

EFFECTOS DE LAS ARMÓNICAS EN LOS SISTEMAS ELÉCTRICOS

A. Tejada, A. Llamas¹

Resumen: Se explican en forma general los principales efectos de las armónicas en los componentes de los sistemas eléctricos actuales. Se muestra la necesidad de conocer los mismos para llevar a cabo un diseño o adaptación de los sistemas a las condiciones cambiantes establecidas por los dispositivos no lineales.

Palabras Clave: armónicas, cargas no lineales, pérdidas, resonancia.

1. Introducción.

Las armónicas son corrientes y/o voltajes presentes en un sistema eléctrico, con una frecuencia múltiplo de la frecuencia fundamental. Así, en sistemas con frecuencia de 60 Hz y cargas monofásicas, las armónicas características son la tercera (180 Hz), quinta (300 Hz), y séptima (420 Hz) por ejemplo. Con el creciente aumento en el uso de cargas no lineales (procedentes de la electrónica de potencia), se han empezado a tener algunos problemas en las instalaciones eléctricas debido a los efectos de las componentes armónicas de corrientes y voltajes en el sistema eléctrico, que no se contemplaban anteriormente. Entre estos están el sobrecalentamiento de cables, transformadores y motores, corrientes excesivas en el neutro, fenómenos de resonancia entre los elementos del circuito [1, 2] (si se cuentan con bancos de capacitores para corrección del factor de potencia) y en general la calidad en el suministro de energía eléctrica se ha ido deteriorando [3, 4, 5] por la distorsión presente en los voltajes y corrientes.

Esta situación puede llegar a causar un funcionamiento incorrecto de muchos equipos (especialmente los menos robustos) que han sido diseñados para operar bajo condiciones normales (poca distorsión armónica). Además, se presenta un incremento en los costos de operación como resultado de algunos factores ligados a la generación de armónicas. Estos problemas han sido ampliamente analizados en la libros [3, 6, 7] y artículos, se han desarrollado equipos de medición sofisticados que permiten realizar estudios acerca de éstos y además se cuenta con prácticas recomendadas [8] para tener cierto grado de control sobre los mismos.

Se presentará un análisis de los efectos más comunes provocados por las armónicas en los sistemas eléctricos, en conjunto con una extensa bibliografía para el lector interesado en profundizar en el tema.

2. Fuentes de Armónicas

En general, cualquier tipo de carga no lineal conectada al sistema eléctrico causará distorsión armónica. A continuación se muestra una lista de ejemplos comunes de fuentes de armónicas en sistemas de potencia [9], entre las que se citan algunas cuyos efectos se pueden despreciar de manera segura en sistemas de distribución:

- a. Saturación de transformadores
- b. Corrientes de energización de transformadores

¹Ing. Alexis Tejada Peralta: Alumno de la Maestría en Ingeniería Eléctrica del Programa de Graduados en Ingeniería del ITESM Campus Monterrey, atejada@academ01.mty.itesm.mx

Dr. Armando Llamas Terrés: Profesor del Departamento de Ingeniería Eléctrica del ITESM Campus Monterrey, allamas@campus.mty.itesm.mx.

- c. Conexiones al neutro de transformadores
- d. Fuerzas magnetomotrices en máquinas rotatorias de corriente alterna
- e. Hornos de arco eléctrico
- f. Lámparas fluorescentes
- g. Fuentes reguladas por conmutación
- h. Cargadores de baterías
- i. Compensadores estáticos de VAR's
- j. Variadores de frecuencia para motores ("drives"), inversores
- k. Convertidores de estado sólido

Es importante señalar que las armónicas son una situación de estado estable, por lo que no se deben confundir con fenómenos transitorios. Aun y cuando las corrientes de energización en los transformadores son transitorios en sistemas eléctricos, también se pueden citar dentro de fuentes que producen armónicas [10] si operan en sistemas que presentan una resonancia aguda en alguna de las frecuencias de esta corriente (en su mayoría la 2^{da}, 3^{ra}, 4^{ta} y 5^{ta} armónicas). Esto causaría una distorsión en voltaje que a su vez afectará a la corriente de energización del transformador, por ende excitando aún más la frecuencia de resonancia del sistema e incrementando la distorsión en voltaje hasta niveles que pueden degradar o dañar equipo en forma instantánea o eventual.

3. Efecto de las Armónicas.

Los efectos producidos por las armónicas en los componentes de los sistemas eléctricos han sido analizados tanto para circuitos particulares como para toda una red interconectada, no obstante en algunos casos es muy difícil cuantificarlos en forma específica puesto que dependen de muchos factores. A continuación se presentará un compendio de los mismos, citando las referencias correspondientes.

a. Efecto en cables y conductores: al circular corriente directa a través de un conductor se produce calentamiento como resultado de las pérdidas por efecto Joule, I^2R , donde R es la resistencia a corriente directa del cable y la corriente esta dada por el producto de la densidad de corriente por el área transversal del conductor. A medida que aumenta la frecuencia de la corriente que transporta el cable (manteniendo su valor rms igual al valor de corriente directa) disminuye el área efectiva por donde ésta circula puesto que la densidad de corriente crece en la periferia exterior (Figura 1), lo cual se refleja como un aumento en la resistencia efectiva del conductor.

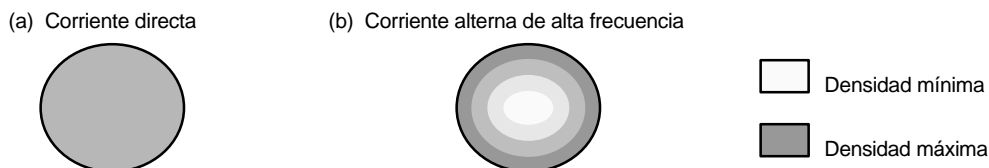


Figura 1. Densidades de corriente en un mismo conductor, (a) a corriente directa y (b) a corriente de alta frecuencia.

Por lo tanto, la resistencia a corriente alterna de un conductor es mayor que su valor a corriente directa y aumenta con la frecuencia, por ende también aumentan las pérdidas por calentamiento. A frecuencia de 60 Hz, este efecto se puede despreciar, no por que no exista, sino por que este factor se considera en la manufactura de los conductores [5]. Sin embargo con corrientes distorsionadas, las pérdidas por efecto Joule son mayores por la frecuencia de las componentes armónicas de la corriente. La Tabla 1 [5] muestra la razón entre la resistencia de alterna y la de directa producida por el efecto piel en conductores redondos, a frecuencias de 60 y 300 Hz.

Tabla 1. Ejemplo de efecto piel en conductores

Tamaño del conductor	Resistencia AC / Resistencia DC	
	60 Hz	300 Hz
300 MCM	1.01	1.21
450 MCM	1.02	1.35
600 MCM	1.03	1.50
750 MCM	1.04	1.60

b. Efecto en transformadores: la mayoría de los transformadores están diseñados para operar con corriente alterna a una frecuencia fundamental (50 ó 60 Hz), lo que implica que operando en condiciones de carga nominal y con una temperatura no mayor a la temperatura ambiente especificada, el transformador debe ser capaz de disipar el calor producido por sus pérdidas sin sobrecalentarse ni deteriorar su vida útil.

Las pérdidas en los transformadores consisten en pérdidas sin carga o de núcleo y pérdidas con carga, que incluyen las pérdidas I^2R , pérdidas por corrientes de eddy y pérdidas adicionales en el tanque, sujetadores, u otras partes de hierro. De manera individual, el efecto de las armónicas en estas pérdidas se explica a continuación:

Pérdidas sin carga o de núcleo [11]: producidas por el voltaje de excitación en el núcleo. La forma de onda de voltaje en el primario es considerada senoidal independientemente de la corriente de carga, por lo que no se considera que aumentan para corrientes de carga no senoidales. Aunque la corriente de magnetización consiste de armónicas, éstas son muy pequeñas comparadas con las de la corriente de carga, por lo que sus efectos en las pérdidas totales son mínimos.

Pérdidas I^2R : si la corriente de carga contiene componentes armónicas, entonces estas pérdidas también aumentarán por el efecto piel.

Pérdidas por corrientes de eddy [11, 12]: estas pérdidas a frecuencia fundamental son proporcionales al cuadrado de la corriente de carga y al cuadrado de la frecuencia, razón por la cual se puede tener un aumento excesivo de éstas en los devanados que conducen corrientes de carga no senoidal (y por lo tanto en también en su temperatura). Estas pérdidas se pueden expresar como:

$$P_e = P_{e,R} \sum_{h=1}^{h=h_{\max}} \left[\frac{I_h}{I_R} \right]^2 h^2 \quad (1)$$

donde:

h = armónica

I_h = corriente de la armónica h, en amperes

I_R = corriente nominal, en amperes

$P_{e,R}$ = pérdidas de eddy a corriente y frecuencia nominal

Pérdidas adicionales [11,12]: estas pérdidas aumentan la temperatura en las partes estructurales del transformador, y dependiendo del tipo de transformador contribuirán o no en la temperatura más caliente del devanado. Se considera que varían con el cuadrado de la corriente y la frecuencia, como se muestra en la ecuación (2).

$$P_{AD} = P_{AD,R} \sum_{h=1}^{h=h_{\max}} \left[\frac{I_h}{I_R} \right]^2 h \quad (2)$$

donde:

$P_{AD,R}$ = pérdidas adicionales a corriente y frecuencia nominal

Aunado a estas pérdidas, algunas cargas no lineales presentan una componente de corriente directa en la corriente de carga. Si este es el caso, esta componente aumentará las pérdidas de

núcleo ligeramente, pero incrementarán substancialmente la corriente de magnetización y el nivel de sonido audible [12], por lo que este tipo de cargas se debe evitar.

En el caso de transformadores conectados en delta - estrella (comúnmente de distribución) que suministran cargas no lineales monofásicas como pueden ser fuentes reguladas por conmutación, las armónicas "triplen" (múltiplos de 3) circularán por las fases y el neutro del lado de la estrella, pero no aparecerán en el lado de la delta (caso balanceado), ya que se quedan atrapadas en ésta [13] produciendo sobrecalentamiento de los devanados. Se debe tener especial cuidado al determinar la capacidad de corriente de estos transformadores bajo condiciones de carga no lineal puesto que es posible que los volts-amperes medidos en el lado primario sean menores que en el secundario.

Con el constante aumento de cargas no lineales, se han llevado a cabo estudios para disminuir la capacidad nominal de los transformadores ya instalados que suministran energía a este tipo de cargas; un ejemplo de este caso se puede encontrar en [12]. Además, en el caso de transformadores que operarán bajo condiciones de carga no lineal, es conveniente en lugar de sobredimensionar el transformador, utilizar un transformador con un factor K mayor a 1 [14]. Estos transformadores son aprobados por UL (Underwriter's Laboratory) para su operación bajo condiciones de carga no senoidal, puesto que operan con menores pérdidas a las frecuencias armónicas. Entre las modificaciones con respecto a los transformadores normales están [14]:

a. El tamaño del conductor primario se incrementa para soportar las corrientes armónicas "triplen" circulantes. Por la misma razón se dobla el conductor neutro.

b. Se diseña el núcleo magnético con una menor densidad de flujo normal, utilizando acero de mayor grado, y

c. Utilizando conductores secundarios aislados de menor calibre, devanados en paralelo y transpuestos para reducir el calentamiento por el efecto piel.

El factor K se puede encontrar mediante un análisis armónico de la corriente de la carga o del contenido armónico estimado de la misma. La ecuación que lo define es:

$$\text{factor K} = \sum_{h=1}^{h=h \max} [I_{h(pu)}]^2 h^2 \quad (3)$$

donde:

h = armónica

$I_{h(pu)}$ = corriente armónica en p.u. tomando como base la corriente Irms

Con el valor del factor K de la corriente de la carga, se puede escoger el transformador adecuado. La Tabla 2 muestra los valores comerciales de transformadores con factor K [7].

Tabla 2. Transformadores con factor K disponibles comercialmente.

K- 4
K- 9
K- 13
K- 20
K- 30
K- 40

En esta misma referencia se puede encontrar una lista del factor K estimado de un buen número de cargas no lineales comunes.

c. Efecto en interruptores (circuit breakers) [14]: los fusibles e interruptores termomagnéticos operan por el calentamiento producido por el valor rms de la corriente, por lo que protegen de manera efectiva a los conductores de fase y al equipo contra sobrecargas por corrientes armónicas. Por otro lado, la capacidad interruptiva no se ve afectada por las componentes armónicas en los sistemas eléctricos puesto que durante condiciones de falla, las fuentes que contribuyen a la misma son de frecuencia fundamental.

d. Efecto en las barras de neutros [14]: dado que este es el primer punto de unión de los neutros de las cargas monofásicas, en el caso balanceado, las corrientes (fundamental y armónicas) de secuencia positiva y negativa se cancelan aquí. Estas barras pueden llegar a sobrecargarse por el efecto de cancelación de las componentes armónicas de secuencia positiva y negativa entre los conductores neutros que sirven diferentes cargas.

En el caso de corrientes armónicas de secuencia cero (armónicas “triplen”), estas no se cancelarán en el neutro aun con condiciones balanceadas [13], por lo que estas barras se pueden sobrecargar por el flujo de estas corrientes. En la realidad, las barras de neutros transportan corrientes de secuencia positiva y negativa producidas por el desbalance de cargas más las armónicas “triplen” de secuencia cero generadas por éstas. Por esta razón las barras que están dimensionadas para soportar la misma corriente de fase pueden sobrecargarse fácilmente en presencia de cargas no lineales.

En el caso de que se estén alimentando cargas no lineales, es recomendable que las barras de neutros tengan una capacidad de corriente igual al doble de la de las fases.

e. Efecto en los bancos de capacitores: el principal problema que se puede tener al instalar un banco de capacitores en circuitos que alimenten cargas no lineales es la resonancia tanto serie como paralelo, como se muestra en la Figura 2. A medida que aumenta la frecuencia, la reactancia inductiva del circuito equivalente del sistema de distribución aumenta, en tanto que la reactancia capacitiva de un banco de capacitores disminuye. Existirá entonces al menos una frecuencia en la que las reactancias sean iguales, provocando la resonancia.

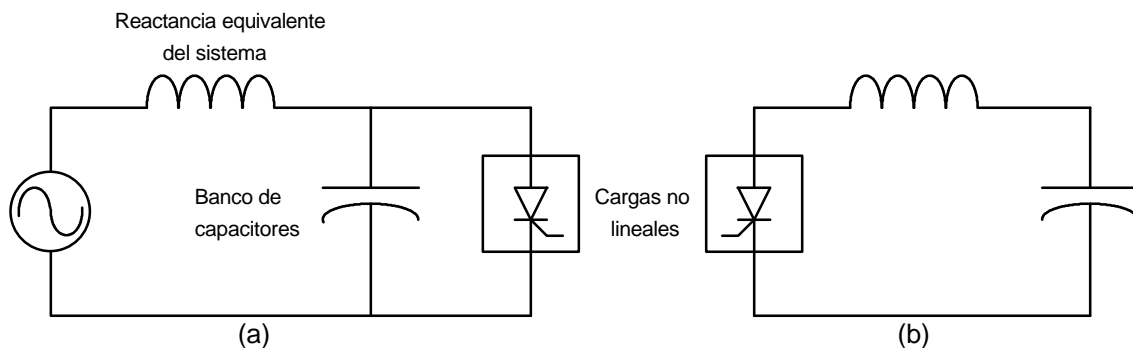


Figura 2. Circuitos que ejemplifican: (a) resonancia paralelo y (b) resonancia serie

Resonancia paralelo: la Figura 2 (a) muestra el circuito equivalente para el análisis de la resonancia paralelo en un sistema eléctrico. La carga no lineal inyecta al sistema corrientes armónicas, por lo que el efecto de dichas corrientes se puede analizar empleando el principio de superposición. De esta manera, el circuito equivalente a distintas frecuencias se puede dibujar como:

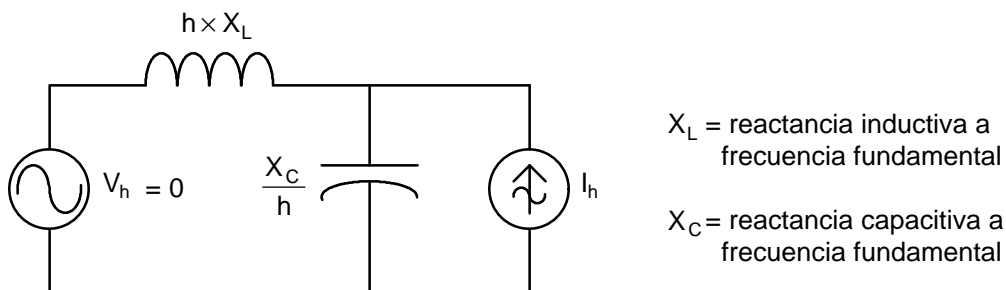


Figura 3. Circuito equivalente para el análisis del sistema a frecuencias armónicas.

En general, la fuente de voltaje V_h vale cero (corto circuito), puesto que sólo presenta voltaje a frecuencia fundamental. Entonces a frecuencias armónicas, el circuito equivalente visto por la

carga (fuente de corrientes armónicas) será una inductancia y capacitancia en paralelo, por lo que la frecuencia de resonancia se tendrá cuando:

$$f = f_1 \sqrt{\frac{X_C}{X_L}} \quad (4)$$

donde

f_1 = frecuencia fundamental

Si la carga inyecta una corriente armónica de una frecuencia igual o cercana a la frecuencia de resonancia paralelo del sistema, entonces las corrientes y voltajes experimentarán una amplificación puesto que la admitancia equivalente se acerca a cero (impedancia muy alta). Esto produce los problemas de calentamiento inherentes a las corrientes armónicas (en cables, transformadores, interruptores), la operación de fusibles, y el posible daño o envejecimiento prematuro de equipo.

Resonancia Serie: esta resulta en un circuito como el mostrado en la Figura 2 (b). En este caso la expresión matemática de la frecuencia de resonancia es la misma que muestra la ecuación (4), la diferencia es que ahora el circuito presenta una trayectoria de baja impedancia a las corrientes armónicas (casi un corto circuito). Esta resonancia causará problemas similares a los que se tienen en el caso de la resonancia paralelo.

Una forma de minimizar los problemas de resonancia por la instalación de bancos de capacitores consiste en distribuir los mismos en diferentes puntos del sistema, para alejar la frecuencia de resonancia a valores más altos. También es importante considerar que los capacitores se deben conectar en delta y/o estrella no aterrizada (para evitar atraer las armónicas “triplen”) en sistemas menores a 69 kV [14].

f. Efecto en los motores de inducción: fundamentalmente, las armónicas producen los siguientes efectos en las máquinas de corriente alterna: un aumento en sus pérdidas y la disminución en el torque generado. Este ha sido el tema de análisis de muchos artículos [15, 16, 17, 18, 19] por su importancia en la industria y a continuación se mostrará un estudio simplificado de estos efectos en base a las referencias citadas.

Pérdidas en los motores de inducción: si el voltaje que se alimenta a un motor de inducción contiene componentes armónicas, entonces se incrementarán sus pérdidas I^2R en el rotor y estator, pérdidas de núcleo (eddy e histéresis) y pérdidas adicionales, en tanto que las pérdidas de fricción y ventilación no son afectadas por las armónicas. En forma más detallada, tenemos el siguiente análisis de las pérdidas.

1. Pérdidas I^2R en el estator: según IEEE [20], las pérdidas en el estator son determinadas utilizando la resistencia a corriente directa de la máquina, corregida a la temperatura especificada. Al operar la máquina de inducción con voltajes con contenido armónico no sólo aumentan estas pérdidas por el efecto piel que incrementa el valor de la resistencia efectiva, sino que también aumenta el valor de la corriente de magnetización, incrementándose aún más las pérdidas I^2R .

2. Pérdidas I^2R en el rotor: éstas aumentan de manera más significativa que las anteriores, por el diseño de la jaula en los motores de inducción que se basa en el aprovechamiento del efecto piel para el arranque. Esta resistencia aumenta en forma proporcional a la raíz cuadrada de la frecuencia y por ende las pérdidas.

3. Pérdidas de núcleo: estas pérdidas son función de la densidad de flujo en la máquina. Éstas aumentan con excitación de voltaje no senoidal puesto que se tienen densidades de flujo pico más elevadas, sin embargo su aumento es aún menor que el de las pérdidas mencionadas anteriormente e incluso son más difíciles de cuantificar.

4. Pérdidas adicionales: son muy difíciles de cuantificar aun bajo condiciones de voltaje senoidal. Al aplicar voltaje no senoidal, éstas aumentan en forma particular para cada máquina.

Torque en el motor de inducción: las armónicas de secuencia positiva producen en el motor de inducción un torque en el mismo sentido de la dirección de rotación, en tanto que las de

secuencia negativa tienen el efecto opuesto. En caso de que se tenga conectado el neutro, el par producido por las armónicas "triplen" es igual a cero. Dependiendo del contenido armónico del voltaje aplicado, el par promedio de operación puede verse disminuido considerablemente [15], sin embargo en la mayoría de los casos el efecto producido por las armónicas de secuencia negativa se cancela con el efecto de las de secuencia positiva, por lo que su efecto neto en el par promedio puede despreciarse.

La interacción de las corrientes armónicas del rotor con el flujo en el entrehierro de otra armónica resultan torques pulsantes en los motores, los que pueden afectar la calidad del producto donde las cargas de los motores son sensibles a estas variaciones [8]. Estos torques pulsantes también pueden excitar una frecuencia de resonancia mecánica lo que resultaría en oscilaciones que pueden causar fatiga de la flecha y otras partes mecánicas conectadas. Por lo general la magnitud de estos torques es generalmente pequeña y su valor promedio es cero [16].

g. Efectos en otros equipos [8, 21]: equipos electrónicos sensibles son susceptibles a operación incorrecta a causa de las armónicas. En algunos casos estos equipos dependen de la determinación precisa del cruce por cero del voltaje u otros aspectos de la forma de onda del mismo, por lo que condiciones de distorsión pueden afectar su operación adecuada.

En lo que respecta a equipo de medición e instrumentación éstos son afectados por las componentes armónicas, principalmente si se tienen condiciones de resonancia que causen altos voltajes armónicos en los circuitos. Para el caso de medidores se pueden tener errores positivos o negativos, dependiendo del tipo de medidor y de las armónicas involucradas.

4. Conclusiones.

Se han presentado los efectos más importantes de las armónicas en las componentes principales de los sistemas eléctricos. En algunas ocasiones estos efectos son extremadamente complicados de evaluar, aunado al hecho de que el equipo de medición necesario para cuantificarlos es muy costoso. Sin embargo el conocimiento de los aspectos generales de sus causas y consecuencias nos ayudan a prevenir y tomar las medidas tendientes a minimizar sus efectos en aras de una operación efectiva y segura de los sistemas eléctricos actuales.

5. Referencias Bibliográficas.

[1] G. Lemieux, "Power System Harmonic Resonance - A Documented Case," IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 26, NO. 3, pp. 483-488, May./June, 1990.

[2] E. J. Currence, J. E. Plizga and H. N. Nelson, "Harmonic Resonance at a Medium-Sized Industrial Plant," IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 31, NO. 4, pp. 682-690, July/Aug., 1995.

[3] G. T. Heydt, *Electric Power Quality*. West LaFayette: Stars in a Circle Publications, 1991.

[4] J. K. Phipps, J. P. Nelson and P. K. Sen, "Power Quality and Harmonic Distortion on Distribution Systems," IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 30, NO. 2, pp. 476-484, Mar./Apr. 1994.

[5] J. R. Linders, "Electric Wave Distortions: Their Hidden Costs and Containment," IEEE Transactions on Industry Applications, vol. IA-15, NO. 5, pp. 458-471, Sept./Oct., 1979.

[6] J. Arrillaga, D. A. Bradley and P. S. Bodger, *Power System Harmonics*. Chichester UK: John Wiley & Sons, 1985.

[7] M. Waller, *Harmonics*. Indianapolis: PROMPT Publications, Inc., 1994.

[###8]### IEEE Industry Applications Society/Power Engineering Society, *IEEE Std. 519-1992: IEEE Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Systems*. New York: IEEE Press, 1993.

[###9]### J. K. Phipps, J. P. Nelson, Pankaj K. Sen, "Power Quality and Harmonic Distortion on Distribution Systems," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 30, NO. 2, pp. 476, March/April 1994.

[10] D. Andrews, M. T. Bishop, J. F. Witte, "Harmonic Measurements, Analysis, and Power Factor Correction in a Modern Steel Manufacturing Facility," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 32, NO. 3, pp. 617-624, May/June, 1996.

[11] L. W. Pierce, "Transformer Design and Application Consideration for Nonsinusoidal Load Currents," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 32, NO. 3, pp. 633-645, May/June, 1996.

[12] American National Standard ANSI/IEEE C57.110-1986, *Recommended Practices for Establishing Transformer Capability when Supplying Nonsinusoidal Load Current*. New York: IEEE Press, 1988.

[13] A. Llamas, A. Tejada, "Transformador Delta Estrella con Cargas No Lineales Monofásicas," Artículo de divulgación del Programa de Graduados en Ingeniería, Maestría en Ingeniería Eléctrica, ITESM, 1996.

[14] G. W. Massey, "Power Distribution Systems Design for Operation Under Nonsinusoidal Load Conditions," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 31, NO. 3, pp. 513-519, May/June, 1995.

[15] G. C. Jain, "The Effect of Voltage Waveshape on the Performance of a 3-Phase Induction Motor," *IEEE Transaction on Power Apparatus and Systems*, vol. 83, pp 561-566, June 1964.

[###16]### E. A. Klingshirn, H. E. Jordan, "Polyphase Induction Motor Performance and Losses on Nonsinusoidal Voltage Sources," *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, vol. PAS 87, NO. 3, pp. 624-631, March, 1968.

[###17]### A. C. Williamson, "The Effects of System Harmonics Upon Machines," *International Journal of Electric Engineering Education*, vol. 19, pp. 145-155, 1982.

[###18]### P. G. Cummings, "Estimating Effect of System Harmonics on Losses and Temperature Rise of Squirrel-Cage Motors," *IEEE Transaction on Industry Applications*, vol. IA-22, NO. 6, pp. 1121-1126, Nov./Dec. 1986.

[19] P. K. Sen, H. A. Landa, "Derating of Induction Motors Due to Waveform Distortion," *IEEE Transaction on Industry Applications*, vol. 26, NO. 6, pp. 1102-1107, Nov./Dec. 1990.

[###20]### IEEE Power Engineering Society, *IEEE Std. 112-1991: IEEE Standard Test Procedure for Polyphase Induction Motors and Generators*. New York: IEEE Press, 1991.

[21] IEEE Report, "The Effects of Power System Harmonics on Power System Equipment and Loads," *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, vol. PAS-104, NO. 9, pp. 2555-2563, September 1985.