



# Consideraciones sobre el efecto de los armónicos de tiempo en motores trifásicos asincrónicos

Percy R. Viego      Julio R. Gómez  
Vladimir Sousa    Marco A. de Armas

Recibido: Octubre del 2007  
Aprobado: Diciembre del 2007

## Resumen / Abstract

Se analiza el origen de los armónicos de tiempo en los sistemas eléctricos, tanto de los múltiplos integrales como de los no integrales de la fundamental (interarmónicos y subarmónicos). Se consideran las causas y los efectos fundamentales de los mismos sobre las pérdidas en los motores asincrónicos. A partir de un estudio de caso, se evalúa el comportamiento de un motor en presencia de los principales armónicos y a partir del espectro armónico de un circuito del CAI Ciudad Caracas, se ponen en evidencia los efectos negativos que sobre un motor conectado en el mismo tendría esa distorsión armónica. Se establece, que para evaluar estos efectos, resulta conveniente emplear métodos de inteligencia artificial.

Palabras clave: Calidad de la energía, eficiencia energética, motores asincrónicos

The source of time harmonics in electric systems, not only integral multiples, but also non multiples of the fundamental (inter and subharmonics), are analyzed. The main causes and effects on induction motor losses are considered. On the base of a case study, the operation of an induction motor considering the most important harmonics is evaluated. From a harmonic spectrum, the negative effects that would have a motor connected to a circuit of the sugar factory "Ciudad Caracas" are shown. The convenience of using tools based on artificial intelligence for evaluating these effects is remarked.

Key words: Power quality, energy efficiency, induction motors

## INTRODUCCIÓN

El avance y la amplia aplicación de accionamientos de velocidad variable, de equipos electrónicos, microprocesadores, etc., han contribuido a la distorsión de las ondas de tensión y corriente en los sistemas. Esto ha creado la necesidad de una mejor comprensión del impacto de la distorsión armónica en la protección, el control y la instrumentación en los sistemas de potencia, en los equipos industriales e, incluso, en los aparatos electrodomésticos.

Los armónicos son tensiones o corrientes sinusoidales con frecuencias que son múltiplos integrales de la

frecuencia fundamental del sistema. El origen de los armónicos puede ser clasificado de distintas formas.

Una de ellas es, por ejemplo,<sup>1</sup> los creados por:

1. Aparatos de electrónica de potencia, como controladores de fase, e inversores y ciclo-convertidores, que son ampliamente utilizados con los motores asincrónicos en la industria.
2. La aplicación de reactores saturables para aislar los componentes de CD cuando lo requiere la carga.
3. La operación de hornos y soldadura por arco, cargas discontinuas que provocan gran distorsión de las corrientes y armónicos pares en los sistemas de transmisión, distribución y de suministro eléctrico.

4. Operación de bancos de capacitores para la corrección del factor de potencia y la regulación de tensión en los sistemas.
5. Inductores serie para reducir las corrientes de cortocircuito en las líneas de transmisión.

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.

Sus fuentes básicas son: Dispositivos de arco, accionamientos de velocidad variable, convertidores estáticos (particularmente los de frecuencia directos e indirectos), controles de rizado, motores asincrónicos, 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.

Los inductores y capacitores pueden crear problemas de resonancia que magnifiquen los armónicos existentes.

El objetivo de este trabajo es presentar algunas consideraciones generales sobre los efectos de la distorsión armónica en los motores asincrónicos.

## DESARROLLO

### Aspectos generales

Las distorsiones en las ondas de tensión provocan significativos incrementos de las pérdidas, aumentando así la temperatura de estado estable de los devanados. El momento desarrollado es menor que el que existe en condiciones ideales, o lo que es lo mismo, el motor tendrá que tomar más potencia de entrada si se quiere suministrar a la carga una determinada potencia. Aumentan el deterioro del aislamiento y el tiempo de arranque se hace mayor, por lo que los procesos de fatiga se aceleran.

Se provocan momentos armónicos que afectan la vida del aislamiento, de los rodamientos, y de los acoplamientos y reductores.

Cuando una tensión no sinusoidal se aplica a un motor trifásico asincrónico, este tiene un deslizamiento  $s$  correspondiente a la fundamental y varios deslizamientos armónicos  $s_k$ :

$$S_k = \frac{kn_s + (1-s)n_s}{kn_s} = k + \frac{(1-s)}{k} \quad \dots(1)$$

donde:

$n_s$ : Velocidad sincrónica (r/min).

$k$ : Orden del armónico.

De acuerdo con la dirección de rotación de la fmm, los armónicos de secuencia positiva  $4^\circ, 7^\circ, \dots, [3n+1]$ , ( $n = 1, 2, \dots$ ) contribuyen al momento en la dirección positiva. Los de secuencia negativa  $2^\circ, 5^\circ, \dots, [3n+2]$  ( $n = 0, 1, 2, \dots$ ) provocan un momento contrario. Los de secuencia cero  $3^\circ, 6^\circ, \dots, [3n]$  ( $n = 1, 2, \dots$ ) no contribuyen a ningún momento rotatorio. Aunque los armónicos de secuencia positiva se añaden e incrementan el momento positivo y por lo tanto, son beneficiosos, los efectos de calentamiento contrarrestan el efecto positivo.

Es necesario considerar los terceros armónicos y sus múltiplos, porque aunque los motores son siempre conectados en delta o en estrella sin neutro y pudiera suponerse que no serían susceptibles a ellos, esto es cierto solamente si no hay desbalances en la red o asimetrías constructivas como entrehierro no uniforme o diferencias entre los devanados. En esos casos se generan componentes de secuencia positiva y negativa que afectan la operación del motor.<sup>1</sup>

También está presente el efecto combinado de los armónicos de tiempo con los armónicos espaciales, existentes estos en mayor o menor medida en todas las máquinas asincrónicas, debido a la distribución no sinusoidal de la fmm. Esta interacción produce momentos de diferentes secuencias.

De acuerdo con la definición de la IEEE-519-92,<sup>2</sup> la distorsión armónica total de tensión se define por:

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

donde:

$V_k$ : Amplitud del armónico de tensión de orden.

$k$  ( $V$ ) y  $V_1$ : Amplitud de la tensión fundamental ( $V$ ).

La magnitud de la distorsión de la tensión debida a un armónico individual de orden  $k$  se calcula como:

$$FDV_k = \frac{V_k}{V_1} \cdot 100\% \quad \dots(3)$$

El THD y el FDV han sido utilizados para establecer límites del contenido armónico. De esta manera según la IEEE Std. 519-92, en un sistema eléctrico industrial con nivel de tensión inferior o igual a 69 kV, el THDv debe ser menor o igual a 5% y el  $FDV_k$ , a 3%.

Sin embargo, no se especifican límites relacionados con cada armónico específicamente. En la referencia 1 se demuestra la necesidad de considerar los efectos de los armónicos individuales y especialmente aquellos de bajo orden y no solamente el THD. Asimismo en la referencia 3 se hace énfasis en los efectos especialmente dañinos de los subarmónicos.

Con respecto a los armónicos de corriente, es el valor efectivo resultante lo que debe ser tomado en consideración:

$$I_{\text{eff}} = \sqrt{I_1^2 + I_2^2 + I_3^2 + \dots + I_k^2} \quad (A) \quad \dots(4)$$

#### Efecto sobre las pérdidas

Pérdidas de cobre en el estator y en el rotor. Los armónicos de corriente contribuyen a la corriente total de entrada. El efecto pelicular en los conductores del estator puede ser despreciado en pequeñas máquinas con devanados de alambre, pero debe ser considerado cuando la profundidad del conductor del estator es apreciable.

Cuando se calculan las pérdidas en el rotor, el efecto pelicular debe ser tomado en cuenta para todos los tamaños y diseños de motores, debido a que las frecuencias implicadas en el rotor son elevadas.

Para calcular estas pérdidas hay que determinar las impedancias del circuito equivalente para cada armónico  $k$  y entonces las pérdidas en los devanados por fase producto de las corrientes armónicas se calculan como:

$$P_{\text{cuk}} = \sum_{k=2}^{\infty} I_k^2 \cdot \left( r_{sk} + \frac{r_{rk}}{s_k} \right) (W) \quad \dots(5)$$

donde:

$I_k$ ,  $r_{sk}$ ,  $r_{rk}$ , y  $s_k$ : Corriente (A), y resistencia del estator y del rotor ( $\Omega$ ), para cada armónico  $k$ , respectivamente.

Estos parámetros varían con cada armónico en dependencia del tipo, diseño, tamaño y estado de carga de cada máquina, por lo que no se pueden calcular sino en instalaciones experimentales muy complejas.<sup>4</sup>

Resulta importante 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 incremento de otras pérdidas.

Pérdidas de núcleo debidas a los armónicos en el flujo principal. Estas pérdidas ocurren a alta frecuencia, pero los flujos son grandemente amortiguados por las corrientes secundarias inducidas.

Se llega a la expresión, entonces.<sup>3</sup>

$$\frac{\lambda_{\text{MÁX}}}{\lambda_{n\text{MÁX}}} \leq \frac{1 + \sum_{k \neq 1} \frac{V_k}{k \cdot V_1}}{\sqrt{1 + (THD_v)^2}} \quad \dots(6)$$

donde:

$\lambda_{\text{MÁX}}$ : Valor máximo del flujo concatenado por fase.

$\lambda_{n\text{MÁX}}$ : Valor máximo del flujo sinusoidal concatenado por fase.

En la referencia 3 se plantea que para los espectros de tensión típicos en sistemas eléctricos, donde la distorsión de los armónicos superiores  $FDV < 5\%$ , la relación dada por la ecuación (6) 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 puede llegar a un 20 %, y producir eventualmente saturación.

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.<sup>5</sup> Sin embargo, la vibración en el rotor originada por los momentos pulsantes causados por la interacción entre los armónicos de secuencia positiva y negativa, aumenta las pérdidas por fricción en los rodamientos<sup>1</sup> y reduce su vida útil, incrementando así grandemente la probabilidad de fallos mecánicos.

Pérdidas adicionales. Los armónicos de tensión afectan marcadamente estas pérdidas, que pueden significar hasta un 20 % de las totales.<sup>6</sup> Las pérdidas adicionales son difíciles de determinar. En la referencia 5 (también lo establecen otros autores) se proponen expresiones que requieren conocer coeficientes empíricos que dependen de los diseños de las máquinas.

#### Comportamiento de los motores asincrónicos en presencia de armónicos

Para estudiar el efecto individual de los armónicos<sup>1</sup> desde el 2° al 13° sobre el comportamiento de estas máquinas, se llevaron a cabo pruebas experimentales con FDV de 5, 10 y 15 %, en un motor trifásico de 3 hp, 220 V, a potencia constante. En las tablas de la 1 a la 3 se muestran los resultados clasificados por la secuencia de los armónicos y el FDV.

Como se muestra en las tablas, con todos los armónicos individuales y todos porcentajes de FDV, la corriente de entrada aumenta, el factor de potencia baja y la eficiencia se reduce. Sin embargo, la magnitud del efecto difiere en dependencia del orden del armónico, de su secuencia y del FDV.

El aumento de las pérdidas con cualquier condición armónica lleva a daños no solo en los devanados, sino también en las cuñas y rodamientos, reduciendo la vida útil.

Los picos de tensión causados por la conmutación o los pulsos recurrentes deterioran el dieléctrico. La vibración también lo hace por los efectos de cizallamiento y desgranamiento que provocan.

En los diseños con entrehierros más reducidos, si el eje del rotor no tiene la suficiente rigidez, la vibración puede provocar el torcimiento del eje y el rotor rozará con el estator.

El impacto de los subarmónicos sobre la vida útil puede ser dramático. En la referencia 3 se plantea un caso de un motor de 100 hp en que para  $k = 0,1$ , una magnitud de este armónico de 0,25 % causa una pérdida de vida útil del 17 %.

#### Estudio de un caso

En la figura 1 se observa una sección de un espectro armónico tomado de una fase del circuito bomba de lavado 1 del CAI Ciudad Caracas.<sup>7</sup> En la tabla 4 se muestran las magnitudes de las tensiones de los armónicos y el FDV que tienen mayor significación.

Puede observarse que los armónicos 5° y 11° (secuencia negativa) tienen valores que se aproximan al FDV del 5% mostrados en las tablas de la 1 a la 3, y que ellos, junto con los otros restantes de menor magnitud, provocarán efectos negativos marcados sobre el comportamiento de máquinas conectadas a este circuito. Véase que, aunque reducido, un armónico par, el 4°, está presente.

**Tabla 1**  
Corriente de entrada de un motor asincrónico con varios FDV a varios órdenes de armónicos

Secuencia positiva	FDV (%)		
	5	10	15
1	8,498	8,498	8,498
1 + 4	8,781	8,858	9,028
1 + 7	8,665	8,742	8,893
1 + 10	9,595	8,625	8,707
1 + 13	8,547	8,596	8,683
Secuencia negativa	FDV (%)		
	5	10	15
1	8,498	8,498	8,498
1 + 2	8,882	9,282	9,820
1 + 5	8,721	8,753	8,909
1 + 8	8,636	8,664	8,771
1 + 11	8,578	8,620	8,702
Secuencia cero	FDV (%)		
	5	19	15
1	8,498	8,498	8,498
1 + 3	8,640	8,686	8,777
1 + 6	8,610	8,639	8,766
1 + 9	8,574	8,606	8,695
1 + 12	8,555	8,601	8,679

**Tabla 2**  
Factor de potencia de un motor asincrónico con varios FDV a varios ordenes de armónicos

Secuencia positiva	FDV (%)		
	5	10	15
1	82, 970	82, 970	82,970
1+ 4	81, 465	80, 709	79, 542
1+ 7	81, 701	81, 480	81, 241
1+ 10	82, 236	82,019	81, 938
1+13	82,699	82, 305	82, 112
Secuencia negativa	FDV (%)		
	5	10	15
1	82, 970	82, 970	82,970
1+ 2	81, 310	79, 283	77, 528
1+ 5	81, 507	80, 730	80, 144
1+ 8	82, 197	81, 939	81, 399
1+ 11	82, 211	82, 003	81, 689
Secuencia cero	FDV (%)		
	5	19	15
1	82,970	82,970	82, 970
1+ 3	81, 653	81, 308	81, 123
1+ 6	81,875	81,508	81, 349
1+ 9	82, 309	82, 050	81,844
1+12	82, 405	82, 164	81,906

Por lo ya expresado, un estudio sobre el efecto de un espectro armónico como ese en la operación de máquinas asincrónicas, no puede realizarse con procedimientos convencionales, especialmente si se requieren trabajar in situ. El caso se complica aún más si se está en presencia de desbalances de tensión.<sup>7</sup> La solución debe buscarse a través de métodos de inteligencia artificial.<sup>7</sup>

**Tabla 3**  
Eficiencia de un motor asincrónico, con varios FDV a varios ordenes de armónicos

Secuencia positiva	FDV (%)		
	5	10	15
1	83, 152	83,152	83,152
1 + 4	81, 578	81,136	80,663
1 + 7	82,406	81,957	81,013
1 + 10	82, 774	82,331	82, 055
1 + 13	82,830	82 642	82,310
Secuencia negativa	FDV (%)		
	5	10	15
1	83, 152	83, 152	83,152
1 + 2	81, 032	79, 670	77, 062
1 + 5	82,017	81, 408	80,960
1 + 8	82,237	82,072	81, 871
1 + 11	82,816	82,460	82,094
Secuencia cero	FDV (%)		
	5	19	15
1	83,152	83,152	83,152
1 + 3	82,232	82,043	81,281
1 + 6	82,574	82,176	81, 986
1 + 9	82, 514	82, 461	82,105
1 + 2	82,788	82,563	82,167



Sección de un espectro armónico de una fase del circuito bomba de lavado 1 del CAI Ciudad Caracas.  
( $V_{AB} = 239,4 \text{ V}$ ;  $V_1 = 237 \text{ V}$ ; THD = 10,27 %)

**Tabla 4**  
**Magnitudes de los armónicos y del FDV que tienen mayor significación**

k	Tensión (V)	FDV (%)
1	437	100,00
4	332	0,76
5	20,50	4,69
7	10,08	231
11	18,09	4,14
13	733	1,68
17	15,95	365
23	12,81	293
26	3,7	0,85
29	11,52	2,64
30	3,6	0,82

## CONCLUSIONES

El impetuoso avance de la aplicación de la electrónica, en especial la de potencia, en los equipos utilizados en los sistemas eléctricos, así como la presencia de otras cargas no lineales, provocan armónicos e interarmónicos que afectan el comportamiento de los motores asincrónicos.

Los armónicos de tensión (particularmente los de bajo orden y los subarmónicos) producen un incremento de las pérdidas, disminución del factor de potencia, aumento de la vibración y reducción de la vida útil en estos motores, lo que hace imprescindible una valoración adecuada.

Un caso en que se analizan los efectos de los armónicos individuales, incluyendo el tercero y sus múltiplos (que aparecen cuando hay desbalances y asimetrías constructivas en los motores), evidencia que la eficiencia y el factor de potencia pueden reducirse varios puntos porcentuales cuando aparecen porcentajes altos de armónicos, especialmente de bajo orden.

El espectro armónico de un ramal del CAI "Ciudad Caracas", demuestra las importantes afectaciones que tendrán los motores conectados a ese circuito.

## REFERENCIAS

1. **Chin-Yin, Lee and Lee Wei Jen:** "Effects of Nonsinusoidal Voltages on the Operation Performance of a Three-Phase Induction Motor", IEEE Trans. on Energy Conversion, Vol. 14, No. 2, pp. 193-201, June, 1999.
2. "IEEE Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Systems", IEEE Industry Applications Society/Power Engineering Society, IEEE Std. 519-1992, New York, IEEE Press, 1993.
3. **Abreu, J. P. G. de and A. E. Emanuel:** "Induction Motor Thermal Aging Caused by Voltage Distortion and Imbalance: Loss of Useful Life and its Estimated Cost", IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 38, No. 1, pp. 12-20, January/February, 2002.
4. **García, M.:** "Eficiencia de los motores asincrónicos en presencia de ondas no sinusoidales", Tesis de Maestría, Centro de Estudios de Energía y Medio Ambiente, Universidad de Cienfuegos, Cienfuegos, 2004.
5. **Sen, P. K. and H. Landa:** "Derating of Induction Motors Due to Waveform Distortion", IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 26, No. 6, pp. 1102-1107, November/December, 1990.
6. **Andreas, J. C.:** Energy-Efficient Electric Motors. Selection and Application, Second Edition, Marcel Dekker, Inc., New York, 1992.
7. **Gómez, J. R.:** "Determinación de la eficiencia de los motores asincrónicos con tensiones desbalanceadas en condiciones de campo", Tesis de Doctorado, Universidad Central de Las Villas, Santa Clara, 2006.

## AUTORES

### **Percy R. Viego Felipe**

Ingeniero Electricista, Doctor en Ciencias Técnicas, Profesor Titular, Centro de Estudios de Energía y Medio Ambiente, Universidad de Cienfuegos, Cienfuegos, Cuba  
e-mail:pviego@ucf.edu.cu

### **Julio R. Gómez Sarduy**

Ingeniero Electricista, Doctor en Ciencias Técnicas, Asistente, Centro de Estudios de Energía y Medio Ambiente, Universidad de Cienfuegos, Cienfuegos, Cuba  
e-mail:jgomez@ucf.edu.cu

### **Vladimir Sousa Santos**

Ingeniero Electricista, Máster en Eficiencia Energética, Instructor, Departamento de Mecánica, Universidad de Cienfuegos, Cienfuegos, Cuba  
e-mail:vsousa@ucf.edu.cu

### **Marcos A. de Armas Teyra**

Ingeniero Electricista, Doctor en Ciencias Técnicas, Asistente, Centro de Estudios de Energía y Medio Ambiente, Universidad de Cienfuegos, Cienfuegos, Cuba  
e-mail:jgomez@ucf.edu.cu