



El problema de los armónicos en los transformadores. Estado mundial del arte

Orestes Hernández
José G. Sánchez
Reinel Valido

Recibido: Junio del 2005
Aprobado: Septiembre del 2005

Resumen / Abstract

Uno de los temas que actualmente está ocupando el mundo de los diseñadores y explotadores de transformadores es el del funcionamiento de estos equipos con cargas no lineales, productoras de distorsiones o armónicos en las señales de tensión y corriente. Entre los problemas ocasionados por los armónicos, la generación adicional de pérdidas y de calentamiento en los transformadores, está entre los más importantes. Si la carga que estos equipos alimentan, se mantiene constante, el resultado es la pérdida de vida útil del transformador, entre otros problemas que pueden presentarse. Una solución muy empleada en muchos países para esta problemática, es la reducción de la capacidad de los transformadores, es decir, la utilización limitada de su potencia nominal. Aunque en Cuba se fabrican transformadores de distribución, no existe una guía para tratar este problema, pero cada día urge más establecer una política a seguir desde el punto de vista de proyección y en busca de una explotación eficiente. Se pretende en este trabajo, abordar el tema exponiendo los resultados investigativos que existen en el mundo sobre el mismo y tratando de aportar un punto de vista que pueda ayudar a abrirse paso entre lo ya estudiado y hacer una propuesta.

Palabras clave: armónicos, armónicos en transformadores, transformadores

One of the topics that at the moment is occupying the world of the designers and exploiters of transformers is that of the operation of these teams with non lineal loads, producers of distortions or harmonic in the signs of tension and current. Among the problems caused by the harmonic, the additional generation of losses and of heating in the transformers, it is among the most important. If the load that these teams feed, stays constant, the result is the loss of useful life of the transformer, among other problems that can be presented. A solution very employee in many countries for this problem, is the reduction of the capacity of the transformers, that is to say, the limited use of her nominal power. In Cuba, although we are manufacturing of distribution transformers, a guide doesn't exist to treat this problem, but every day it urges more to establish a politics to continue from the projection point of view and in search of an efficient exploitation. It is sought in this work, to approach the topic exposing the investigative results that exist in the world on the same one and trying to contribute a point of view that he/she can help to already open up step among it studied and to make a proposal.

Key words: harmonic, harmonic in transformers, transformers

INTRODUCCIÓN

Cuando la tensión que alimenta a un transformador o su corriente de carga no son totalmente sinusoidales,

es decir, contienen armónicos, se produce, entre otros efectos, un calentamiento adicional en la máquina y una aceleración en su ritmo de pérdida de vida, si no

se llevan a cabo acciones correctivas para su explotación.

La acción más recurrente en este caso es la limitación de la carga a alimentar, es decir, que automáticamente, el transformador pasa a ser de una potencia nominal inferior a la que fue diseñado para condiciones normales de operación.

Las publicaciones existentes sobre el tema plantean una serie de consideraciones y métodos para cuantificar el incremento de las pérdidas por efecto de los armónicos, cómo y cuánto influyen estos, en los transformadores y cuánto debe reducirse la capacidad nominal de los mismos en dependencia del grado de distorsión que tenga la corriente de carga.

En realidad toda la bibliografía analiza el caso para cuando hay armónicos en la corriente de carga y relaciona estos armónicos con las pérdidas adicionales por corrientes parásitas pero no se pronuncian con relación a los efectos que producen en los transformadores, una alimentación o una tensión secundaria no sinusoidal.

ESTADO DEL ARTE

Las llamadas pérdidas de carga que se generan en los transformadores pueden definirse como:

1. Pérdidas directas o por efecto joule. Originadas por la corriente de carga y las resistencias a corriente directa de los devanados ($I^2 R$).

Son independientes de la forma de onda de la corriente y sus armónicos, solo depende de su valor efectivo.

2. Pérdidas adicionales. Están compuestas por:

a) Pérdidas adicionales por corrientes parásitas en los devanados.

b) Pérdidas adicionales por corrientes parásitas fuera de los devanados (tanque, etcétera).

Es decir:

$$P_a = P_{ad} + P_{at} \quad (W) \quad \dots(1)$$

donde:

P_a : Pérdidas adicionales [W].

P_{ad} : Pérdidas adicionales por corrientes parásitas en los devanados [W].

P_{at} : Pérdidas adicionales por corrientes parásitas fuera de los devanados [W].

Las pérdidas por corrientes parásitas en general, tienen esta expresión aproximada:

$$P_{cp} = \frac{H^2 \pi f^2 t^2 \mu_0^2 V_m}{3 \rho} \quad [W] \quad \dots(2)$$

donde:

P_{cp} : Pérdidas por corrientes parásitas en general.

H : Intensidad del campo magnético [A/m].

f : Frecuencia del campo magnético H [Hz].

t : Espesor del material en la dirección perpendicular al campo magnético H [m].

μ_0 : Permeabilidad magnética del material.

V_m : Volumen del material [m³].

ρ : Resistividad del material [Ωm].

Las pérdidas adicionales por corrientes parásitas *si* dependen de los valores efectivos de las corrientes armónicas y del orden de estos armónicos y para todo fin práctico se pueden considerar dos aspectos:

1. Las pérdidas por corrientes parásitas son proporcionales al cuadrado de la frecuencia. Esto es más exacto para estructuras con pequeños espesores (menores a 3 mm) en la dirección perpendicular al campo magnético y para armónicos menores.¹

2. Se puede aplicar el principio de **superposición** para las pérdidas por corrientes parásitas. Esto permite sumar directamente las componentes de pérdidas de cada armónico.

En la *IEEE. C57.110-1998*,² se plantean dos factores mediante los cuales se puede obtener el incremento que se verifica en las pérdidas adicionales en los transformadores, una vez conocido o registrado el tipo de carga que está alimentando el transformador con su contenido de armónicos y valores efectivos de cada componente de la corriente:

$$F_{APD} = \frac{\sum_{h=1}^{h=h_{máx}} h^2 \left[\frac{I_h}{I} \right]^2}{\sum_{h=1}^{h=h_{máx}} \left[\frac{I_h}{I} \right]^2} \quad \dots(3)$$

Este factor es la relación entre las pérdidas adicionales por corrientes parásitas que se producen en los devanados en presencia de armónicos y las mismas pérdidas para frecuencia de potencia.

$$F_{APD} = \frac{P_{ada}}{P_{ad}} \quad \dots(4)$$

El otro factor que se define en (2) es:

$$F_{APT} = \frac{\sum_{h=1}^{h=h_{máx}} h^2 \left[\frac{I_h}{I} \right]^{0.8}}{\sum_{h=1}^{h=h_{máx}} \left[\frac{I_h}{I} \right]^2} \quad \dots(5)$$

donde:

F_{APD} : Factor de pérdidas adicionales en el devanado con corriente no sinusoidal.

F_{APT} : Factor de pérdidas adicionales fuera de los devanados con corriente no sinusoidal.

P_{ada} : Pérdidas adicionales en el devanado con corriente armónica [W].

P_{ad} : Pérdidas adicionales en el devanado a frecuencia de potencia [W].

h : Orden del armónico.

I_h : Valor efectivo de la componente del armónico h de la corriente no sinusoidal [A].

I : Valor efectivo de la corriente de carga [A].

De esta forma las pérdidas adicionales se incrementarán ante corrientes distorsionadas de la siguiente forma:

$$P_{ada} = P_{ad} \times F_{APD} \quad (W) \quad \dots(6)$$

$$P_{ata} = P_{at} \cdot F_{APT} \quad [W] \quad \dots(7)$$

donde:

P_{ata} : Pérdidas adicionales fuera de los devanados con corriente armónica.

P_{at} : Pérdidas adicionales fuera de los devanados a frecuencia de potencia.

En transformadores secos solo se calcula F_{APD} , pues solo se consideran importantes las pérdidas dentro de los devanados. En transformadores en aceite, es necesario hacer el análisis de los dos factores.

Cuando no se tienen datos de los fabricantes, puede asumirse lo siguiente:²

1. En transformadores secos; el 67 % de las pérdidas adicionales totales son por corrientes parásitas en los devanados.

2. En transformadores en aceite; el 33 % de las pérdidas adicionales totales son por corrientes parásitas en los devanados.

3. Las pérdidas directas o julianas se consideran uniformemente distribuidas en cada devanado.

4. Las pérdidas adicionales por corrientes parásitas en los devanados no están uniformemente distribuidas. Se distribuyen de la siguiente forma:

a) El 60 % en el devanado interior y el 40 % en el devanado exterior si el transformador tiene una corriente nominal, en condiciones de autorefrigeración, menor a 1 000 A o su relación de transformación es menor o igual a 4.

b) El 70 % en el devanado interior y el 30 % en el devanado exterior si el transformador tiene una corriente nominal, en condiciones de autorefrigeración, mayor a 1 000 A y su relación de transformación es mayor a 4.

c) La mayor densidad de pérdidas adicionales por corrientes parásitas en los devanados se encuentra en la región del punto más caliente del devanado interior y es 4 veces la densidad promedio de estas pérdidas en el propio devanado.

Con todos estos elementos, teniendo como referencia las pérdidas nominales de vacío y de carga del transformador a frecuencia de potencia, se pueden calcular los incrementos de estas pérdidas ante cargas distorsionadas y con estos resultados se pueden determinar los incrementos de temperaturas en el aceite y en el punto más caliente del transformador y determinar si este puede o no llevar esta carga o es necesario disminuir su potencia nominal.

Partiendo de los datos de incremento de temperatura del aceite y del punto más caliente del devanado, obtenidos del fabricante o de ensayos realizados, se puede obtener:

$$\Delta T_{TOA} = \Delta T_{TON} \left(\frac{P_{TA}}{P_T} \right)^{0.8} \quad \dots(8)$$

$$\Delta T_{HSA} = \Delta T_{HSAN} \left(\frac{P_{HSA}}{P_{HS}} \right)^{0.8} \quad \dots (9)$$

$$P_{HS} = I_n^2 R + 4DP_{ad} \quad \dots(10)$$

$$P_{HSA} = I^2 R + 4DP_{ada} \quad \dots(11)$$

donde:

ΔT_{TOA} : Incremento de la temperatura en las capas superiores del aceite con relación al ambiente para corriente armónica [°C].

ΔT_{TON} : Incremento de la temperatura en las capas superiores del aceite con relación al ambiente en condiciones nominales, [°C].

P_{TA} : Pérdidas totales del transformador con corriente distorsionada [W].

P_T : Pérdidas totales del transformador en condiciones nominales [W].

ΔT_{HSA} : Incremento de la temperatura en el punto más caliente del devanado con relación al ambiente para corriente distorsionada [°C].

ΔT_{HSAN} : Incremento de la temperatura en el punto más caliente del devanado con relación al ambiente en condiciones nominales [°C].

P_{HSA} : Pérdidas en el punto más caliente con corriente distorsionada (no incluyen las pérdidas adicionales fuera del devanado) [W].

P_{HS} : Pérdidas en el punto más caliente en condiciones

nominales (no incluyen las pérdidas adicionales fuera del devanado) [W].

D : Según ya se dijo es:

- 0,6 si el transformador tiene una corriente nominal, en condiciones de autorefrigeración, menor a 1 000 A o su relación de transformación es menor o igual a 4.
- 0,7 si el transformador tiene una corriente nominal, en condiciones de autorrefrigeración, mayor a 1000 A y su relación de transformación es mayor a 4.

4: Según ya se dijo; la mayor densidad de pérdidas adicionales por corrientes parásitas en los devanados se encuentra en la región del punto más caliente del devanado interior y es 4 veces la densidad promedio de estas pérdidas en el propio devanado.

La UL (Underwriter Laboratory)^{3,4} plantea un factor K de derrateo que está dado por la siguiente expresión:

$$K = \sum_{h=1}^{h=h_{\max}} i_h^2 \cdot h^2 \quad \dots (12)$$

donde :

I_h : Valor efectivo de la componente del armónico h de la corriente en pu de la corriente nominal del trafo.

Este factor K tiene aplicabilidad solo si todos los armónicos superiores al décimo (10 mo.), tienen su valor efectivo inferior a I_1 / h , siendo I_1 el valor efectivo de la fundamental.

Se supone que mediante mediciones, se puede caracterizar la corriente de carga y obtener su valor de K para adecuar al transformador que le dará el servicio.

Comparando la ecuación 3 con la 12 se puede concluir que este factor K y el F_{APD} tendrán el mismo valor cuando el valor efectivo de la corriente armónica sea igual al valor efectivo de la corriente nominal del transformador.

De manera similar la norma Británica BS 7821,⁵ establece el "derrateo" de los transformadores mediante un factor, también denominado K , el cual está dado por:

$$K = \sqrt{1 + \frac{e}{1+e} \left(\frac{I_f}{I} \right)^2 \cdot \sum_{n=2}^{n=N} n^q \left(\frac{I_h}{I_f} \right)^2} \quad \dots (13)$$

donde:

e : Relación entre las pérdidas de adicionales en el devanado a la frecuencia de potencia y las pérdidas directas o por efecto joule.

n : Orden del armónico

I : Valor efectivo de la corriente no sinusoidal, incluyendo todos los armónicos [A].

I_h : Valor efectivo o amplitud de la componente armónica, de la corriente [A].

I_f : Valor efectivo o amplitud de la corriente fundamental [A].

q : Depende del tipo de bobina y de la frecuencia. Su valor es 1,7 si se usan conductores redondos o rectangulares en alta y baja tensión, o 1,5 si los conductores son de lámina en baja tensión.

En la referencia 6 se plantea un coeficiente que caracteriza la variación que sufre la resistencia en el devanado en dependencia de la frecuencia y motivada por la redistribución de la corriente a través de los conductores por el efecto pelicular, este coeficiente se define como:

$$\Delta R(h) = \frac{[R_{CA}(h) - R_{cd}]}{[R_{CA}(1) - R_{cd}]} \quad \dots (14)$$

donde :

R_{CD} : Resistencia a corriente directa [Ω].

$R_{CA}(h)$: Resistencia medida indirectamente a corriente alterna a la frecuencia del armónico h [Ω].

$R_{CA}(1)$: Resistencia medida indirectamente a corriente alterna a la frecuencia fundamental [Ω].

Este coeficiente estará afectado en mayor o menor grado por la frecuencia en dependencia del tipo de construcción y posicionamiento de los devanados del transformador.

Finalmente la misma publicación define el **factor de incremento de pérdidas adicionales**, $K_{\Delta p}$, dependiente de la frecuencia como:

$$K_{\Delta p} = \sum_{h=1} \Delta R(h) \left[\frac{I_h}{I_n} \right]^2 \quad \dots (15)$$

donde:

I_h : Valor efectivo de la componente armónica de la corriente de carga [A].

I_n : Valor efectivo de la corriente nominal [A].

Para determinar este factor en un transformador dado, es necesario realizar una serie de ensayos de cortocircuito a baja tensión y a las frecuencias múltiplos de la fundamental para obtener las mediciones de las resistencias a estas frecuencias y determinar el $\Delta R(h)$ asociado a cada una de ellas.

Con relación a las pérdidas de núcleo no hay un pronunciamiento definitivo, sin embargo, la

Mesured Transformer Derating and Comparison with Harmonic Loss Factor (F_{HL}) Approach,⁷ plantea en sus expresiones 4 y 5 el principio de superposición para las pérdidas de vacío medidas a las distintas frecuencias y plantea la sumatoria de estas pérdidas medidas a distintas frecuencias, así como un factor de incremento de estas pérdidas ante tensiones distorsionadas como:

$$\Delta P_o = \sum_{h=1}^{h=h_{\max}} [P_o(h) - P_{on}] \quad \dots(16)$$

donde:

$P_o(h)$: Pérdidas de vacío a la frecuencia del armónico h [W].

P_{on} : Pérdidas de vacío nominales [W].

PUNTO DE VISTA DE LOS AUTORES

Las pérdidas de vacío son una función de la magnitud, frecuencia y forma de onda de la tensión de alimentación.

En estas pérdidas se consideran, las ocasionadas por la histéresis del material ante un campo magnético variable y las producidas por las corrientes parásitas que se inducen en el núcleo. Es decir:

$$P_o = P_h + P_p \quad (W) \quad \dots(17)$$

donde:

P_o : Pérdidas de vacío [W].

P_h : Pérdidas por histéresis [W].

P_p : Pérdidas por corrientes parásitas en el núcleo [W].

Las pérdidas totales por histéresis en un volumen de material V_m , en el que la inducción magnética varíe cíclicamente con una frecuencia de f Hz, se puede expresar por la siguiente expresión empírica.

$$P_h = K_h V_m f B^n \quad (W) \quad \dots(18)$$

donde:

f : Frecuencia (Hz).

B : Densidad de flujo máxima (T).

V_m : Volumen del material (m³).

K_h y n : Valores que dependen del material.

Las pérdidas por corrientes parásitas en el núcleo varían con el cuadrado del valor efectivo de la tensión de excitación y son sustancialmente independientes de la forma de onda de esta.⁸

Dichas pérdidas originadas por corrientes en el material magnético y estas corrientes están producidas por fuerzas electromotrices inducidas por las variaciones del flujo.

El efecto de estas corrientes es desmagnetizante y de apantallamiento o blindaje al flujo, dando como resultado una inducción magnética menor en la región central del volumen del material magnético que en su superficie.

Otra manera de describir este efecto, es decir, que el flujo total tiende a concentrarse hacia la superficie del material. Esto se conoce como efecto pelicular o cortical y es más pronunciado mientras mayor sea la frecuencia del campo magnético.

En un volumen de material laminado, las pérdidas por corrientes parásitas se pueden determinar por:

$$P_p = K_p f^2 \tau^2 B^2 V_m \quad (W) \quad \dots(19)$$

donde

$$K_p = \pi^2/6 \rho$$

ρ : Resistividad del material (ohm-metros).

f : Frecuencia (Hz).

τ : Espesor de la lámina (m).

B : Densidad de flujo máxima (T).

V_m : Volumen del material (m³).

Como se sabe, de forma experimental o a partir de la característica de inducción magnética de los transformadores se pueden determinar los valores de K_h , K_p y n y obtener, siempre que se quiera, las pérdidas de vacío separadas en histéresis y por corrientes parásitas.

Además de esto, si se tiene en cuenta que la característica de pérdidas específicas del acero electrotécnico conserva su "casi" linealidad aún después de la rodilla de la curva de magnetización, se puede aplicar para todo fin práctico, el "Principio de superposición" para las pérdidas, y hacer:

$$P_h(h) = K_h V_m f(h) B(h)^n \quad (W) \quad \dots(20)$$

$$P_p(h) = K_p V_m f^2 B(h)^2 f(h)^2 \quad (W) \quad \dots(21)$$

$$P_{ha} = \sum_{h=1}^{h=h_{\max}} P_h(h) \quad [W] \quad \dots(22)$$

$$P_{pa} = \sum_{h=1}^{h=h_{\max}} P_p(h) \quad [W] \quad \dots(23)$$

donde:

$P_h(h)$: Pérdidas por histéresis de la componente armónica de la tensión no sinusoidal [W].

$P_p(h)$: Pérdidas por corrientes parásitas de la componente armónica de la tensión no sinusoidal [W].

$f(h)$: Frecuencia de la componente armónica de la tensión [Hz].

$B(h)$: Densidad de flujo máxima de la componente armónica de la tensión [T].

P_{ha} : Pérdidas totales por histéresis con tensión no sinusoidal [W].

P_{pa} : Pérdidas totales por corrientes parásitas con tensión no sinusoidal [W].

Para todo esto es necesario realizar la caracterización de la forma de onda de la tensión de alimentación, es decir, si para una tensión de alimentación que varíe sinusoidalmente se puede plantear:

$$B_{(h)} = \frac{U_{(h)} \cdot 10^4}{4,44 \cdot f(h) \cdot S_n \cdot N} \quad [T] \quad \dots (24)$$

donde:

$U_{(h)}$: Valor efectivo de la componente armónica de la tensión [V].

S_n : Sección neta transversal del núcleo [cm²].

N : Número de vueltas del transformador.

Entonces, una vez que se obtenga la descomposición por Fourier de la onda de tensión se podrán conocer los valores de $U(h)$, $f(h)$, $B(h)$, $P_h(h)$, $P_p(h)$, P_{ha} y P_{pa} y calcular entonces:

$$P_{oa} = P_{ha} + P_{pa} \quad (W) \quad \dots (25)$$

donde :

P_{oa} : Pérdidas de vacío para tensión no sinusoidal [W].

CONCLUSIONES

En realidad la bibliografía consultada aborda este tema, fundamentalmente desde el punto de vista de la corriente no sinusoidal y solamente una publicación menciona el problema de los armónicos en la tensión.

Los autores consideran que antes que aplicar factores de "derrateo", sería mejor determinar la verdadera capacidad a que quedaría reducido un transformador, calculando el incremento de sus pérdidas y determinando las temperaturas que alcanzará en el aceite y en el punto más caliente para las condiciones de tensión y carga a que estaría expuesto, de esta forma, se puede predecir si el equipo podrá o no soportar el régimen de trabajo a que estará sometido.

La *IEEE. C57.110-1998*, en sus propuestas no toma en cuenta el incremento de las pérdidas en el núcleo

ante formas de onda no sinusoidales.

El factor K de la Underwriter Laboratory no tiene en cuenta el incremento de las pérdidas adicionales fuera del devanado ni el incremento de las pérdidas en el núcleo.

En estos momentos, este trabajo se encuentra en la etapa experimental, tratando de verificar los elementos que en teoría se han vertido y fundamentalmente, la aplicabilidad del **principio de superposición** para las pérdidas magnéticas.

REFERENCIAS

1. **Makarov, S. N. and A. E. Emanuel:** *Corrected Harmonic Loss Factor for Transformers Supplying Nonsinusoidal Loads Currents*, Worcester, MA. 01609, USA, 2002.
2. **IEEE. C57.110-1998.** *Recommended Practice for Establishing Transformer Capability when Supplying Nonsinusoidal Load Current*, New York, USA, 1999.
3. Underwriter's Laboratory, 1561 - 1994.
4. Underwriter's Laboratory, 1562 - 1994.
5. British Standard. 7821, London, GB, 1998.
6. **Driesen, J. et. al.:** "Practical Method to Determine Additional Load Losses due to Harmonic Currents in Transformers with Wire and Foil Windings", *IEEE Transactions on Power Delivery*. Vol 15, No.1. January, 2000.
7. **Yildirim, D. and E. F. Fuchs:** "Mesured Transformer Derating and Comparison with Harmonic Loss Factor (FHL) Approach", *IEEE Transactions on Power Delivery*. Vol 15, No.1, January, 2000.
8. **ANSI/IEEE. Std. C57.12.00.1993.** *IEEE Standard General Requirements for Liquid Immersed Distribution, Power, and Regulating Transformers*, New York, USA. 1994.

AUTORES

Orestes Hernández Areu

Ingeniero Electricista, Doctor en Ciencias Técnicas, Centro de Investigaciones y Pruebas Electroenergéticas (CIPEL), Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría, Cujae, Ciudad de La Habana, Cuba

e-mail: orestesh@electrica.cujae.edu.cu

José G. Sánchez Glean

Ingeniero Agroindustrial y Electricista CIPEL, Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría, Cujae, Ciudad de La Habana, Cuba

e-mail: jguillermo@electrica.cujae.edu.cu

Reinel Valido Estévez

Ingeniero Electricista, Aeropuerto Internacional José Martí, Ciudad de La Habana, Cuba

e-mail: valido@hav.ecasa.avianet.cu