

Efecto de las corrientes armónicas en los transformadores monofásicos

Gloria Edilma Bernal Tobón, gledbeto@geo.net.co, Alexandra María Gutiérrez Correa, alexamgc@yahoo.net.co,
Miguel Osorio Pardo, mopardo@geo.net.co
Grupo GITBC Instituto Tecnológico Pascual Bravo

Resumen

El creciente uso de cargas no lineales ocasiona la propagación de armónicas, especialmente en los sistemas de distribución y en las instalaciones internas de los usuarios. Esta propagación de corrientes armónicas conlleva al aumento de las pérdidas de los transformadores conectados al sistema, aumentando su temperatura de trabajo en condiciones nominales, lo que ocasiona la reducción de su vida útil.

En este artículo se presentan dos métodos propuestos por la IEEE para repotenciar los transformadores que alimenten cargas no lineales, de forma que funcionen en condiciones nominales a su temperatura normal de trabajo. Además se presentan los criterios de clasificación que hacen Underwriter Laboratories de Estados Unidos (UL) y la British Standard (BS) de Europa, para transformadores destinados a alimentar cargas no lineales.

Palabras clave: Corrientes armónicas, pérdidas, factor K

Abstract

The increasing use of electrical not linear charges in the facilities causes the spread of harmonic specially in the distribution systems of energy and in the facilities of the usuarios. This spread of harmonic currents brings the increase of the temperature of work to normal conditions of the transformers reducing his useful life and increasing the losses of the system.

In this article they present two methods proposed by the IEEE to re-promote the transformers that feed electrical not linear charges so that they work in nominal conditions to his normal temperature of work. Besides they present the criteria of classification that do Underwriter Laboratories of The United States (UL) and the British Standard (BS) of Europe for transformers destined to feed electrical not linear charges

I. INTRODUCCIÓN

La proliferación de armónicos en el sistema interconectado colombiano debido al creciente uso de cargas no lineales está ocasionando problemas tanto en las redes de distribución como en las redes internas de los usuarios. Las políticas actuales del país resaltan la importancia de la calidad de la energía y la reducción de pérdidas en el sistema.

El efecto de las corrientes armónicas sobre un transformador que alimenta cargas no lineales es su aumento de pérdidas, lo cual produce un aumento de la temperatura del transformador cuando trabaja en condiciones nominales conllevando a la reducción de su vida útil o, en algunos casos, a la falla del transformador.

Este artículo comienza por definir en forma general la distorsión armónica, sus causas y sus efectos en diversos elementos del sistema eléctrico. Seguidamente se hace un análisis de los efectos de la distorsión armónica de corriente en los transformadores, a continuación se presentan los métodos propuestos por la ANSI/IEEE para repotenciar transformadores que alimentan cargas no lineales y la relación que estos tienen con la clasificación del transformador tipo K realizada por Underwriter Laboratories de Estados Unidos (UL) y la British Standard de Europa.

II. CARGAS NO LINEALES Y DISTORSIÓN ARMÓNICA

La contaminación armónica no es más que la distorsión de la onda de voltaje o de corriente sinusoidal pura debida a algunas maniobras del sistema o a ciertas cargas que producen en su funcionamiento normal repetidas conexiones y desconexiones. A las cargas que producen estos cortes instantáneos repetitivos se les conoce con el nombre de Cargas No Lineales.

Iniciando en las centrales de generación de energía eléctrica, las empresas suministran al usuario final ondas de voltaje y de corriente senoidales, las cuales pueden contener un bajo nivel de armónicos producidos en la misma central o inclusive en el proceso de transmisión y distribución por las maniobras propias del sistema.

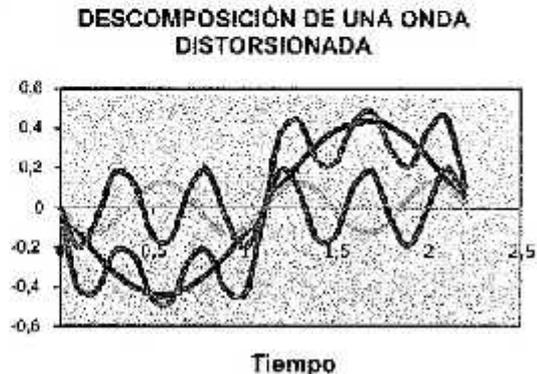
A continuación, los usuarios reciben estas ondas de voltaje y de corriente para alimentar sus cargas; algunas de ellas no lineales, produciendo distorsión en la onda senoidal de voltaje o de corriente. Algunas de las cargas no lineales más comunes se citan a continuación:

- El control de velocidad de grandes motores de inducción y motores de corriente directa
- Los hornos de arco
- Los trenes eléctricos
- Los grandes rectificadores
- Los equipos con tiristores para controlar la iluminación, calefacción y variación de velocidad de electrodomésticos.
- Los puentes rectificadores de seis pulsos, fabricados con diodos o tiristores, para suministrar energía a cargadores de baterías, soldadores y controles de velocidad de electrodomésticos.
- Las fuentes controladas para microcomputadores, VHS y televisores.

Aplicando la teoría de las series de Fourier, una onda periódica de frecuencia f puede ser expresada como la suma de varias ondas senoidales cuya frecuencia es un múltiplo de la frecuencia fundamental f . Así, una onda de 60 ciclos que ha sido deformada podrá ser expresada como la suma de la onda de 60 ciclos más otras ondas senoidales de frecuencias múltiplos de 60, tales como 120, 180, 240, 300 ciclos, etc. El armónico se denomina por el múltiplo de la frecuencia fundamental, así el tercer armónico corresponderá a la onda senoidal de 180 ciclos que resulte de la descomposición por Fourier de la onda deformada.

Para ilustrar lo anterior, en la figura 1 se presenta una onda senoidal deformada y su descomposición en series de Fourier. En esta gráfica debe notarse que la onda azul, llamada la fundamental, tiene la misma frecuencia de la original deformada (Roja), la onda amarilla tiene una frecuencia tres veces mayor que la azul (Tercer armónico) y la onda verde tiene una frecuencia cinco veces mayor que la azul (Quinto armónico).

Figura 1. Onda distorsionada con el tercer y quinto armónico



En la literatura común es poco lo que se encuentra sobre la caracterización de armónicos de diversas cargas no lineales. En la tabla 1 se presenta la caracterización hasta el armónico 15 de algunas cargas no lineales dadas en la revista Avance Eléctrico (AVA) de Argentina. Los valores dados en la tabla son porcentuales con respecto a la onda fundamental, la cual se denomina el armónico 1 y se caracteriza por el 100%.

Tabla 1. Caracterización armónica de algunas cargas comunes

Tipo de carga	1	3	5	7	9	11	13	15
Rectificadores de 6 pulsos	100	-	17	11	-	5	3	-
Rectificadores de 12 pulsos	100	-	3	2	-	5	3	-
Rectificadores de 18 pulsos	100	-	3	2	-	1	0,5	-
Rectificadores de 24 pulsos	100	-	3	2	-	1	0,5	-
Computadores	100	56	33	11	5	4	2	1
Equipo eléctrico en general	100	18	15	8	3	2	1	0,5
Oficinas con PCs	100	51	28	9	8	4	2	2
Variadores de velocidad	100	9	65	41	9	8	8	2

Tornado de AVA

Otro aspecto importante de notar en la tabla 1 es la no presencia de las componentes armónicas pares, ello se debe a que en la caracterización de cargas no lineales, los armónicos pares son despreciables con respecto a los impares, lo cual se mostrará en un artículo posterior con la caracterización de algunas cargas específicas.

Los valores de la tabla 1 son un ejemplo del contenido armónico de algunas cargas individuales, sin embargo, Jesús Sagredo [SAG] afirma que la conexión de diferentes cargas no lineales a un mismo sistema lo irá a contaminar con un contenido armónico que no corresponde a la suma aritmética de los armónicos individuales de cada una de las cargas, ya que de acuerdo a su forma de conexión, algunos contenidos armónicos se reducirán mientras otros podrán aumentarse². Por consiguiente si se desea conocer las componentes armónicas de una instalación específica es necesario tomarlas con un analizador. Estos equipos además de registrar la onda original de corriente y voltaje entregan el espectro armónico de las ondas, es decir, la magnitud de las componentes armónicas dadas en porcentaje de la fundamental, tal como los ejemplos registrados en la tabla 1.

Con el fin de calificar el grado de distorsión armónica de una red o instalación eléctrica, las normas internacionales han definido los "índices de distorsión armónica" total e individual. Dichos índices permiten a las empresas controlar el grado de distorsión que generan los usuarios cuando alimentan cargas no lineales; y cuando se sobrepasan los valores límite preestablecidos se deben tomar medidas correctivas, tales como instalar filtros.

Los índices de distorsión armónica se expresan matemáticamente mediante las siguientes expresiones:

$$THD = \frac{100}{A_f} \sqrt{\sum_{n=2}^{n_{max}} (A_n)^2}$$

Donde:

- THD: Distorsión armónica total (de voltaje o de corriente), [%]
- A_n : Amplitud de la onda armónica (de voltaje o de corriente) de orden n , [V] ó [A].

- A_f : Magnitud de la onda (de voltaje o de corriente) a la frecuencia fundamental (60 Hz), [V] ó [A]
- n : Orden de cada armónico presente
- n_{max} : Orden del mayor armónico encontrado en la onda

Y

$$D = \frac{100 \cdot A_n}{A_f}$$

Donde:

- D: Distorsión armónica individual (de voltaje o de corriente), [%]

No es objeto de este artículo las normas sobre límites de distorsión armónicas, se sugiere consultar la norma ANSI/IEEE-519 92.

III. EFECTOS DE LOS ARMÓNICOS EN EL SISTEMA ELÉCTRICO

A medida que en un sistema va aumentando la conexión de cargas no lineales se comienzan a notar calentamiento en los transformadores y en los neutros, disparos falsos de dispositivos de protección contra sobrecorriente y en los tiristores usados en equipos convertidores, fallas continuas en los bancos de condensadores usados para corregir el factor de potencia, inducción de ruidos en líneas de comunicación, etc. Todo ello ocurre a pesar de que aparentemente no se haya sobrepasado la potencia de diseño del sistema.

Normalmente no puede conocerse la causa de los efectos mencionados si no se hace un estudio de armónicos en el sistema, porque el primer problema que se tiene es que cuando empieza a presentarse la distorsión armónica las mediciones que se hacen de voltaje y de corriente con los equipos de medición tradicional son irreales debido a que estos equipos tradicionales miden solamente el valor RMS de la onda fundamental a 60 Hz y no dan indicación de la existencia de otras componentes en la onda de voltaje o de corriente. Así por ejemplo, se puede medir por una línea un valor de 100 A pero el valor real de la corriente que fluye por la línea puede ser hasta de 150A, o incluso mayor. Los otros 50 A no mostrados por el equipo de medición son debidos a la distorsión armónica y deberían tomarse como la suma del valor RMS de las componentes armónicas de la corriente,

² [SAG.] Jesús Sagredo González, "Influencia de cargas no lineales en transformadores de distribución", Web www2.ubu.es/ingelec/ingelec/sagredoj.html, p. 19.

pero deben ser medidos con instrumentos de medición especialmente diseñados para este fin.

En este orden de ideas, lo recomendable en un sistema es que cuando se vayan aumentando las cargas no lineales conectadas a él, debe hacerse un estudio de armónicos para corregir los efectos de estas cargas, bien sea colocando filtros de armónicos o rediseñando los equipos o partes del sistema que se están viendo afectados por la contaminación armónica.

El daño de los bancos de condensadores usados para corregir factor de potencia se debe a que estos entran en resonancia con la frecuencia de alguna de las componentes armónicas que se ha generado en el sistema. Además, cuando los armónicos deforman el voltaje en el banco de condensadores, el voltaje pico puede llegar a ser suficientemente alto como para ocasionar una descarga parcial, o efecto corona, dentro del dieléctrico del condensador lo que puede producir eventualmente un cortocircuito entre los bornes del condensador y la carcasa haciendo fallar el condensador. Por último, las altas corrientes armónicas ocasionan el disparo de fusibles en bancos de condensadores con la consecuente pérdida de la fuente reactiva en el sistema lo que conllevará a producir otros problemas adicionales.

IV. EFECTO DE LOS ARMÓNICOS SOBRE LOS TRANSFORMADORES

Los transformadores convencionales son diseñados para alimentar cargas lineales, es decir, para operar a una frecuencia de 60 Hz, pero en realidad en muchas ocasiones son conectados a un sistema que alimenta cargas no lineales, cuya utilización se hace más intensiva con el correr del tiempo, obligándolos a soportar mayor circulación de corriente por sus devanados (la corriente a la frecuencia fundamental más las corrientes armónicas).

En los transformadores, las componentes armónicas de corriente ocasionan calentamiento en los devanados por encima de las temperaturas permitidas por el diseño del transformador, aún cuando no se haya sobrepasado la capacidad de carga del transformador e incluso cuando trabaja por debajo de su carga nominal. Este sobrecalentamiento de los devanados deteriora los aislamientos reduciendo la vida útil del transformador o incluso puede llegar a hacerlo fallar. Además, si la distorsión armónica producida

por la carga tiene componentes pares, crea componentes DC que saturan el núcleo volviéndolo ruidoso, o si esta componente supera el valor de la corriente de vacío a voltaje nominal, puede llegar a reducir la capacidad del transformador.

Cuando los sistemas son trifásicos, aún en condiciones de carga balanceada, los armónicos múltiplos de tres se suman en el neutro ocasionando mayores flujos de corriente por éste, para lo cual se recomienda que el neutro de los sistemas se diseñe en un calibre mayor al calibre usado para las líneas. A este respecto las recomendaciones varían, siendo la más conservadora aquella que indica que el neutro debe diseñarse al doble del calibre de cualquiera de las líneas de alimentación. Además de lo anterior las corrientes armónicas influyen sobre los transformadores trifásicos con conexión triángulo estrella debido a que las corrientes del neutro se reflejan en el triángulo por donde circulan elevando la densidad del flujo en el núcleo.

Las pérdidas totales de un transformador corresponden a la suma de las pérdidas cuando el transformador trabaja en vacío P_0 más las pérdidas cuando el transformador opera bajo carga P_{Lz} , siendo estas últimas la sumatoria de las pérdidas por efecto Joule P_j más las pérdidas por corrientes de Eddy P_e más las pérdidas adicionales P_{cor} originadas en el tanque, sujeciones y otras partes del hierro.

De acuerdo con Alexis Tejada y Armando Llamas [TEJ], el aumento de las pérdidas en vacío debido a la presencia de armónicos en la red que lo alimenta pueden ser despreciadas debido a que las corrientes armónicas sin carga son mucho menores que las corrientes con carga.

Las pérdidas por efecto Joule aumentan con la presencia de corrientes armónicas, en proporción a I^2R , debido al efecto piel, el cual se va haciendo mayor a medida que aumenta la frecuencia de las corrientes que circulan por sus devanados. R representa la resistencia de la bobina.

Las pérdidas por corrientes de Eddy a 60 Hz son proporcionales al cuadrado de la corriente de carga y al cuadrado de la frecuencia. En presencia de armónicos, estas pérdidas se ven aumentadas por un factor que corresponde al valor de la sumatoria indicada en la ecuación 5 [TEJ].

$$P_e = P_{ef} \sum_{n=2}^{n_{max}} \left(\frac{I_n}{I_1} \right)^2 n^2 \quad \text{Eq. (1)}$$

donde:

- P_e : Pérdidas totales de Eddy originadas por la corriente fundamental más las corrientes armónicas, (W)
- P_{ef} : Pérdidas de Eddy originadas por la corriente fundamental, (W)

Las pérdidas adicionales aumentan la temperatura de la estructura del transformador y según el transformador pueden aumentar la temperatura de sus devanados. En presencia de armónicos, al igual que las pérdidas de Eddy, estas pérdidas se ven aumentadas por un factor, que corresponde al valor de la sumatoria indicada en la ecuación 6 [TEI ___], el cual es proporcional al cuadrado de la corriente y a la frecuencia.

$$P_{ad} = P_{adf} \sum_{n=2}^{n_{max}} \left(\frac{I_n}{I_1} \right)^2 n \quad \text{Eq. (2)}$$

donde:

- P_{ad} : Pérdidas totales adicionales originadas por la corriente fundamental más las corrientes armónicas, (W)
- P_{adf} : Pérdidas adicionales originadas por la corriente fundamental, (W)

En suma, si las pérdidas del transformador aumentan al alimentar una carga no lineal se aumenta su temperatura y no puede continuar alimentando una carga equivalente a su potencia nominal sin que se afecten sus aislantes por este aumento; por consiguiente es necesario calcular la nueva carga que el transformador puede alimentar sin superar sus límites de calentamiento; a este proceso de cálculo se le conoce con el nombre "desclasificación de transformadores" y se describirá más adelante.

V. EL FACTOR K

En 1989 se comenzó en Estados Unidos a cuantificar el calentamiento producido en los transformadores por las corrientes armónicas producidas por cargas no lineales. Underwriter Laboratories (UL) definió que en estas circunstancias un transformador no debe ser cargado a su potencia

nominal o debe ser reemplazado por uno de mayor potencia. El criterio consiste en que la potencia máxima de la carga no lineal que alimenta un transformador debe ser aquella que produce la misma temperatura del transformador cuando alimenta una carga lineal de su potencia nominal. **Con este criterio se definió el factor K** como aquel valor numérico que represente los posibles efectos de calentamiento de una carga no lineal sobre el transformador. De esta manera, la potencia equivalente de un transformador es la correspondiente a la sinusoidal que provoque las mismas pérdidas que las producidas con la corriente no senoidal aplicada.

En 1992 Underwriter Laboratories (UL) revisó sus criterios UL 1561 y UL 1562 e hizo algunos cambios basados en la norma ANSI/IEEE C57.110 la cual define dos métodos para establecer la capacidad de los transformadores cuando la distorsión de la corriente de carga excede el 5%. En este sentido, la UL define el cálculo del factor K a partir de la Eq. 5.

$$K = \sum_{n=1}^{n_{max}} I_n^2 \cdot n^2 \quad \text{Eq. (3)}$$

En esta expresión es claro que el factor K depende de la distorsión de corriente armónica que producen las cargas no lineales conectadas al transformador.

Con el mismo objetivo, la norma europea BS-7821 establece una expresión matemática para el cálculo del factor K, la cual se presenta en la Eq. 6.

$$K = \sqrt{1 + \frac{e}{1+e} \left(\frac{I_1}{I} \right)^2 \cdot \sum_{n=2}^{n_{max}} n^2 \left(\frac{I_n}{I_1} \right)^2} \quad \text{Eq. (4)}$$

Donde:

- e: Relación entre las pérdidas de Eddy a la frecuencia fundamental y las pérdidas resistivas, ambas a la temperatura de referencia. Este valor lo suministra el fabricante. Típicamente asciende a 0.3
- I: Corriente no sinusoidal incluyendo todos los armónicos, (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, ó 1.5 si los conductores son de lámina en baja tensión.

Independientemente de la fórmula matemática seleccionada para el cálculo del factor K, se debe tener en cuenta que la captura de la onda de corriente debe ser efectuada a diferentes horas del día y considerando la jornada de trabajo de las diferentes cargas no lineales de la instalación. En otras palabras, se debe calcular un factor por cada onda capturada y seleccionar el mayor factor K calculado.

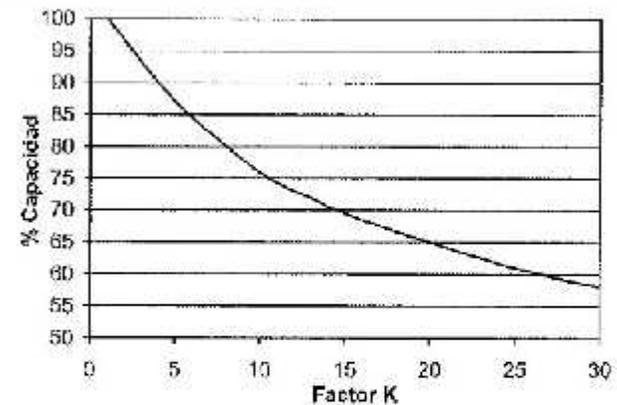
Una vez ha sido determinado factor K para una carga específica, el transformador requerido se clasifica con un factor K igual o superior al encontrado con la Eq. 5 o la Eq.6, según sea la norma seleccionada. La UI. ha estandarizado los transformadores que alimentan cargas no lineales a transformadores con factores K 4, 9, 13, 20, 30, 40 y 50, y los ha denominado transformadores tipo K.

Los transformadores tipo K presentan algunas diferencias constructivas con relación a los transformadores convencionales [SAG], entre ellas se pueden citar:

- El núcleo de los transformadores tipo K se diseña para una menor densidad de flujo, es decir, menor cantidad de material pero de mejor calidad magnética. En el caso de no mejorar la capacidad magnética del núcleo, se debe aumentar su tamaño, especialmente si el contenido armónico presenta niveles DC considerables.
- Se requiere reducir el calentamiento del secundario del transformador tipo K debido al efecto piel, empleando conductores en paralelo aislados entre sí, conductores tipo fleje, u otras técnicas de interpolación y transposición de conductores.
- Sobredimensionar los conductores del primario y del neutro del transformador tipo K. Si el transformador es monofásico, también se debe sobredimensionar el secundario, aún cuando se recomiende utilizar conductores en paralelo para reducir el efecto Skin de los armónicos de mayor orden.
- Diseñar el transformador tipo K con capacidades térmicas especiales, a menos que se sobredimensionen el primario y el secundario.

En general, el factor K reduce la capacidad de carga de un transformador convencional existente que pasa a alimentar cargas no lineales, tal como lo muestra la Figura 2.

Figura 2. El factor K Vs el porcentaje de carga del transformador



Tomado de [SAG]

VI. CONCLUSIONES

- El problema que los armónicos causan en los transformadores que alimentan cargas no lineales radica en las pérdidas adicionales que se producen en los devanados debidas a las corrientes armónicas ocasionando un sobrecalentamiento de los bobinados del transformador que pueden afectar su vida útil o incluso fallarlo.
- El análisis y el diseño de transformadores que van a alimentar cargas no lineales parte del estudio del total de pérdidas que aparecen en sus devanados. Los efectos de las corrientes armónicas sobre el flujo magnético del núcleo no son de mucha trascendencia a menos que se presente una componente de corriente continua considerable, lo cual no es muy común dado que estas se asocian a los armónicos de orden par.
- Es necesario que en aquellos puntos de las redes de distribución donde se presentan fallas continuas de los transformadores por sobrecalentamiento se hagan estudios de armónicos que permitan la repotenciación o el cambio del transformador. Con esto se obtienen dos beneficios: el primero, la reducción del número de fallas de los transformadores y la segunda, la reducción de pérdidas de energía cuyo costo asumen normalmente las empresas distribuidoras de energía.
- Finalmente los estudios sobre los armónicos, en nuestro país son todavía incipientes. Si se desean implementar políticas de calidad y ahorro de energía, será necesario profundizar sobre este tema, especialmente en la caracterización de cargas no lineales y el aumento de pérdidas de energía debidas a las corrientes armónicas.

Referencias

1. ANSI / IEEE C57.110 – 1986, IEEE Recommended Practice for Establishing Transformer Capability When Supplying Nonsinusoidal Load Currents
2. ANSI / IEEE C57.12.90 – 1987, IEEE Standard Test Code for Liquid-Immersed Distribution, Power, and Regulating Transformers and IEEE Guide for Short-Circuit Testing of Distribution and Power Transformers
3. ANS / IEEE C57.12.91 – 1979, IEEE Standard Test Code for Dry-Type Distribution and Power Transformers
4. Cutler Hammer, Transformadores Tipo K. Trifásicos, Tipo KT, 60 Hz, para cargas no lineales. 1999.
5. DE A Corto Thomas, Armónicos IEEE 519. Energice Tecnologías S. A. Traducción de Ing Jaime Vázquez Parada. Marzo 1998
6. L. I. Eguzuz, J. C. Lavandero, Mañana y P. Sánchez. Depto. De Ingeniería Eléctrica y Energética, Universidad de Cantabria. www.energuia.com
7. [ANSI / IEEE-C57.110 98] "IEEE Recommended practice for establishing transformer capability when supplying nonsinusoidal load currents", 1998.
8. [AVA] Revista Avance eléctrico - CADIME, "Criterios para el dimensionamiento de conductores eléctricos", Web www.electroindustria.com/aplicacion.asp?inf_id=586.
9. [BS-7821] British Standard, part 4, p. 3.
10. [CDA] Copper Development association, "K rating of transformers supplying harmonic rich loads", www.cda.org.uk. p. 32.
11. [KEL 99] Artur W. Kelley, Steven W. Edwards, Jason O. Rhode and Mesut E. Baran, "transformer derating for harmonic currents: A wide-band measurement approach for energized transformers", IEEE transactions on industry applications, vol 35, No. 6, November/December 1999, p. 8.
12. [SAG] Jesús Sagredo González, "Influencia de cargas no lineales en transformadores de distribución", Web www2.ubu.es/ingelec/ingelect/jsagredo.shtml, p. 19.
13. [TEJ] A. Tejada y A. Llamas, "Efectos de las armónicas en los sistemas eléctricos", first edition. Ames, Iowa: State University Press, 1973, p. 8.
14. [UL-1561 99] Underwrite Laboratories Inc, Standard for Safety, "Dry-type General Purpose and Power Transformers", 1999, p. 8.

AUTORES

- **Gloria Edilma Bernal T.** Ingeniera Electricista de la Universidad Nacional de Colombia. Medellín, 1994.
Profesora Catedrática Universidad de Antioquia en el área de Máquinas Eléctricas y Laboratorios. Profesora Investigadora Instituto Tecnológico Pascual Bravo, Medellín, desde 1998. Diplomado en metodología de la Investigación, Instituto Tecnológico Pascual Bravo, 2001. gledbeto@geo.net.co.
- **Alexandra María Gutiérrez Correa.** Ingeniera Electricista, Universidad Nacional de Colombia. 1995. Magister en "Planeamiento de sistemas de Energía Eléctrica", Universidad Federal de Santa Catarina, Brasil, 1997-1998. Especialista en "Gestión de personas en las organizaciones", Universidad Federal de Santa Catarina/Brasil, 1999. Docente investigadora, Instituto Tecnológico Pascual Bravo, 2003 a la fecha. Conferencista responsable del Primer Módulo en los Diplomados de Ahorro de Energía Eléctrica en Instalaciones Industriales, Corporación Universitaria Autónoma de Occidente, 2001. Asistente de calidad en el laboratorio de Alto Voltaje, Universidad Nacional de Colombia-Medellín, 2000.
- **Miguel Osorio Pardo.** Ingeniero Electricista de la Universidad Nacional de Bogotá en 1969. Profesor Asociado de la Universidad Nacional de Medellín facultad de Minas 1971-1997. Director de proyectos de desarrollo y de investigación en el área de máquinas eléctricas y transformadores. Profesor catedrático de la Universidad de Antioquia en el área de máquinas eléctricas y transformadores desde 1974-1994 y de 1998-2002. Profesor investigador en el Instituto Tecnológico Pascual Bravo desde 1999. Correo Electrónico micia57@hotmail.com