



APLICACIONES INDUSTRIALES

Efecto de los armónicos en los motores monofásicos asincrónicos con capacitor de marcha

Harmonic effects on permanent -capacitor single- phase induction motors

Percy R.- Viego Felipe
Julio R.- Gómez Sarduy

Marcos A.- de Armas Teyra †
Vladimir - Sousa Santos

Recibido: Marzo del 2013
Aprobado: Agosto del 2013

Resumen/ Abstract

Las ondas de tensión apreciablemente distorsionadas, tienen un impacto negativo en el comportamiento de los motores monofásicos asincrónicos de jaula de ardilla. Se deterioran sus indicadores energéticos, se incrementan las vibraciones y el ruido y se reduce la vida útil. Se estudia el comportamiento en estado estable de un motor con capacitor permanente, extensible a uno de dos capacitores. Se analiza un ejemplo experimental de aplicación tomado de la literatura. En él se evidencia un incremento de las pérdidas, empeoramiento del factor de potencia, aumento de los momentos pulsantes y otros elementos negativos cuando circulan corrientes no sinusoidales. Un estudio de las distorsiones de las ondas de corriente en instalaciones residenciales de Cuba, deja claro la necesidad de profundizar en los efectos sobre los motores y sobre el sistema eléctrico en general. Se explica que las técnicas para realizar estos estudios, sobre todo in situ, deben ser de inteligencia artificial.

Palabras clave: efecto de los armónicos en motores asincrónicos monofásicos, eficiencia en motores asincrónicos, motores monofásicos de capacitor de marcha y de dos capacitores, suministro eléctrico residencial.

Strong distorted voltage waveforms, have a negative impact on the performance of single-phase squirrel-cage induction motors. Energetic parameters become worse, vibration and noise increase and life expectancy is reduced. Steady state performance of permanent capacitor single-phase induction motor is studied. The study is extensible to a two-value capacitor motor. An experimental application taken from literature was analyzed. In that work is evident the increase in losses, power factor reduction, greater pulsating torques and other undesirable tendencies when non-sinusoidal currents are circulating in the motor circuits. A study related to current wave distortion in Cuban housing electric circuits is made. The need of a deep analysis of the effect not only on the motors, but on the electric system as well, is made clear. Artificial intelligence methods have to be used to study these problems, arising on the presence of non sinusoidal wave forms, especially for working in situ.

Key Words: harmonics effect on single phase induction motors, housing power supply, induction motor efficiency, single-phase permanent and two-value-capacitor motors.

INTRODUCCIÓN

Los motores asincrónicos monofásicos son de los más ampliamente usados en el mundo, especialmente para aplicaciones domésticas, comerciales e industriales de baja potencia, donde el suministro trifásico no está disponible. Por lo tanto, resulta de gran importancia lograr diseños económicamente efectivos, de alta eficiencia y de excelentes características operacionales [1].

Por otra parte, tiene gran importancia poder determinar las pérdidas, la eficiencia y otras características operacionales de estas máquinas, ya que aunque individualmente son de pequeña potencia, significan en total para un país elevadas demandas y consumos energéticos.

Resulta bien conocido que el suministro con ondas no sinusoidales produce varios efectos dañinos en estos motores, tales como vibración, pérdidas adicionales, ruido y un excesivo incremento de temperatura [2-4]. De esta forma, es evidente que resulta importante estudiar estos fenómenos. Es oportuno señalar que la bibliografía relacionada con la problemática objeto de este trabajo, no resulta amplia. Los motores asincrónicos monofásicos son más complejos de modelar y de analizar a través de circuitos equivalentes que los motores trifásicos y, más aún, la complejidad se incrementa notablemente si son alimentados por una tensión no sinusoidal [4]. El motor monofásico asincrónico de capacitor de marcha logra la aproximación a una operación bifásica en mayor o menor medida, en dependencia del diseño y del estado de carga, que resulta en una mejor eficiencia y factor de potencia, así como menores momentos pulsantes en comparación con las variantes de capacitor de arranque y de fase dividida.

Como en el presente trabajo el estado de operación que interesa es el estable, el estudio que se hace resulta válido también para el motor de dos capacitores (de arranque y de marcha), ya que el capacitor de arranque queda desconectado después del período de aceleración. En la figura 1, se muestra el esquema del motor bajo análisis.

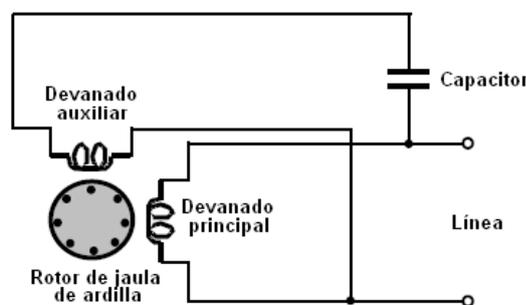


Fig. 1. Esquema del motor monofásico asincrónico de jaula de ardilla con capacitor de marcha.

Salvo en el caso en que exista un punto de operación en que el motor se comporte como perfectamente bifásico, es decir, cuando las fuerzas magnetomotrices (fmm) son iguales en magnitud y están desplazadas 90° eléctricos, la condición general de esta máquina es asimétrica; o sea, que para cualquier estado de carga en que el deslizamiento varía, el campo rotatorio no es circular y hay momentos parásitos. Aunque se pueden utilizar diversos métodos para analizar el motor en esas condiciones de asimetría, comúnmente se utiliza la teoría de los campos rotatorios [4]. Esta teoría establece básicamente que un campo magnético pulsante puede ser descompuesto en dos campos que rotan en diferentes direcciones. El motor responde a cada campo separadamente y el momento neto de la máquina será la suma del momento debido a cada campo magnético rotatorio. Sin embargo, cualquiera que sea la teoría que se utilice, se requiere del conocimiento de los parámetros de ambos devanados (principal y auxiliar) y del rotor, los que exige el conocimiento de todas las dimensiones y materiales empleados en el motor o de complicadas pruebas de laboratorio [2-4]. Estos complejos procedimientos solo resultarían válidos para el diseño de las máquinas y no para la evaluación operacional y energética in situ de motores monofásicos en operación.

TENSIONES NO SINUSOIDALES APLICADAS AL MOTOR

Cuando la tensión aplicada al motor no es sinusoidal, resulta conveniente atacar el problema descomponiendo la onda a partir de la aplicación de las series de Fourier. Usando estas series, se pueden escribir expresiones generales para la tensión (v) y las corrientes instantáneas (i). Así, para la tensión aplicada, se tiene la ecuación (1):

$$v = \sqrt{2} [V_1 \sin \omega t + V_2 \sin 2\omega t + V_3 \sin 3\omega t + V_4 \sin 4\omega t + V_5 \sin 5\omega t + \dots + V_n \sin n\omega t] \text{ (V)} \quad (1)$$

Donde: V_1 , es el valor efectivo de la tensión fundamental, y $V_2, V_3, V_4, V_5, \dots, V_n$ son los valores efectivos de las respectivas tensiones armónicas (V).

Y para las corrientes, se tiene la ecuación (2):

$$i = \sqrt{2} [I_1 \sin \omega t + I_2 \sin 2 \cdot \omega t + I_3 \sin 3 \cdot \omega t + I_4 \sin 4 \cdot \omega t + I_5 \sin 5 \cdot \omega t + \dots + I_n \sin n \cdot \omega t] \text{ (A)} \quad (2)$$

Donde: I_1 es el valor efectivo de la corriente fundamental, e $I_2, I_3, I_4, I_5, \dots, I_n$ son los valores efectivos de las respectivas corrientes armónicas (A).

Es decir, los armónicos son tensiones o corrientes sinusoidales con frecuencias que son múltiplos integrales de la frecuencia fundamental del sistema.

El valor efectivo de la tensión de línea aplicada al motor (V) es dada por la ecuación (3):

$$V = \sqrt{V_1^2 + V_2^2 + V_3^2 + V_4^2 + V_5^2 + \dots + V_n^2} \quad \text{(V)} \quad (3)$$

Para las corrientes en los devanados principal y auxiliar, así como para corriente de línea, las expresiones son análogas. Esas expresiones son casos particulares del tipo que aparece en la ecuación (4):

$$I = \sqrt{I_1^2 + I_2^2 + I_3^2 + I_4^2 + I_5^2 + \dots + I_n^2} \quad \text{(A)} \quad (4)$$

A modo de ejemplo, en la figura 2 a), se muestra una onda de corriente distorsionada producto de una tensión no sinusoidal que ha sido aplicada a un motor monofásico con capacitor de marcha.

En la figura 2 b), se observa su espectro armónico.

Para evaluar y establecer límites al contenido de armónicos de tensión en un sistema eléctrico y en sus componentes, dos de las definiciones más utilizadas son:

La distorsión armónica total de tensión (THD_V) [5], está dada por la ecuación (5):

$$THD_V = \sqrt{\frac{\sum_{k=2}^{\infty} V_k^2}{V_1^2}} \cdot 100 \quad (\%) \quad (5)$$

Donde $k = 2, 3, 4, 5, \dots, n$, es el orden del armónico.

Y el factor de distorsión armónica individual de tensión (FDV_k), según la ecuación (6):

$$FDV_k = \frac{V_k}{V_1} \cdot 100 \quad \% \quad (6)$$

Expresiones análogas se establecen para las corrientes y se denominan THD_I (distorsión armónica total de corriente) y FDI_k (factor de distorsión armónica individual de corriente [5]).

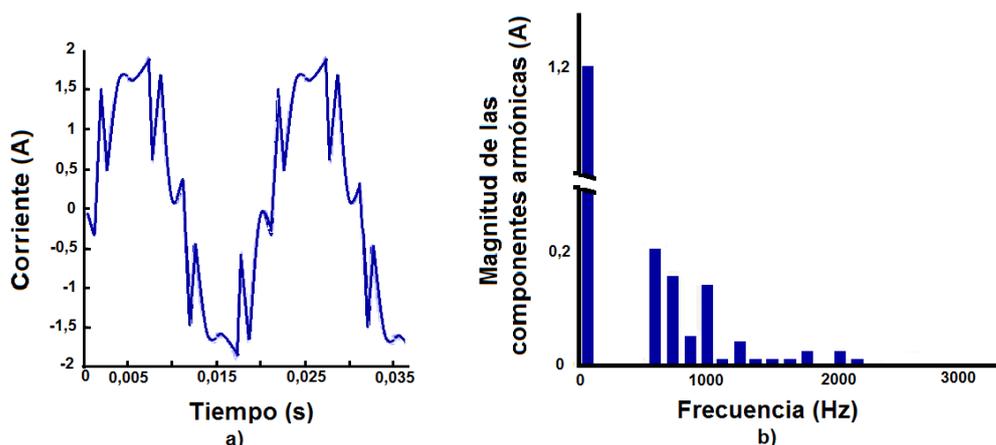


Fig. 2. Onda de corriente distorsionada y corrientes armónicas en un motor monofásico con capacitor de marcha.

El origen de los armónicos puede ser encontrado en: uso de aparatos electrónicos electrodomésticos e industriales de baja potencia; equipos de electrónica de potencia, como controladores de fase e inversores, y cicloconvertidores, que son ampliamente utilizados con los motores asíncronos en la industria; la aplicación de reactores saturables para aislar los componentes de CD cuando lo requiere la carga; en la operación de hornos y soldadura por arco, que constituyen cargas discontinuas que provocan gran distorsión de las corrientes, así como armónicos pares en los sistemas de transmisión, distribución y de suministro eléctrico; la operación de bancos de capacitores para la corrección del factor de potencia y la regulación de tensión en los sistemas; inductores serie para reducir las corrientes de cortocircuito en las líneas de transmisión [6].

Se denominan interarmónicos a las tensiones o corrientes con componentes de frecuencia que no son múltiplos integrales de la frecuencia del sistema. Los interarmónicos y los subarmónicos (caso particular de interarmónicos, con frecuencias menores a 60 Hz) pueden ser generados a cualquier nivel de tensión y son transferidos entre niveles, es decir, los interarmónicos generados en alta y media tensión se inyectan en baja tensión y viceversa. Su magnitud pocas veces excede el 0,5% del fundamental, pero pueden ocurrir niveles superiores en condiciones de resonancia.

Las fuentes básicas de los interarmónicos son: dispositivos de arco; accionamientos de velocidad variable; convertidores estáticos (particularmente los de frecuencia directos e indirectos); controles de rizado; motores asíncronos; señales portadoras (carrier). Los interarmónicos pueden también ser causados por oscilaciones que ocurren, por ejemplo, en sistemas con capacitores en serie o en paralelo o donde los transformadores están sujetos a saturación, así como durante los procesos de conmutación [6]. Los inductores y capacitores pueden crear problemas de resonancia que magnifiquen los armónicos existentes. Usualmente, los armónicos pares de tensión y de corriente no están presentes, salvo en casos como los señalados anteriormente. La magnitud de las tensiones armónicas también resulta muy reducida con elevados órdenes de k y suelen no tomarse en consideración. Asumiendo que no hay saturación, el principio de la superposición puede ser aplicado para determinar el comportamiento resultante del motor asíncrono monofásico en condiciones de tensiones de línea no sinusoidales. Cada característica operacional del motor se determina independientemente para la fundamental y los armónicos. Estos valores individuales se agregan para obtener el comportamiento completo de estado estable del motor.

EFFECTO DE LOS ARMÓNICOS DE TIEMPO SOBRE EL COMPORTAMIENTO DEL MOTOR

Efecto sobre las pérdidas en el motor

Cuando los motores asíncronos monofásicos se conectan a una onda distorsionada de tensión, las pérdidas se ven aumentadas [3; 7]. Este crecimiento de las pérdidas se debe a numerosas causas y pueden agruparse en: incremento de las pérdidas de cobre, de las pérdidas de núcleo, y de las pérdidas adicionales.

Incremento de las pérdidas de cobre

El aumento de estas pérdidas está en función del contenido de armónicos de las corrientes del estator y del rotor, así como del efecto pelicular. Ese incremento de las pérdidas se determina sumando las pérdidas para cada armónico. Para el estator (P_{cusk}) se puede expresar como en la ecuación (7):

$$P_{cusk} = \sum_{k=2}^{\infty} I_{mk}^2 \cdot R_{1m} + I_{ak}^2 \cdot R_{1a} \quad (7)$$

Donde: I_{mk} e I_{ak} son las corrientes en el devanado principal y auxiliar para cada armónico, respectivamente (A); y R_{1m} y R_{1a} son las resistencias de dichos devanados para la componente fundamental (Ω). Como se están considerando pequeñas máquinas con devanados de alambre en el estator, el efecto pelicular puede despreciarse. Esto hace que las resistencias del estator no varíen con la frecuencia de los armónicos).

Cuando se calcula el aumento de las pérdidas en el rotor de jaula, el efecto pelicular debe ser tomado en cuenta para todos los tamaños y diseños de motores, especialmente si se usan barras profundas. En este caso, las pérdidas en el rotor (P_{curk}) se pueden expresar como, (ver la ecuación 8).

$$P_{curk} = \sum_{k=2}^{\infty} I_{rk}^2 \cdot \frac{R_{rk}}{s_k} \quad (8)$$

Donde: I_{rk} es la corriente del rotor para cada armónico (A); R_{rk} es la resistencia del rotor para cada armónico (Ω); y s_k es el deslizamiento para cada armónico.

Estas pérdidas constituyen una gran parte del incremento de las pérdidas totales de estos motores operando bajo condiciones de suministro eléctrico no sinusoidal y es la causa principal de la reducción en su eficiencia. Hay que subrayar que el incremento de las pérdidas de cobre para una determinada potencia de salida, no se debe solo al efecto pelicular, sino que se produce también por el necesario incremento de la potencia de entrada para compensar el efecto de los momentos armónicos y del aumento de otras pérdidas.

Incremento de las pérdidas de núcleo

La onda de densidad de flujo resultante en el entrehierro, no es constante alrededor del mismo y puede ser mayor o menor que la onda fundamental. Los efectos sobre la histéresis, las corrientes parásitas y los flujos armónicos, resultan decisivos. Una determinación exacta de estas pérdidas resulta sumamente compleja. Sin embargo, el efecto resulta muy pequeño en comparación con el efecto sobre otras pérdidas. Esto ocurre porque los flujos son grandemente amortiguados por las corrientes secundarias inducidas. Por ejemplo, para el caso de un motor trifásico balanceado - que sería válido también para un motor monofásico con capacitor de marcha trabajando en estado de balance, es decir, bifásico balanceado - , se llega a la siguiente ecuación (9).

$$\frac{\lambda_{MAX}}{\lambda_{nMAX}} \leq \frac{1 + \sum_{k \neq 1} \frac{V_k}{kV_1}}{\sqrt{1 + (THD_V)^2}} \quad [1] \quad (9)$$

Donde: λ_{MAX} es el valor máximo del flujo concatenado por fase y λ_{nMAX} es el valor máximo del flujo sinusoidal concatenado por fase. Para los espectros de tensión típicos en sistemas eléctricos, donde la distorsión expresada en $FDV_k < 5\%$, la relación dada por la ecuación (9), es menor que 1,05, lo que tiene un efecto insignificante sobre las pérdidas de núcleo. Sin embargo, la expresión sirve de una importante advertencia concerniente a los subarmónicos ($k < 1$). Por ejemplo, si $k = 0,04$ (2,4 Hz) y $V_k/V_1 = 0,008$, el valor pico de λ_{MAX} puede llegar a un 20% por encima del nominal, y producir eventualmente saturación [1].

Incremento de las pérdidas adicionales

Los armónicos de tensión afectan marcadamente estas pérdidas [2-4]. Las pérdidas adicionales son difíciles de determinar. Tanto en las máquinas trifásicas como en las monofásicas con capacitor de marcha, se ha tratado de calcularlas con coeficientes empíricos que dependen de los diseños de las máquinas o con aproximaciones generales que frecuentemente no son válidas [3-4].

Pérdidas mecánicas

Las pérdidas mecánicas son aproximadamente proporcionales al cuadrado de la velocidad y al área de la superficie de contacto. Por esto, se asume que no son afectadas por la distorsión armónica de la tensión. Sin embargo, la vibración en el rotor originada por los momentos parásitos causados por la interacción entre las fuerzas magnetomotrices, aumenta las pérdidas por fricción en los rodamientos y reduce su vida útil, incrementando así grandemente la probabilidad de fallos mecánicos [6].

Efecto sobre el factor de potencia

En el motor monofásico con capacitor de marcha, que es en general asimétrico, cuando es alimentado con una tensión distorsionada, existe una compleja interacción entre las *fmm* que cada armónico crea en cada uno de los dos devanados y en cómo se ven afectados cada uno de los parámetros. Sin embargo, como las reactancias inductivas son directamente proporcionales a la frecuencia ($X_L=2\pi kfL$), aumentan con el orden del armónico; y la reactancia capacitiva ($X_C=1/(2\pi kfC)$) disminuye en proporción inversa. El efecto neto resulta siempre en un empeoramiento del factor de potencia.

Momentos parásitos debidos a las tensiones no sinusoidales

Con la distorsión armónica de la tensión aplicada al motor, pueden producirse importantes valores de momentos parásitos [4]. Las tensiones armónicas aplicadas al motor producen corrientes armónicas. A su vez, estas corrientes producen *fmm* rotatorias, que tienen velocidades que son múltiplos del orden del armónico y de la velocidad sincrónica de la frecuencia fundamental. Ciertas *fmm* rotan en el sentido de la secuencia positiva y otras lo hacen en dirección contraria. La velocidad de la *fmm* del k^{mo} armónico es kn_s . El deslizamiento para el k^{mo} armónico es dado por la ecuación (10):

$$s_k = \frac{kn_s \pm n_s(1-s)}{kn_s} = k \pm \frac{(1-s)}{k} \quad (10)$$

Donde: s es el deslizamiento (p.u.); y n_s es la velocidad sincrónica (rpm).

De acuerdo con la dirección de rotación de la *fmm*, los armónicos de secuencia positiva $4^\circ, 7^\circ, \dots, [3m+1]$, ($m=1,2,\dots$) contribuyen al momento en la dirección positiva. En este caso, en la ecuación (10) se usa el signo negativo. Los armónicos de secuencia negativa $2^\circ, 5^\circ, \dots, [3m+2]$ ($m=0,1,2, \dots$) provocan un momento contrario. En este caso se usa el signo positivo en dicha ecuación. Los armónicos de secuencia cero $3^\circ, 6^\circ, \dots, [3m]$ ($m=1,2,\dots$) no contribuyen a ningún momento rotatorio. Aunque los armónicos de secuencia positiva se añaden e incrementan el momento positivo, los efectos de calentamiento contrarrestan ese efecto positivo.

Los momentos desarrollados por los campos de diferentes velocidades pulsan con una frecuencia que se corresponde con la diferencia de las velocidades de las *fmm* del estator y del rotor. Esas *fmm* tienen el mismo número de polos. De tal forma, cada *fmm* del estator reacciona con otra *fmm* del rotor para producir un momento. Para un orden armónico k determinado, está presente el momento fundamental y $k \times k$ momentos parásitos:

Momentos parásitos

a) Momentos debidos a la interacción de las *fmm* de armónicos del mismo orden en el estator y en el rotor: $ks=kr>1$.

Estos son momentos sincrónicos constantes. Son posibles tanto momentos motores como de frenaje. En la mayoría de los casos, en que la distorsión de la onda no es muy grande, estos momentos sincrónicos resultan pequeños y pueden despreciarse

b) Momentos debidos a la interacción entre las fmm de armónicos del estator y del rotor, de diferente orden: $ks \neq kr$.

Estos son llamados "momentos pulsantes". Por ejemplo, las pulsaciones de momento debidas a la reacción de la fmm fundamental del estator con la de tercer armónico del rotor o la de tercer armónico del estator con la del séptimo del rotor. La amplitud de las pulsaciones depende del contenido de armónicos de la tensión. También está presente el efecto combinado de los armónicos de tiempo con los armónicos espaciales, que se manifiestan en mayor o menor medida en todas las máquinas asincrónicas, debido a la distribución espacial no sinusoidal de la fmm . Esta interacción produce momentos de diferentes secuencias.

RESULTADOS

Estudio experimental comparativo

En Mohammed (2008) se lleva a cabo una evaluación experimental comparativa del comportamiento de un motor asincrónico monofásico de 175 W, 4 polos, 220 V, 50 Hz, con capacitor de marcha ($C=6 \mu F$) trabajando a plena carga, alimentado con ondas de tensión sinusoidal y con varios grados de distorsión. Esta evaluación ilustra adecuadamente los efectos de los armónicos discutidos anteriormente.

En las figuras 3a) y 3 b) se presentan las formas de dos de las ondas distorsionadas y en las figuras 4 a) y 4 b), los espectros armónicos respectivos de las ondas de la figura 3. En la tabla 1, se muestran los parámetros y valores operacionales con la tensión sinusoidal y con las ondas distorsionadas. Todos los valores que se presentan en la tabla 1 son totales, es decir, que son determinados considerando los efectos de los armónicos [5]. Como se puede observar en la tabla 1, para una misma potencia de salida y la misma tensión efectiva, se evidencia que según esté más distorsionada la onda de tensión, se incrementan los efectos señalados cualitativamente más arriba en el trabajo. Particularmente significativos, considerando que se va a tratar con una gran masa de motores, resulta el incremento de las pérdidas. Es también importante el empeoramiento del factor de potencia.

Puesto que se parte de la misma potencia de salida y tensión aplicada, la potencia de entrada crece. La corriente crece más aún, fundamentalmente debido a la reducción del factor de potencia. Como dato adicional, en el caso de una onda más distorsionada, se determinó que los momentos pulsantes alcanzan un valor promedio de 20,6% del momento nominal [4], lo cual resulta igualmente significativo y dañino.

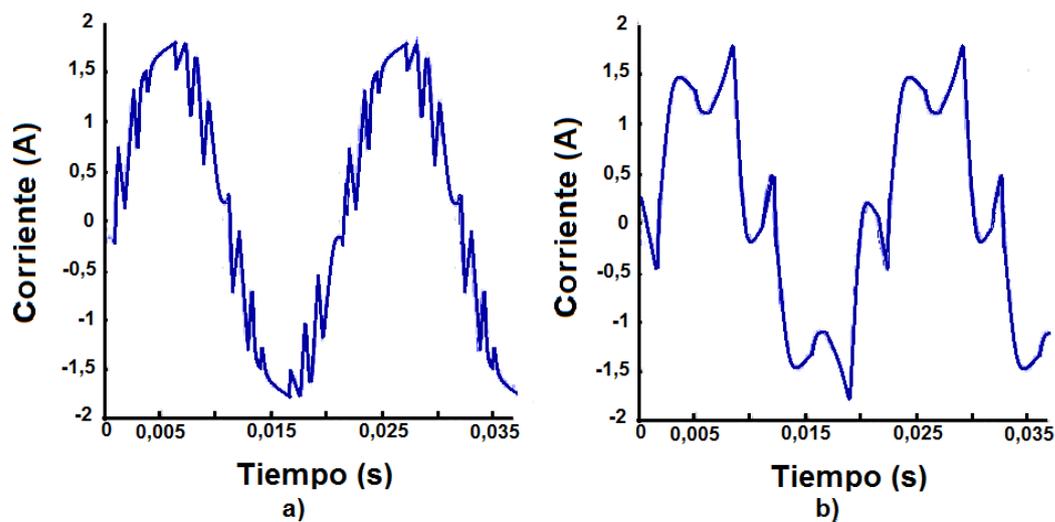


Fig. 3. Formas de onda distorsionadas.

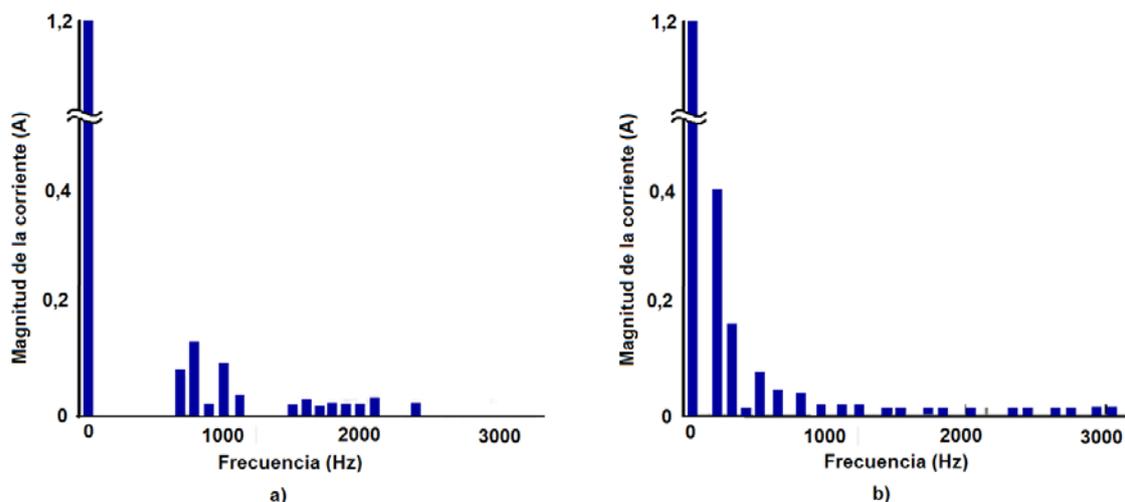


Fig. 4. Espectros armónicos de las formas de onda de las figuras 3 a) y 3b), respectivamente

Tabla 1. Resultados del comportamiento de un motor monofásico con capacitor de marcha a plena carga alimentado con tensión sinusoidal y con ondas distorsionadas.						
Variable	Símbolo	Sinusoidal	Onda 1	Variación 1	Onda 2	Variación 2
Potencia de salida	P_2 (W)	175	175	0	175	0
Potencia de entrada	P_1 (W)	259,721	261,2057	+0,464	267,6173	+3,040
Eficiencia	η (%)	67,38	67,00	-0,560	65,3919	-2,2951
Factor de potencia	$\cos\phi$ (p.u.)	0,9716	0,9662	-0,5558	0,9398	-3,273
Tensión de línea	V (V)	220	220	0	220	0
Corriente de línea	I (A)	1,215	1,2288	+1,1358	1,2943	+6,5267
Velocidad	n_r (rpm)	1275	1274	-0,0784	1273	-0,1569
Frecuencia de la fundamental	f (Hz)	50	50	0	50	0
Deslizamiento	s (p.u.)	0,15	0,1507	+0,4667	0,1513	+0,8667
Pérdidas totales	ΣP (W)	84,721	86,2057	+1,7525	92,6173	+9,3204

Donde: Sinusoidal, son los valores con tensión sinusoidal aplicada; Onda 1 y Onda 2, son los valores con las tensiones de las ondas de las figuras 3a) y 3b), respectivamente; Variación 1 y Variación 2, son los porcentajes de variación de los valores de Onda 1 y Onda 2, con respecto a los de Sinusoidal (%).

Estudio de caso en el sector residencial

Con el objetivo de evaluar la situación que se presenta con la distorsión armónica en el ámbito residencial, se realizó un estudio en varias casas del municipio de Cumanayagua, en la provincia de Cienfuegos. Mediante la utilización de un analizador de redes, se muestrearon en las acometidas, durante 7 días, las formas de onda, los espectros armónicos y otros parámetros. Muestras de formas de onda de corriente y de sus correspondientes espectros armónicos en las que se denominan Casa A y Casa B, se observan en las figuras 5 a) y 5 b); y figuras 6 a) y 6 b), respectivamente. En el caso de la Casa A, se evidencia una onda donde sólo están presentes armónicos impares de magnitud importante del (3° al 9°). Durante el período muestreado, se registró un $THD_{I_{max}}$ de cerca de un 95%. Por otra parte, en el caso de la Casa B, se observa una onda con mayor distorsión que la correspondiente a la Casa A, pero también con armónicos impares del mismo orden. El $THD_{I_{max}}$ en el período de 7 días, alcanzó un valor máximo del 45%. En una tercera casa (Casa C), se registró un espectro armónico en un día entre semana a las 11:51:00 horas (fig. 7), en el que se observa la presencia de armónicos pares, lo cual resulta de interés si se evalúa la posibilidad de instalar filtros en algún punto del sistema.

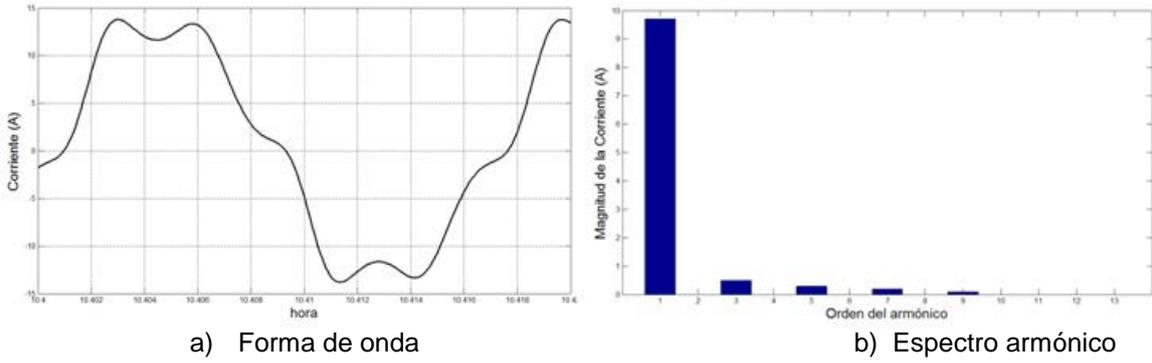


Fig. 5. Forma de onda y espectro armónico de la Casa A

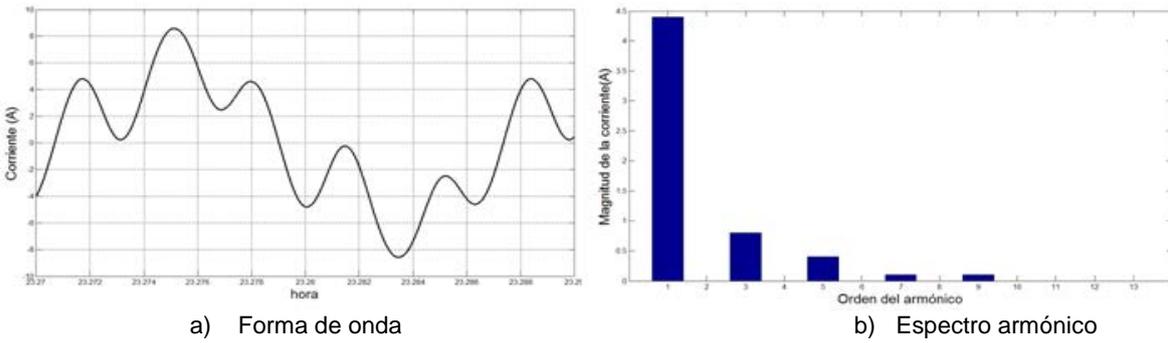


Fig. 6. Forma de onda y espectro armónico de la Casa B

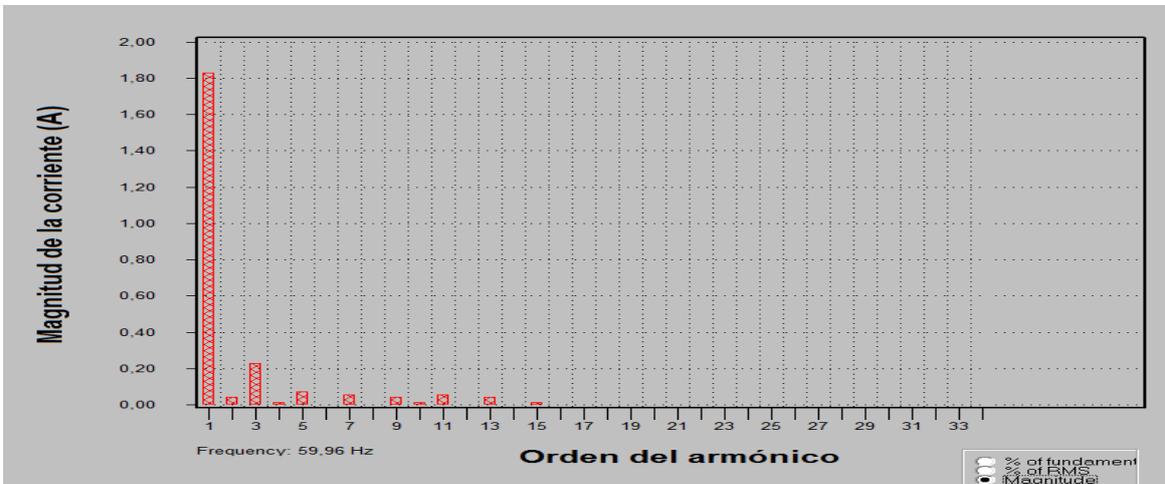


Fig. 7. Espectro armónico de la Casa C a las 11:51:00 horas.

DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS

Los valores experimentales obtenidos a partir de los datos ofrecidos en Mohammed (2008), evidencian los deterioros que se presentan en las características operacionales de los motores monofásicos asincrónicos con capacitor de marcha en presencia de armónicos en la tensión aplicada. Especialmente, el incremento de las pérdidas, el empeoramiento del factor de potencia, y el aumento de los momentos pulsantes, indican que hay que prestarle una gran atención a esta problemática, que tiene un gran peso debido a la masividad en el uso de estas máquinas en los circuitos monofásicos, tanto residenciales, como en la esfera comercial, de servicios e industriales.

Además, hay que añadir la reducción de la vida útil que presentan estas máquinas en las condiciones estudiadas. Tanto por el incremento de temperatura, como por los efectos de la distorsión de la onda y el aumento de las vibraciones sobre el aislamiento, la frecuencia de las fallas aumenta. Los rodamientos y otros elementos mecánicos también son afectados. Particularmente, en el estudio realizado en áreas residenciales, se demuestra la existencia de distorsión de las ondas, producto de la gran cantidad de cargas no lineales conectadas al sistema y existentes en las propias residencias. De esta forma, se produce un deterioro de los indicadores energéticos y una afectación de la vida útil, relacionados no solo con los motores aquí estudiados, sino también en otras variantes de motores monofásicos asincrónicos de rotor de jaula, como el estándar de fase dividida y los de arranque por capacitor, así como en otros tipos de motores. Otros tipos de carga también sufren semejantes efectos producto de la distorsión armónica. La utilización de filtros para amortiguar los efectos de las ondas de tensión distorsionadas, tanto en cuanto al tipo como al lugar de ubicación, requieren de un detallado estudio técnico-económico. En la literatura aparecen evidencias que apoyan este criterio [8-9]. El estudio del efecto de las ondas distorsionadas sobre la operación de los motores que nos ocupan, no puede realizarse con procedimientos convencionales, especialmente si se quieren hacer las evaluaciones in situ. El uso, por ejemplo, de circuitos equivalentes con los métodos de los campos rotatorios, requeriría del conocimiento de los parámetros para cada armónico. Una solución a este problema pudiera ser utilizar métodos de inteligencia artificial, particularmente algoritmos evolutivos, en combinación con el método del modelo de referencia tal como se reporta en la literatura para motores trifásicos [10-11], lo cual será desarrollado por los autores como una continuación del presente estudio.

CONCLUSIONES

La existencia de una enorme y creciente cantidad de equipos electrónicos (que significan cargas no lineales) en las instalaciones eléctricas de todo tipo, provocan distorsiones en las formas de onda que afectan las características operacionales de los motores monofásicos asincrónicos de jaula de ardilla. Por su masividad, resulta importante estudiar los efectos que se producen. En este trabajo se llevó a cabo un estudio de los efectos cualitativos y cuantitativos de los armónicos de tiempo sobre el comportamiento del motor con capacitor de marcha. Se evidenció que, como efectos fundamentales, aumentan las pérdidas, se reduce el factor de potencia y crecen los momentos parásitos. Una consecuencia natural de lo anterior, es el aumento de la temperatura, de la vibración y el ruido, así como una reducción de la vida útil. Se verificaron, con datos experimentales extraídos de un estudio realizado en la literatura, los fundamentales efectos anteriormente señalados. Se comparó la operación de un motor alimentado con una tensión sinusoidal en condiciones nominales, con su comportamiento con dos tensiones de distinto grado de distorsión. A partir de la misma tensión y potencia total de salida en los tres casos, se hicieron manifiestos los resultados negativos en cuanto a pérdidas, factor de potencia y momentos pulsantes. Se observa como la potencia de entrada se incrementa y, más aún, la corriente de línea, por la influencia de la disminución del factor de potencia. El efecto de las ondas distorsionadas sobre la operación de estos motores, especialmente si se requiere trabajar in situ, no puede llevarse a cabo con procedimientos convencionales, que necesitan del conocimiento de los parámetros correspondientes a cada armónico. Resulta necesario y conveniente utilizar técnicas de inteligencia artificial, lo cual será llevado a cabo en posteriores trabajos. Un estudio realizado en varias instalaciones residenciales, deja claro que existen casos de marcadas distorsiones en las ondas de corriente. Esto demuestra la necesidad de hacer estudios técnico-económicos al respecto – incluyendo la instalación de filtros - dado el incremento de las pérdidas y otros elementos negativos que deterioran los indicadores energéticos, la calidad de la energía y la vida útil de los equipos, tanto en dichas instalaciones como, en consecuencia, en el sistema eléctrico del país.

REFERENCIAS

- [1] De Abreu, J.P.; Emanuel, A.E., "Induction motor thermal aging caused by voltage distortion and imbalance: loss of useful life and its estimated cost". *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2002, vol.38, n.1, p. 12-20, ISSN 0093-9994.

- [2] Madelmis, C.; Michaelides, A., "Magnetic performance of a single phase induction motor under triac-based voltage control". En: *Proceedings of the 8th WSEAS Trans. on Circuits and Systems, International Conference*. Athens, Greece, July 2004, vol.3, p. 1240-1245, ISBN 978-960-474-076-5.
- [3] Kostic, M. M.; Kostic, B.B., "Motor voltage high harmonics influence to efficient energy usage". En: *Proceedings of the 15th WSEAS International Conference on Systems. Recent Researches in System Science, WEAS Library*. 2011, p. 276-281, ISBN 978-1-61804-023-7.
- [4] Mohammed, J.A., "Performance improvement of a single phase induction motor fed by nonsinusoidal voltages". *Engineering & Technology*, 2008, vol.26, n.7, p. 797-810, ISSN 2161-7165.
- [5] IEEE, "IEEE Recommended practices and requirements for harmonic control in electrical power systems". *IEEE STD 519-1992*, New York, USA, 1992, ISBN: 1-55937-239-7.
- [6] Lee, C.Y.; Lee, W.J., "Effects of nonsinusoidal voltages on the operation performance of a three-phase induction motor", *IEEE Trans. on Energy Conversion*. 1999, vol.14, n.2, p. 193-201, ISSN 0885-8969.
- [7] Lin, D., *et al.*, "Harmonic losses of single-phase induction motors under nonsinusoidal voltages". *IEEE Transactions on Energy Conversion*. 1996, vol.11, n.2, p. 273-286, ISSN 0885-8969.
- [8] Gouws, R., "Source stabilization of a single-phase induction motor pump configuration for a swimming pool in South Africa". En: *Proceedings of the 20th Domestic Use of Energy Conference*, Cape Town, WP, South Africa, April 2012, p. 3-7, ISBN 9781467312325.
- [9] Khan, M. S., *et al.*, "Implementation of a passive tune filter to reduce harmonics in single phase induction motor with varying load". *International Journal of Engineering & Technology*. 2011, vol.11, n.3, p. 204-208, ISSN 2227-524X.
- [10] Cunkas, M.; Sag, T., "Efficiency determination of induction motors using multi-objective evolutionary algorithms". *Advances in Engineering Software*. 2010, vol.41, n.2, p. 255-261, ISSN 0965-9978.
- [11] Sakthivel, V.; *et al.*, "An accurate and economical approach for induction motor field efficiency estimation using bacterial foraging algorithm". *Measurement*, 2011, vol.44, n.4, p. 674-684, ISSN 0263-2241.

AUTORES

Percy R. Viego Felipe

Ingeniero Electricista. Doctor en Ciencias Técnicas. Profesor Titular. Universidad de Cienfuegos "Carlos Rafael Rodríguez", Cuba.

e-mail: pviego@ucf.edu.cu.

Julio R. Gómez Sarduy

Ingeniero Electricista. Doctor en Ciencias Técnicas. Profesor Auxiliar. Universidad de Cienfuegos "Carlos Rafael Rodríguez", Cuba.

e-mail: jgomez@ucf.edu.cu.

Marcos A. de Armas Teyra †

Ingeniero Electricista. Doctor en Ciencias Técnicas. Profesor Titular. Universidad de Cienfuegos "Carlos Rafael Rodríguez", Cuba.

e-mail: marmas@ucf.edu.cu

Vladimir Sousa Santos

Ingeniero Electricista. Máster en Eficiencia Energética. Profesor Asistente. Universidad de Cienfuegos "Carlos Rafael Rodríguez", Cuba.

e-mail: vsousa@ucf.edu.cu