	0.0094	0.0025
5	13.60	0.1306	0.0170	25	3.6239	0.4261	0.0618
7	8.00	0.0768	0.0059	49	4.7433	0.2890	0.0280
9	1.60	0.0154	0.0002	81	5.7995	0.0191	0.0014
11	3.20	0.0307	0.0009	121	6.8095	0.1142	0.0064
Σ			0.6149			1.4476	0.6898
<i>F_{HLL1ec.}</i> (8)	2.35						
<i>F_{HLL1-STRec.}</i> (16)	1.12						
<i>I_{sec1}</i> (pu)ec.(20)	0.78						
Secundario 2							
H	I _h	I _h /I _R	(I _h /I _R) ²	h ²	h ^{0.8}	(I _h /I _R) ² ·h ²	(I _h /I _R) ² ·h ^{0.8}
1	95.00	0.9120	0.8317	1	1.0000	0.8317	0.8317
3	3.33	0.0319	0.0010	9	2.4082	0.0092	0.0025
5	14.73	0.1414	0.0200	25	3.6239	0.4995	0.0724
7	10.83	0.1040	0.0108	49	4.7433	0.5296	0.0513
9	1.43	0.0137	0.0002	81	5.7995	0.0152	0.0011
11	4.75	0.0456	0.0021	121	6.8095	0.2516	0.0142
Σ			0.8658			2.1368	0.9731
<i>F_{HLL2ec.}</i> (8)	2.47						
<i>F_{HLL2-STRec.}</i> (16)	1.12						
<i>I_{sec2}</i> (pu)ec.(20)	0.93						

Fuente: elaboración propia.

Utilizando la ecuación (18) se calculan las pérdidas con carga en pu para cada corriente de carga. Como cada sección del devanado secundario contribuye de manera independiente, se utiliza como base la mitad de las pérdidas óhmicas nominales. Por otro lado, si cada corriente de las secciones secundarias contribuye de igual manera a las otras pérdidas adicionales, se tiene que las pérdidas de carga en pu provocadas por cada corriente de carga no sinusoidal serán:

$$P_{LLH1}(pu) = I_{sec1}(pu)^2 \left[1 + \frac{F_{HLL1} \left(\frac{P_{EC-R}}{2} \right)}{\left(\frac{P_{dc}}{2} \right)} + \frac{F_{HLL1-STR} \left(\frac{P_{OSL-R}}{2} \right)}{\left(\frac{P_{dc}}{2} \right)} \right] = 1.04 pu$$

$$P_{LLH2}(pu) = I_{sec2}(pu)^2 \left[1 + \frac{F_{HLL2} \left(\frac{P_{EC-R}}{2} \right)}{\left(\frac{P_{dc}}{2} \right)} + \frac{F_{HLL2-STR} \left(\frac{P_{OSL-R}}{2} \right)}{\left(\frac{P_{dc}}{2} \right)} \right] = 1.47 pu$$

Las pérdidas con carga totales en condiciones no sinusoidales son:

$$P_{LLTH} = (P_{LLH1}(pu) + P_{LLH2}(pu)) \cdot \frac{P_{dc}}{2} = 311.99 W$$

Las pérdidas totales con armónicos son:

$$P_H = P_{NL} + P_{LLTH} = 90 + 311.99 = 401.99 W$$

Para condiciones sinusoidales suponiendo igual valor RMS de las corrientes de carga:

$$P_{LL1}(pu) = I_{sec1}(pu)^2 \left[1 + \frac{\left(\frac{P_{EC-R}}{2} \right)}{\left(\frac{P_{dc}}{2} \right)} + \frac{\left(\frac{P_{OSL-R}}{2} \right)}{\left(\frac{P_{dc}}{2} \right)} \right] = 0.89 pu$$

$$P_{LL2}(pu) = I_{sec2}(pu)^2 \left[1 + \frac{\left(\frac{P_{EC-R}}{2} \right)}{\left(\frac{P_{dc}}{2} \right)} + \frac{\left(\frac{P_{OSL-R}}{2} \right)}{\left(\frac{P_{dc}}{2} \right)} \right] = 1.25 pu$$

$$P_{LLT} = (P_{LL1}(pu) + P_{LL2}(pu)) \cdot \frac{P_{dc}}{2} = 266.53 W$$

Las pérdidas totales sin armónicos son:

$$P = P_{NL} + P_{LLT} = 90 + 266.53 = 356.53 W$$

El incremento de las pérdidas por la circulación de armónicos en este caso será igual a:

$$\Delta_{PLL} = P_H - P = 401.99 - 356.53 = 45.46 \text{ W}$$

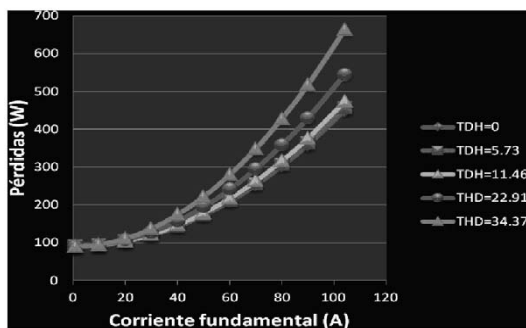
4. Influencia de la magnitud de los armónicos

En la Figura 2 se muestra el comportamiento de las pérdidas en función de la corriente fundamental, en caso de que el transformador del ejemplo anterior estuviera alimentando cargas iguales por cada semidevanado secundario, con espectros de corriente en los cuales estuvieran los armónicos de orden 5, 7 y 11.

Puede observarse que en este caso, solo para THD por encima de 22.91 %, es que se nota un incremento en las pérdidas en relación con el comportamiento que posee corriente sinusoidal. Para los THD de corriente por debajo de 11.46 % no existe un incremento apreciable de las pérdidas en cuanto a corriente de carga sinusoidal.

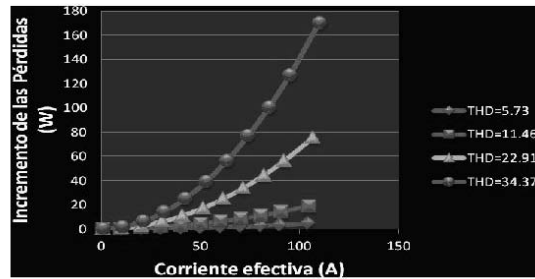
El efecto de las corrientes de carga distorsionadas sobre las pérdidas también se muestra en la Figura 3. Se destaca que solo con corrientes efectivas elevadas y THD de corriente de 22.91 % y 34.37 %, es que se aprecia un mayor incremento de las pérdidas por la circulación de armónicos.

Figura 2. Pérdidas en función de la corriente de carga fundamental para distintos THD de corriente del transformador monofásico de 25 kVA con derivación central



Fuente: elaboración propia.

Figura 3. Incremento de las pérdidas por circulación de armónicos en función de la corriente efectiva de carga para distintos valores de THD de corriente



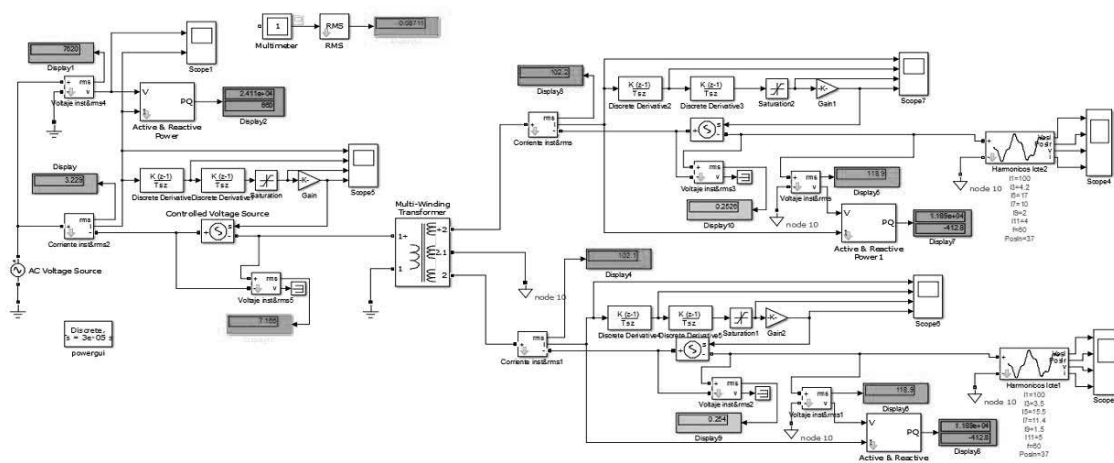
Fuente: elaboración propia.

Para simular las pérdidas en el transformador también se puede utilizar un modelo en el MATLAB /SIMULINK (Sadati, Yousefi, Darvishi & Tahani, 2008; Yazdani-Asrami, Mirzaie & Akmal, 2010; Gupta & Singh, 2011). El modelo del transformador consta de los parámetros ordinarios tales como resistencias, inductancias de dispersión, inductancia y resistencia de la rama de magnetización, que pueden ser obtenidos a partir de los ensayos tradicionales del transformador. En este modelo las pérdidas adicionales son consideradas para simular el transformador con carga no lineal.

La Figura 4 muestra el modelo propuesto para el transformador, con las pérdidas por efecto de proximidad representadas como una diferencia de potencial que ha sido definida por otros autores en función de la segunda derivada de la corriente de carga (Sadati, Yousefi, Darvishi & Tahani, 2008; Yazdani-Asrami, Mirzaie & Akmal, 2010; Gupta & Singh, 2011). Las pérdidas adicionales son calculadas implementando en el modelo el procedimiento que propone la norma ANSI/IEEE C57.110 (ANSI/IEEE Std, 1998).

Para modelar la carga armónica se conectan en paralelo fuentes de corriente de diferentes frecuencias. El modelo del MATLAB/SIMULINK fue comparado con el método analítico descrito en el epígrafe anterior, demostrándose así su equivalencia. Los resultados para una condición de carga igual a la mostrada en la Figura 1 se exponen en la Tabla 4. Los resultados evidencian el incremento en las pérdidas con carga armónica y, por lo tanto, cómo se afecta la eficiencia y la capacidad del transformador.

Figura 4. Modelo del transformador implementado en MATLAB/SIMULINK



Fuente: elaboración propia.

Tabla 4. Comparación de pérdidas bajo carga armónica por el SIMULINK y el método analítico de la norma ANSI/IEEE C57.110

Tipo de pérdidas	Simbología	Con corriente sinusoidal de valor RMS igual a la distorsionada	Con carga armónica calculada por el SIMULINK	Con carga armónica calculada por el método analítico
Pérdidas en las resistencias de los devanados	P_{dc}	184.62	184.62	184.62
Pérdidas en vacío	P_{NL}	90	90	90
Pérdidas por corrientes parásitas en los devanados	P_{EC}	27.03	64.71	65.53
Otras pérdidas adicionales en las partes estructurales del transformador como tanque, abrazaderas, etc.	P_{OSL}	54.74	61.52	61.57
Pérdidas totales	P_T	356.39	400.85	401.72

Fuente: elaboración propia.

5. Conclusiones

Se ha desarrollado un modelo basado en las recomendaciones de la norma ANSI/IEEE C57.110 para evaluar el comportamiento de transformadores que alimentan cargas no lineales, en el caso de transformadores monofásicos con derivación central y diferentes cargas en cada semidevanado.

Los resultados obtenidos –tanto del modelo analítico como del modelo desarrollado en el SIMULINK– son similares, y la simulación permite comprobar que el incremento de las pérdidas es función de la carga y del THD. Los resultados muestran que para valores de THD de corriente inferiores al 20 % no hay un incremento significativo en las pérdidas de energía para el caso analizado. Lo mismo ocurre para el caso en el cual el transformador está alimentando cargas no lineales, pero por debajo del 50 % de carga.

Se debe conocer cómo calcular la incidencia de la distorsión armónica sobre las pérdidas para poder cuantificar pérdidas energéticas y costos asociados a problemas de calidad de la energía, así como analizar la factibilidad que tendría implementar medidas de mitigación.

6. Recomendaciones

Un trabajo de continuidad es evaluar el incremento de temperatura y la reducción de la vida del transformador, a la vez que estudiar el mismo efecto en transformadores industriales trifásicos para calcular el filtro necesario y evaluar su factibilidad técnica a partir del incremento en la eficiencia y la prolongación de la vida útil del transformador, en el caso de que se requiera.

Referencias

- ANSI/IEEE Std. (1998). C57.110-1998. IEEE Recommended Practice for Establishing Transformer Capability when Supplying Non-Sinusoidal Load Currents. IEEE Standards.
- Aponte, G., Cadavid, H., Burgos, J. & Gómez-Luna, E. (2012). A methodology for obtaining by measurements the transformer physical-circuitual model parameters. *Electrical and Review Poland*, 9, a, 12 - 15.
- Etezadi-Amoli, M., Reno, U. N. R., Choma, K. & Louie, R. (September, 2007). Analysis of High Voltage Harmonic Distortion Measurements. In *Proceedings of 39th North American Power Symposium*. NAPS '07 (pp. 511-517). EUA.
- García-González, G. & De Armas, M. (Julio - Diciembre, 2009). Selección Eficiente de Bancos de Transformadores. *Revista Energética*, 42, 29 - 38.
- González, G., Quispe, E. C. & Rivas, E. (Agosto, 2003). Selección Eficiente de Bancos de Transformadores. *Revista Científica*, 1, 5, 219 - 227. Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Colombia.
- Gupta, A. & Singh, R. (2011). Evaluation of Distribution Transformer Losses Under Harmonic Loads Using Analytical and Simulation Methods. *International Journal on Emerging Technologies*, 2, 2, 90 - 95.
- Jardini, J. A. (January, 2000). Distribution Transformer Loss of Life Evaluation: A Novel Approach Based on Daily Load Profiles. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 15, 1.
- Makarov, S. N. & Enmanuel, A. E. (October, 2000). Corrected Harmonic Loss Factor For Transformers supplying Non-sinusoidal Load current Analysis of High Voltage Harmonic Distortion Measurements. In *Proceedings of IEEE 9th International Conference on Harmonics and Power Quality*, 1, 87 - 90.
- Merritt, S. Y. & Chaitkin, S. D. (2002). Transformer Losses Part of the Purchasing Decision. *IEEE Pulp and Paper Industry Technical Conference*, 175 - 180. Ontario, Canada.
- Quispe, E. C. & Aguado, J. (Noviembre, 2002). Conceptualización para la estimación de la potencia reactiva, incluyendo el efecto de los armónicos de tensión y corriente. *El Hombre y la Máquina*, 18, 48 -55. Universidad Autónoma de Occidente, Colombia.
- Ripoll-Salcines, E. (2008). *Memorias sobre Seminario de Cálculos Rápidos Automatizados de las Pérdidas Técnicas de los Elementos de la Red Eléctrica por Circuitos Primarios y Alimentadores en los Municipios*. Cuba: Empresa Eléctrica Cienfuegos.
- Ruíz-Pérez, A., Gómez-Sarduy, J. R. & Viego-Felipe, P. R. (Abril, 2012). Cálculo de pérdidas en transformadores considerando desbalances y variaciones de la carga y la tensión. En *Memorias del VII Taller Internacional de Energía y Medio Ambiente*. Cuba, Cienfuegos.
- Sadati, S. B., Yousefi, H., Darvishi, B. & Tahani, A. (December, 2008). Comparison of Distribution Transformer Losses and Capacity under Linear and Harmonic Loads. In *2nd IEEE International Conference on Power and Energy (PECon 08)*. December 1-3, 2008. Johor Baharu, Malaysia.
- Santos, R. E., Palacios, J. A & Quispe, E. C. (Octubre, 2003). Estado del arte en el concepto de la potencia eléctrica en el dominio del tiempo bajo condiciones no sinusoidales. En *Memorias II Simposio Internacional sobre la Calidad de la Energía Eléctrica*. Universidad Nacional de Colombia.
- Schneider Electric. (November, 2006). Transformer/Line Loss Calculations. *Technical Note*, 70072, 0153-07. Retrieved from <http://www.powerlogic.com/literature/70072-0153-07.pdf>.
- Yang, M., Shi, Y. & Zhang, J. (October, 2004). Efficient Operation Regions of Power Distribution Transformers. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 19, 4.
- Yazdani-Asrami, M., Mirzaie, M. & Akmal, S. (2010). Calculation of Transformer Losses under Non-Sinusoidal Currents Using: Two Analytic Methods and Finite Element Analysis. *World Applied Sciences Journal*, 9, 8, 889 - 897.