

INCIDENCIA DEL USO DE LFC COMO CARGAS NO LINEALES EN LOS SISTEMAS DE DISTRIBUCIÓN ELÉCTRICO

F. M. Vincitorio¹, D. N. M. Balducci, J. L. Frund, L. D. Rispoli, C. D. Mache.

Resumen. Las lámparas de bajo consumo se han convertido en los últimos años en el símbolo del paradigma de la eficiencia energética. Muchos países han adoptado este paradigma como el eje principal de sus campañas de concientización, implementando planes de reemplazo masivo o bien leyes que las impulsan y/o prohíben el uso de las lámparas incandescentes. Sin embargo existen indicadores que presentan a estas como una solución poco segura y con un alto costo final. En este trabajo se presenta los resultados de la investigación realizada sobre los efectos negativos en las redes eléctricas debido al uso masivo de cargas no lineales con distorsiones armónicas en corriente superiores al 110 %. Para esto se analizaron los cambios térmicos y eléctricos sobre un transformador de referencia sometido a iguales niveles de carga con y sin distorsión. Los resultados obtenidos muestran que el efecto de cargas con un THD elevado genera una sobre elevación de temperatura debido al aumento de las pérdidas en el transformador asociadas a un menor factor de utilización. Por otra parte se han determinado distorsiones en la tensión de salida con valores superiores al 12 %, existiendo una alta incidencia del 5 y 9 armónicos.

Palabras Claves: medición de energía – lámpara fluorescente compacta (LFC) – distorsión armónica total (THD).

INTRODUCCIÓN

Las lámparas fluorescentes de bajo consumo se presentan como una alternativa más eficiente desde el punto de vista energético, cuando se realiza una comparación directa del régimen de lúmenes por Watt. Sin embargo, éstas se encuentran construidas a partir de dos componentes principales, un balasto electrónico y una lámpara fluorescente. Si bien dicha comparación resulta válida *a priori*, el hecho de contar las lámparas con un balasto electrónico trae aparejado una serie de efectos indeseados, cuyas consecuencias no se encuentran totalmente definidas al día de hoy.

Los balastos electrónicos utilizados en estos dispositivos, en la mayor parte de los casos, corresponden a topologías que hoy podrían ser consideradas obsoletas. Su principio de funcionamiento se basa en la configuración denominada inversor resonante y autoexcitado, la cual se conecta a la red mediante un rectificador

¹F. M. Vincitorio , D. N. M. Balducci, J. L. Frund, L. D. Rispoli, C. D. Mache, , Universidad Tecnológica Nacional, Paraná, Argentina, fisicaelectronica@frp.utn.edu.ar

monofásico de puente completo. La consecuencia directa de la aplicación de esta configuración es un alto nivel de distorsión armónica total, superior al 107 %, y alcanzando valores de hasta 125 %.

Tales niveles de distorsión armónica podrían generar efectos nocivos sobre las redes eléctricas, máxime cuando la cantidad de dispositivos con estas características crezca respecto de las cargas lineales (resistivas o inductivas).

Si bien existen antecedentes en la literatura especializada - algunos publicados muy tempranamente (Reid Iwao Sasaki, 1994) - no existe aún un consenso acerca de cómo evaluar los efectos reales que podrían generar estas cargas sobre los sistemas eléctricos.

Siguiendo las modelizaciones realizadas por Sasaki, aunque utilizando un protocolo de mediciones preestablecido y un sistema eléctrico en escala reducida, se han intentado determinar los efectos que podrían generarse sobre las redes. Particularmente, el aumento de las pérdidas en los componentes de un sistema eléctrico.

Los resultados obtenidos hasta el momento han demostrado que existe un aumento en las pérdidas del sistema cuando se contrastan, a iguales niveles de potencia aparente consumida, cargas lineales, tales como lámparas incandescentes, con lámparas de bajo consumo.

Es notable observar, además, que en la medida en que la potencia aparente de un sistema con un alto grado de distorsión armónica se aproxima al límite de potencia del transformador, el aumento de la distorsión armónica en tensión crece notablemente.

EL BALASTO ELECTRÓNICO EN LAS LBC

Las lámparas de bajo consumo o LBC necesitan de un balasto o reactor para poder ser conectadas a la red. Este balasto cumple las mismas funciones que el balasto electromagnético convencional (generar una descarga de alta tensión para la ignición y limitar la corriente de lámpara). La operación de un balasto se realiza a muy alta frecuencia, desde los 23 KHz hasta los 70 KHz dependiendo de las condiciones de diseño. En aplicaciones para lámparas fluorescentes lineales se han desarrollado sistemas sumamente avanzados que convierten al conjunto en una carga eléctrica ideal con un factor de potencia de 0,98, un THD inferior al 8 % y un rendimiento energético del 97 %, superior desde todo punto de vista al balasto convencional.

El balasto electrónico usado en las LBC por su parte usa una configuración de por sí obsoleta, que difícilmente alcance un rendimiento superior al 87 % (valor no aceptado en la electrónica de potencia moderna), un factor de potencia inferior a 0,6 y un THD elevado.

En la Figura 1 se muestra la topología elemental para un balasto electrónico del tipo autoresonante, según las normas de diseño de fines de los 70, pero actualmente en uso. En rojo se han indicado los componentes que la mayor parte de los fabricantes sacrifican para obtener competitividad en sus productos pero que afectan fundamentalmente la confiabilidad de los mismos.

Por otra parte la configuración de entrada o rectificador debería poseer filtros de tipo EMC para reducir notablemente el contenido armónico y evitar la presencia de

lámpara. Esta configuración genera una forma de consumo de corriente con alto nivel de contenido armónico tal como se puede observar en la Figura 3.

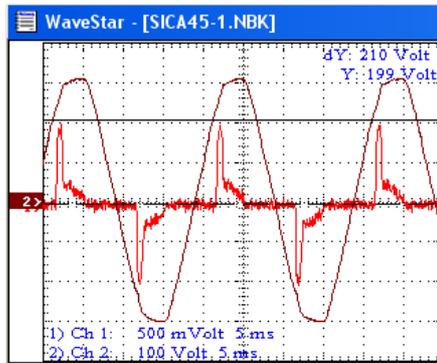


Fig. 3 – Forma de Onda de Tensión y Corriente para una Lámpara Fluorescente Compacta de 45 W.

En el oscilograma es posible notar que la forma de onda de corriente se encuentra prácticamente en fase con la onda de tensión con un ángulo de 22 grados en retraso, valor que cambia dependiendo del tipo y potencia de lámpara. Además, es de notarse que existe un pico de corriente elevado debido a la presencia del capacitor después del rectificador. En este caso particular además es posible observar la presencia de alta frecuencia montada sobre la señal de 50 Hz. El THD = 104,65 % y el FP = 0,585.

En la Figura 4 es posible observar el espectro de la señal de corriente correspondiente a esta señal.

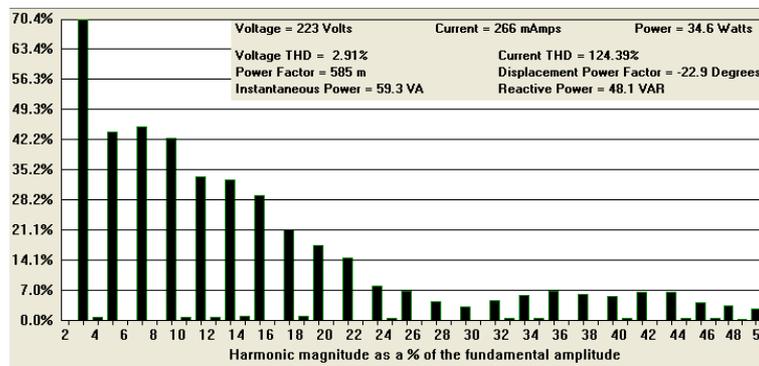


Fig. 4 – Contenido Armónico y Análisis Espectral de Corriente de una Lámpara de 45 W.

Del análisis del contenido espectral es de notarse que existen armónicos con un 7 % del valor en corriente, de la fundamental, a una frecuencia tan elevada como 2250 Hz, si bien el armónico de mayor peso es el de tercer orden.

ANÁLISIS DE LAS SEÑALES DE TENSIÓN Y CORRIENTE DEBIDO AL USO MASIVO DE LBC CON BALASTO ELECTRÓNICO.

En el párrafo anterior se presentó el caso particular del comportamiento eléctrico de una lámpara de bajo consumo funcionando e forma independiente. Para estudiar los efectos que presentaría el uso masivo de estas cargas no lineales se construyó un sistema eléctrico acoplado a la red de distribución mediante un transformador de 400 VA de tipo aislador de línea (1:1), sometiéndolo a condiciones de operación límite (2.2 A 210 / 220 V). Los ensayos realizados contemplaron el comportamiento eléctrico y térmico del transformador. Para el primer tipo de carga ensayada, lámparas incandescentes, con una potencia de 400 W se obtuvieron las formas de onda de tensión y corriente mostradas en la Figura 5.

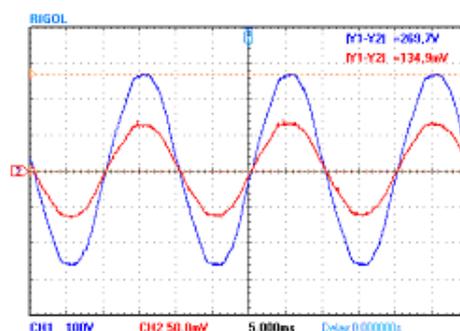


Fig. 5 – Forma de Onda de Tensión y Corriente con Lámparas Incandescentes.

En estas es posible observar la total concordancia de las señales de tensión y corriente tanto en ángulo como en forma.

El segundo caso se implementó una carga totalmente no lineal, lámparas fluorescentes compactas con una potencia máxima de 400 VA. En este caso la distorsión armónica total resultante, fue menor que el que se registrara para lámparas individuales, esto debido a la coexistencia de cargas con diferentes factores de desplazamiento que aplicando el principio de superposición de señales daría en definitiva una forma de onda con menor contenido armónico. Los valores registrados de distorsión armónica de corriente no superaron el 75 %.

En la Figura 6 es notable como la forma de onda de corriente mejora respecto de la registrada en la Figura 3. Por otra parte se puede observar que el transformador, a pesar de estar a la misma potencia aparente registrada con carga resistiva pura, tiene dificultades para mantener una señal senoidal, con un THD inferior al 3 %. En este caso la distorsión armónica de tensión registrada asciende al 10 %.

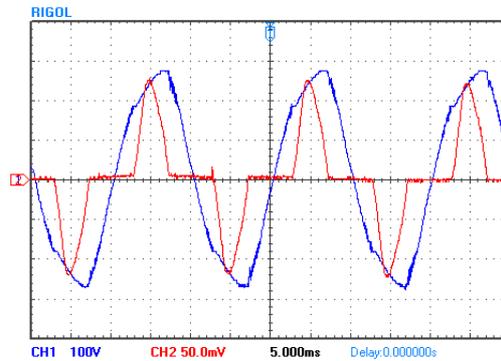


Fig. 6 – Forma de Onda de Señal de Tensión y Corriente para una Carga de 400 VA de LFC.



Fig. 7 – Espectro de Corriente para 400 VA con Lámparas de Bajo Consumo.

Del estudio espectral de la corriente es posible observar que existe un corrimiento del contenido armónico hacia los armónicos de menor orden existiendo una atenuación importante, en los de orden superior al décimo, posiblemente debido a la frecuencia de corte del transformador utilizado.

La tercera carga utilizada durante el ensayo consistió en una combinación de lámparas de bajo consumo e incandescentes con potencias aparentes iguales (50 / 50).

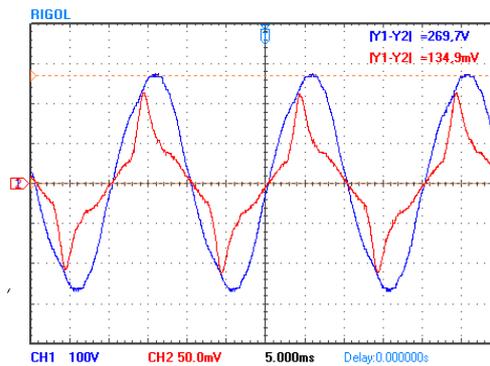


Fig. 8 – Forma de Onda de Tensión y Corriente para Cargas Combinadas 400 VA en Total.

Del análisis de la forma de onda resultante es posible observar una forma de onda de mayor extensión angular, con un pequeño retraso respecto de la señal de tensión y con una distorsión armónica total del 34 %. Lo que representa una disminución notable respecto de las LFC. Sin embargo la distorsión armónica de tensión sobre la tensión de salida del transformador no se reduce en igual proporción ubicándose en el 7,5 %.

RESPUESTA TÉRMICA DEL TRANSFORMADOR A DIFERENTES CARGAS CON POTENCIA CONSTANTE.

Con el fin de evaluar el rendimiento energético del sistema y sobre la base de las publicaciones consultadas, se procedió con la realización de mediciones de temperatura sobre un transformador de referencia de 400 VA, de aislamiento (1:1) sometido a condiciones de máxima potencia aparente y aislamiento térmico con el exterior. Inicialmente se realizaron tomas de temperatura en un punto intermedio entre los bobinados de primario y secundario introduciendo una termocupla para tal fin.

Posteriormente se decidió la toma de temperaturas con termómetro digital múltiple, tomando medidas sobre el núcleo y los bobinados.

Finalmente se procedió a la toma de temperatura sobre un arrollamiento de alambre de cobre sin núcleo e inductancia despreciable de manera de contar con un modelo concentrado de condiciones de disipación de los conductores sometidos a diferentes condiciones de carga.

En la Figura 9 se muestra una gráfica comparativa de temperatura Vs. tiempo, para una carga de lámparas de bajo consumo, carga de lámparas incandescentes una carga mixta y finalmente la evolución térmica del transformador en vacío.

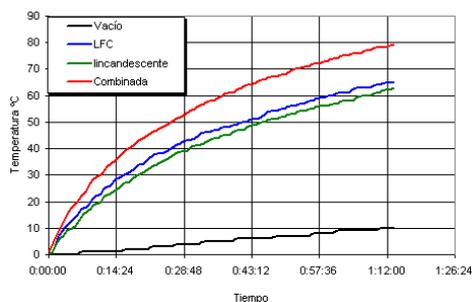


Fig. 9 – Gráfica Comparativa de las Temperaturas Alcanzadas por el Bobinado del Transformador en el Mismo Punto de Medición en 4 Condiciones Diferentes.

El resultado de graficar en un mismo sistema de ejes coordenados las evoluciones térmicas, muestra claramente una mayor pendiente en la curva correspondiente al ensayo en el cual se combinan lámparas incandescentes y fluorescentes compactas con balasto electrónico

Con una pendiente mucho menor vemos la curva correspondiente a la carga pura

de LFC y finalmente el ensayo correspondiente a lámparas incandescentes.

Siguiendo el mismo protocolo de ensayo se repitieron las mediciones sobre el núcleo resultando la gráfica comparativa mostrada en la Figura 10.

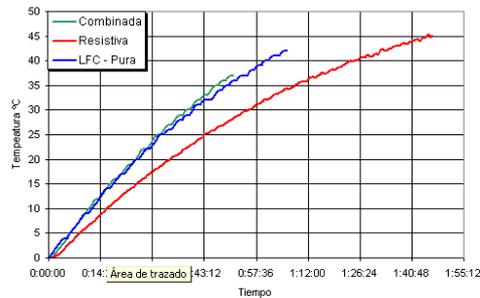


Fig. 10 – Grafica de la Evolución Térmica del Núcleo del Transformador, Ensayado con Diferentes Tipos de Carga.

En el ensayo del núcleo de transformador podemos observar que los niveles de temperatura final, considerando como temperatura final del ensayo cuando se alcanzaban los 100°C sobre el bobinado, fueron mucho menores que los relevados sobre el alambre de los arrollamientos en las medidas anteriores.

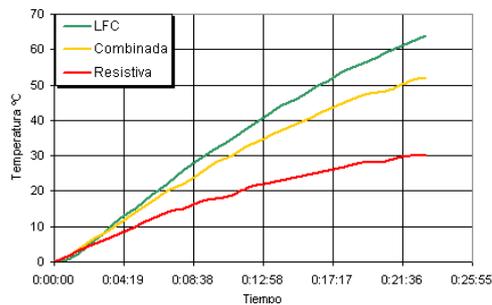


Fig. 11 – Grafica de la Evolución Térmica en un Conductor Debido a Diferentes Cargas.

Finalmente y para analizar el fenómeno de disipación térmica en el alambre, se realizaron medidas sobre un arrollamiento de cobre de 300 espiras de alambre 0,8 mm de diámetro bobinadas sin núcleo. Esta sección de alambre garantiza una profundidad de penetración de la onda asociada a la onda electromagnética, tal que asegura la circulación de corriente en toda el área del conductor incluso para la armónica N° 51, esta condición implicaría un cierto grado de independencia de la temperatura final con respecto al contenido armónico de la corriente circulante. Los resultados pueden observarse en la Figura 11.

DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS.

De los estudios realizados hemos podido definir dos grandes líneas temáticas relacionadas con el uso de las lámparas de bajo consumo, por un lado el estudio de la confiabilidad y vida útil con relación al diseño electrónico del balasto, por el otro los efectos sobre las líneas eléctricas debido a la configuración empleada en el equipo auxiliar.

En esta presentación nos interesa priorizar una discusión de los aspectos eléctricos y térmicos del estudio.

Si analizamos el uso de las LBC vemos que THD individual es elevado pero el THD resultante de la introducción de un número mayor de lámparas lo reduce notablemente pasando del 120 % a valores que se encuentran en el orden del 70%, esto debido a que la sumatoria de señales hace que el THD se reduzca notablemente. En función de esto quedaría establecido que el uso de una gran cantidad de lámparas tendría un efecto menor al que se podría considerar si se las analiza individualmente.

Por otra parte los estudios térmicos realizados demostrarían que la peor condición se presentaría cuando existen cargas lineales y alineales combinadas, mas allá que el THD se reduzca a valores del orden del 30 %. Del análisis de las curvas es posible observar que existe un aumento de la temperatura, principalmente en los conductores más que en el núcleo de un transformador.

Mientras que el aumento de temperatura ligado a las pérdidas del sistema ocasionadas por la carga es más relevante en el bobinado que en el núcleo en ambos se registra que la peor condición es la de la coexistencia de cargas lineales y alineales.

En el estudio realizado sobre un conductor de cobre se muestra que tiene un mayor impacto sobre las pérdidas el uso de las LFC que el de una carga combinada.

Estos resultados deben entenderse sobre la base de considerar al transformador como un sistema más complejo desde el punto de vista de su diseño que el de un conductor simple. Mientras que en el conductor solo existen pérdidas de conducción en el transformador el comportamiento térmico se encuentra ligado a diferentes parámetros que en definitiva afectan las condiciones de diseño y su desempeño final.

CONCLUSIONES

En función de los resultados documentados es evidente que existe un aumento de las pérdidas en el sistema. Si bien se encuentra acotado a condiciones de laboratorio es representativo de los fenómenos que podrían presentarse en los sistemas eléctricos reales en la medida que los niveles de potencia aparente consumida y ligada a un factor de potencia bajo vaya en crecimiento.

A futuro las empresas distribuidoras y las generadoras de energía deberán contemplar en el dimensionamiento de los sistemas la aparición cada vez más notable de estos fenómenos.

Ante esta evidencia es menester, considerar la implementación de normativas que obliguen a los fabricantes de productos electrónicos para iluminación, a reducir los niveles de contenido armónico producidos por sus dispositivos.

Es necesario promover la investigación, para el desarrollo de compensadores activos del factor de potencia, que permitan optimizar el uso de las redes eléctricas.

REFERENCIAS

Libros:

- [1] M. H. Rashid, "Power Electronics: Circuits, Device and Applications," 3^{ra} ed. New Jersey, E.E.U.U.: Pearson Education Inc, 2003.
- [2] E. Harper, "Curso de transformadores y motores de inducción," 4^{ta} ed. Limusa, 2005.
- [3] E. Félice, "Perturbaciones Armónicas," Paraninfo, 2001.

Reportes Tecnicos:

- [4] R. I. Sasaki, "The Impact Of Electronic Ballast Compact Fluorescent Lighting On Power Distribution Systems," ECE Technical Reports, 1994.

Papers Presentados en Conferencias:

- [5] F. Vincitorio, C. Brutti and J. Frund, "La electrónica de las lámparas de bajo consumo ventajas, desventajas y problemas," presentado en Lux América 2010, Valparaíso, Chile, 2010.

Papers from Conference Proceedings (Published):

- [6] Ferrari; Krapf, "Distorsión armónica producida por LFC," presentado en CIDEL 2010, CABA, Argentina, 2010.

Fabio Miguel Vincitorio, Nació en la ciudad de Paraná Argentina el 21 de enero de 1970. Se graduó de ingeniero en electrónica en el año 1998. Actualmente se encuentra realizando la tesis doctoral en la Universidad de La Coruña (España). Profesor titular de la cátedra de Física y profesor adjunto de la cátedra de Electrónica de Potencia de la Universidad Tecnológica Nacional. Autor de publicaciones nacionales e internacionales en electrónica de potencia para iluminación y fotónica aplicada a ensayos no destructivos. Secretario de Ciencia y Tecnología de la Universidad Tecnológica Nacional Facultad Regional Paraná en el período 2006 - 2010. Fundador en el año 2004 de la empresa VZ-Ingeniería dedicada a la fabricación y desarrollo de sistemas electrónicos de potencia y control.