

Efectos de los armónicos en los motores de inducción: una revisión

John Grajales, José Ramírez* y Diego Cadavid***

(Recibido el 4 de diciembre de 2002. Aceptado el 15 de junio de 2003)

Resumen

El comportamiento de las máquinas de inducción varía cuando son alimentadas con fuentes que contienen tensiones armónicas. Este documento presenta una revisión acerca de las condiciones de operación y efectos de los armónicos de tensión en los motores de inducción trifásicos. Básicamente se revisa: modelo, vida útil, aumento de la temperatura, pérdidas adicionales, envejecimiento térmico, factor de potencia, eficiencia, vibraciones y ruidos, torques pulsantes y pérdida de capacidad de potencia.

----- *Palabras clave:* armónicos, motor de inducción y efectos.

Effects of harmonics in the induction motors: a review

Abstract

The behavior of induction machines varies when they are feed with sources having harmonics tension. This paper shows a view about the conditions operation and the effects of the harmonics tension, in the trifasical induction motors. Basically, will be checked: model, useful life, temperature, additional loses thermal old, power factor, efficiency, vibrations and noises, pulses torques and derated.

----- *Key words:* harmonics, induction motors and effects.

* Estudiante de Ingeniería Eléctrica. Integrante del Grupo de Investigación en Manejo Eficiente de la Energía Eléctrica, GIMEL.Universidad de Antioquia. luisa18@uolpremium.com.

** Profesor de Ingeniería Eléctrica. Integrante del Grupo de investigación en Manejo Eficiente de la Energía Eléctrica, GIMEL. Universidad de Antioquia. dcadavid@udea.edu.co.

Introducción

Los armónicos son corrientes o tensiones, o ambos, presentes en un sistema eléctrico, con frecuencia múltiplo de la frecuencia fundamental. Con el creciente aumento en el uso de cargas no lineales (procedentes de la electrónica de potencia), se han empezado a tener problemas en las instalaciones eléctricas, debido a generación de armónicos de corriente y tensión en el sistema eléctrico. Entre éstos están sobrecalentamiento de cables, transformadores y motores, corrientes excesivas en el neutro y fenómenos de resonancia entre los elementos del circuito [1].

El incremento de la distorsión armónica de tensión puede causar un funcionamiento incorrecto de muchos equipos (especialmente los menos robustos) que han sido diseñados para operar en condiciones normales (poca distorsión armónica).

En los sistemas de potencia, los motores son una componente muy representativa de la carga y se usan ampliamente en instalaciones industriales y comerciales. Los motores de inducción son sensibles a los armónicos y se ven sometidos a todas las variaciones de la fuente de potencia, lo que afecta su funcionamiento y características de operación. Los efectos de la distorsión armónica sobre el funcionamiento del motor han sido tratados extensivamente en la literatura. Este documento presenta una breve revisión de los efectos de los armónicos de tensión en motores de inducción.

Distorsión armónica

La fuente de tensión no sinusoidal puede expresarse en forma general como:

$$v(t) = \sqrt{2} \cdot \left[V_1 \text{sen}(wt) + \sum_{n=2}^{\infty} V_n \text{sen}(nwt + \theta_n) \right] \tag{1}$$

Donde V_1 es la tensión fundamental, V_n representa la tensión armónica de orden n y θ_n es el ángulo de fase.

Los armónicos de orden 4, 7, ..., $[3k + 1]$, con $k = 1, 2, \dots$, son de secuencia positiva; los armónicos de orden 2, 5, ..., $[3k + 2]$, son de secuencia negativa; los armónicos 3, 6, ..., $[3k]$, son de secuencia cero.

Los subarmónicos se definen para frecuencias menores de la fundamental. Por ejemplo $n = 0,1$, lo que equivale a 6 Hz, tomando como frecuencia fundamental 60 Hz.

El contenido de distorsión armónica de tensión total e individual, lo define la IEEE Std 519 [2] como:

$$THDv = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{50} V_n^2}}{V_1} \times 100\% \tag{2}$$

$$THDv_indi = \frac{V_n}{V_1} \times 100\% \tag{3}$$

Donde: $THDv$ es la distorsión armónica total de tensión y $THDv_indi$ es la distorsión armónica individual de tensión.

Los límites para la distorsión armónica de tensión total e individual en instalaciones industriales recomendados por la IEEE Std 519 [2] son de 5 y 3%, respectivamente.

Efectos de los armónicos en el motor de inducción

El efecto de los armónicos en el motor de inducción, puede ser evaluado utilizando el principio de superposición [3] (véase figura 1).

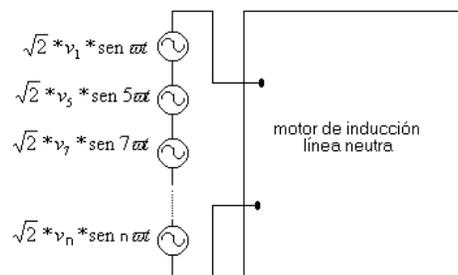
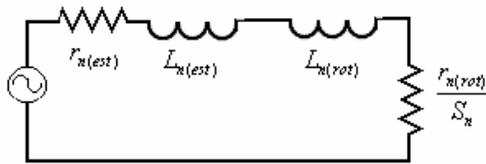


Figura 1 Modelo de la fuente no sinusoidal

El circuito equivalente del motor de inducción para cualquier armónico n es, aproximadamente, el de rotor bloqueado (véase figura 2). Cuando $n = 1$ corresponde al circuito a frecuencia fundamental sin tener en cuenta las pérdidas en el núcleo.



Donde $r_{n(est)}$ es la resistencia del estator al armónico n , $L_{n(est)}$ es la inductancia del estator al armónico n , $r_{n(rot)}$ es la resistencia del rotor al armónico n , $L_{n(rot)}$ es la inductancia del rotor al armónico n y S_n es el deslizamiento al armónico n . Los detalles de las variaciones de estos parámetros se explican en la referencia [3].

Figura 2 Modelo del motor a frecuencias armónicas

Pérdidas

La presencia de armónicos, incrementa las pérdidas en el motor. Las pérdidas adicionales debi-

do a los armónicos ($P_{armónico}$) pueden ser calculadas aproximadamente con la expresión de P. G. Cummings [4]:

$$P_{armónica} \approx P_{nominal} \cdot \Delta W \tag{4}$$

$$\Delta W \approx 35 \sum_{n=2}^{\infty} \frac{1}{n^2} \left[\frac{V_n}{V_1} \right]^2 \tag{5}$$

Donde: $P_{nominal}$ es la pérdida de potencia a carga nominal.

E. F. Fuchs [5] publicó otra expresión que tiene en cuenta los armónicos de orden menor al quinto:

$$\Delta W \approx K_2 \sum_{n=2}^{\infty} \frac{1}{n^k} \left[\frac{V_n}{V_1} \right]^l \tag{6}$$

Donde los exponentes $k = 0,7$ a $1,2$ y $l = 1,2$ a $2,0$. El factor K_2 es función de los parámetros del motor dados en [6]. La referencia [6] muestra los resultados de la verificación de la ecuación (4), la cual se presenta en la tabla 1.

La tabla 1 muestra que para efectos prácticos, la ecuación (4) se puede considerar.

Tabla 1 Medida y cálculo de pérdidas armónicas [6]

Motor de 3,8 hp, 220 V y 60 Hz							
Prueba sinusoidal $P_{nominal} = 1.303$ W							
Pérdidas totales = 1.957 W							
Pérdida armónica: $P_{armónica} = 654$ W							
Tensión de prueba (% de la fundamental)							
$n = 5$	7	11	13	17	19	23	25
$V_n/V_1 = 20$	14,3	9,1	7,7	5,9	5,3	4,4	4,0
$n = 29$	31	35	37	41	43	47	49
$V_n/V_1 = 34$	3,2	1,9	2,7	2,4	2,3	2,1	2,0
Cómputo de (4) $P_{armónica} = 575$ W Error = -12%							

Aumento de temperatura

El contenido de armónicos incrementa la temperatura en el motor. La figura 3 muestra el incremento de temperatura en el motor de inducción monofásico y en el trifásico en función del factor armónico [5]. Se observa que los motores monofásicos son más sensibles que los trifásicos.

La referencia [5] informó que los armónicos de menor orden tienen efecto mayor que los de alto orden. En [7] se mostró que, para una distorsión de 5% de tensión, el segundo armónico tiene efecto mayor en el incremento de temperatura que el quinto armónico con este mismo valor. En [10] se encontró que, para una distorsión del 10% de tensión, los armónicos de secuencia negativa tienen efecto mayor que los armónicos de secuen-

cia positiva. Además, los armónicos menores al quinto tienen efecto mayor en el incremento de la temperatura para una misma distorsión.

Pérdida de vida útil

En las referencias [8, 9] se demostró que la susceptibilidad de los motores a la distorsión de tensión, depende del tamaño y diseño del motor. La figura 4 muestra cómo los subarmónicos tienen efecto dramático en el envejecimiento térmico en un motor de 100 hp. No hay una curva universal de pérdida de capacidad para los motores, ya que el tamaño y el diseño afectan su pérdida de capacidad ante la distorsión armónica y desbalance [8, 9]. A medida que aumenta la distorsión, se incrementa la pérdida de vida útil en el motor.

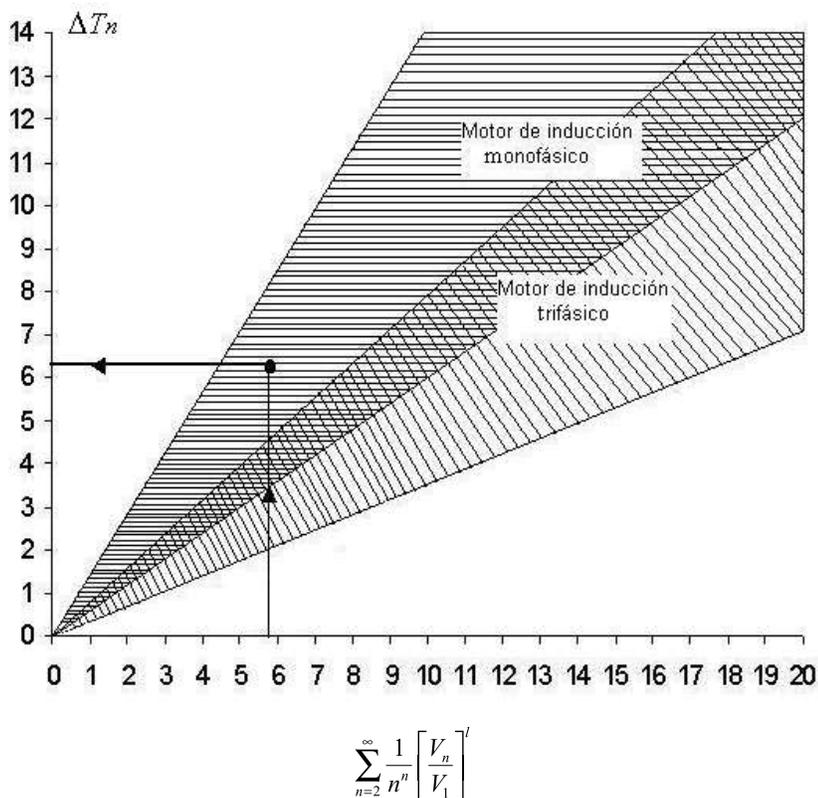


Figura 3 Aumento de temperatura adicional (o pérdidas) versus función del factor armónico

La figura 4 muestra que con $n = 0,1 p$ (donde n significa de secuencia negativa y p de secuencia positiva), de magnitud 25%, se causa el mismo envejecimiento térmico que un 6% del quinto armónico (figura 5). Ambos causan 18% de pérdida de vida útil.

El porcentaje de vida útil (% ΔL), menor a 40% de la vida nominal, puede calcularse aproximadamente por [9]:

$$\% \Delta L \approx a_u \cdot (\% D_{desbalance}) + \sum_n a_n \cdot (\% THDv_indi)^2 \quad (7)$$

Donde a_u y a_n son coeficientes de desbalance y distorsión, respectivamente, y varían dependiendo del tamaño del motor; los valores están dados en la referencia [8].

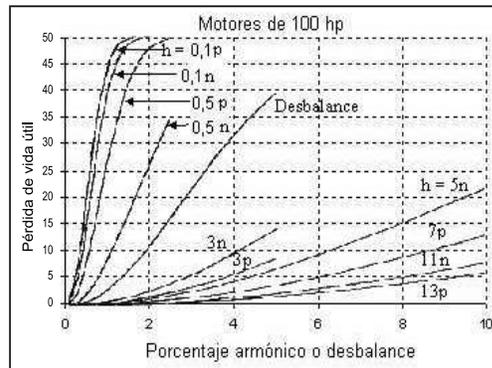


Figura 4 Pérdida de vida útil del motor de 100 hp

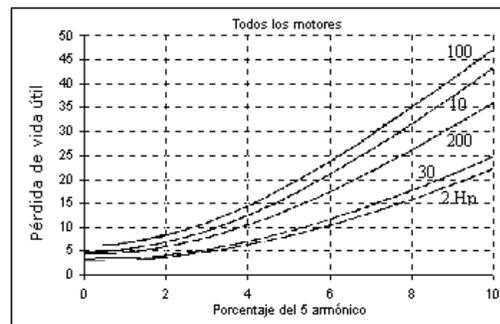


Figura 5 Pérdida de vida útil de varios motores + 1% desbalance

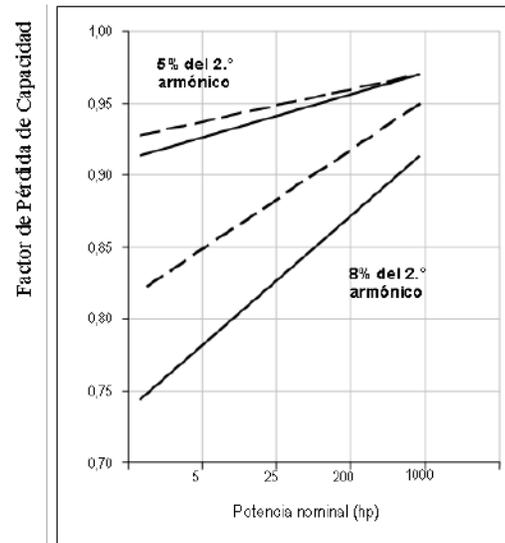
Pérdida de capacidad

La figura 6 [7] muestra la pérdida de capacidad para diferentes tamaños de motores, con aislamiento clase B, considerando que sólo existe el segundo armónico. Los motores de menor tamaño son más sensibles que los de mayor tamaño: a mayor distorsión, mayor es la pérdida de capacidad.

La pérdida de capacidad se calcula con [7]:

$$P_{pérdida_capacidad} = 1 - \frac{P_{salida,n}}{P_{salida}} \quad (8)$$

Donde: $P_{salida,n}$ es la potencia de salida del motor cuando se alimenta con una fuente no sinusoidal, P_{salida} es la potencia de salida del motor cuando se alimenta con una fuente sinusoidal, $P_{salida,n}/P_{salida}$ es el factor de pérdida de capacidad.



Líneas punteadas: motor enfriado radialmente y protegido contra goteo

Líneas sólidas: motor enfriado en abanico y encerrado totalmente.

Figura 6 Pérdida de capacidad debido a distorsión de tensión armónica.

Ruido acústico y torques pulsantes

Las fuentes de ruido acústico pueden dividirse en cuatro categorías: magnético, mecánico, aerodinámico y electrónico [11] (figura 7).

En general, la contribución de los armónicos al torque promedio es pequeña, aproximadamente 4% de reducción [3]. En sistemas industriales, los armónicos más importantes son el quinto, el séptimo y el undécimo. Generalmente, las fuerzas electromotrices de esos armónicos son suficientemente altas para provocar ruido considerable y aumento de los torques pulsantes, este incremento es significativo si el orden del armónico está cercano a las frecuencias naturales del estator [11, 12].

Factor de potencia y eficiencia

La figura 8 muestra la variación del factor de potencia en función de la distorsión armónica individual [10]. Se observa que a mayor distorsión de tensión, más bajo es el factor de potencia, y que los armónicos de bajo orden tienen efecto mayor que los de alto orden para un valor dado de distorsión armónica. Los armónicos de secuencia negativa de menor orden (menor al quinto) tienen efecto mayor en el decrecimiento del factor de potencia que los de secuencia positiva y de secuencia cero.

La figura 9 muestra la variación de la eficiencia en función de la distorsión armónica individual [10]; el comportamiento es similar al factor de potencia.

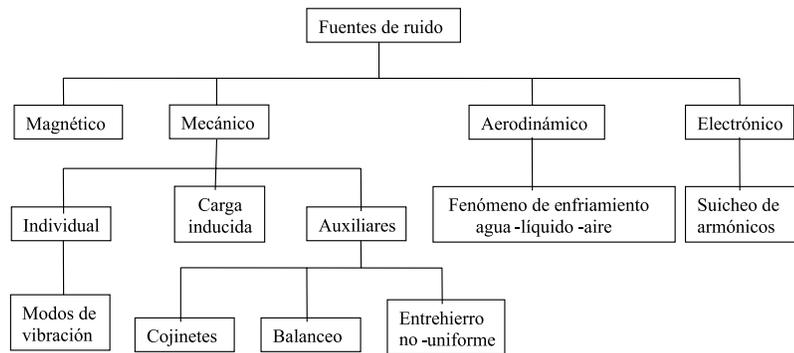


Figura 7 Clasificación de las fuentes de ruido en motores eléctricos [10]

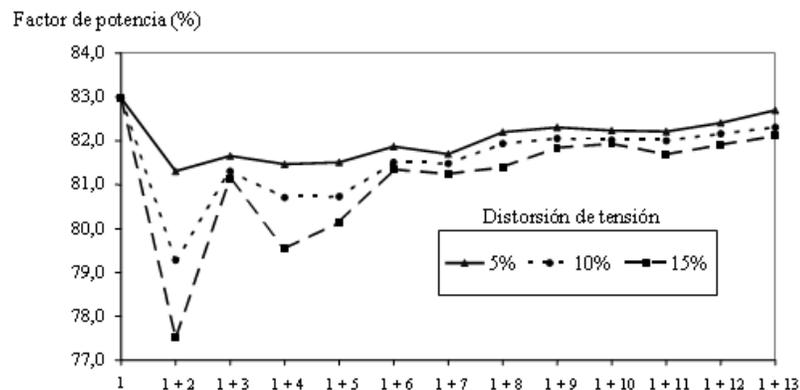


Figura 8 Factor de potencia en función de la distorsión armónica

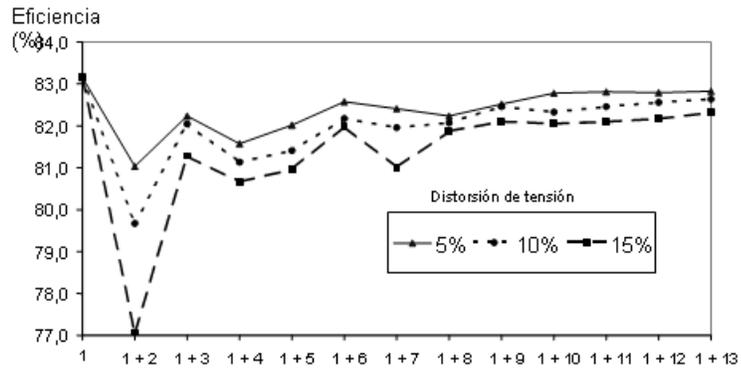


Figura 9 Eficiencia en función de la distorsión armónica

Límites de la distorsión armónica

La IEEE Std 519 de 1992 limita la distorsión armónica de tensión total a 5%, e individual a 3%. E. F. Fuchs [5] presenta unos límites para evitar calentamientos y pérdidas de vida útil en los motores (véase tabla 2). En ésta, los límites para los armónicos de secuencia negativa, son muy altos; de acuerdo con los resultados descritos anteriormente, los niveles de armónicos individuales pares y de secuencia negativa se deben limitar a menos del 3%, sobre todo los de menor orden.

Conclusiones

La distorsión armónica de tensión puede usarse como una medida de las pérdidas y el aumento de la temperatura de los motores eléctricos. Las condiciones de operación y vida útil del motor se ven afectadas cuando hay presencia de armónicos.

Los subarmónicos tienen efecto dramático en los motores. Un subarmónico de 6 Hz de secuencia positiva, por ejemplo, reduce la vida útil del motor en más de 60%.

Los costos de operación, el calentamiento y la pérdida de vida útil que resultan a partir de la polución eléctrica pueden minimizarse, al disminuir la distorsión armónica de tensión, empleando diferentes técnicas, como: utilizar convertidores

Tabla 2 Límites de la distorsión armónica de tensión [5]

h	$\left[\frac{V_h(\%) }{V_{60\text{ Hz}} } \right]_{1\Phi} (\%)$	$\left[\frac{(\%)_h }{V_{60\text{ Hz}} } \right]_{3\Phi} (\%)$
1	100,00	100,00
2	0,50	0,50
3	4,00	2,00
4	0,30	0,50
5	3,00	5,00
6	0,20	0,20
7	2,00	3,50
8	0,20	0,20
9	1,00	0,30
10	0,10	0,10
11	1,50	1,50
12	0,10	0,10
13	1,50	1,00
14	0,10	0,05
15	0,50	0,10
16	0,05	0,05
17	1,00	0,50
18	0,05	0,01
19	1,00	0,50
Armónicos de alto orden < 0,5%		

trifásicos de más de seis pulsos, usar transformadores con corrimiento de fase, combinar cargas monofásicas con cargas trifásicas, utilizar reactancias de línea a la entrada de los convertidores o usar filtros resonantes y filtros activos.

Los armónicos de menor orden tienen un efecto mayor en la reducción de la eficiencia, la vida útil, el factor de potencia y las pérdidas en los motores que los armónicos de mayor orden.

Los armónicos de menor orden y de secuencia negativa tienen un efecto mayor que los de secuencia positiva y secuencia cero. Los motores con alto contenido de armónicos de tensión sufrirán de un incremento en la vibración y en los torques pulsantes.

Referencias

1. IEEE Report. "The effects of power system harmonics on power system equipment and loads". En: IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems. Vol. PAS-104. No. 9. Septiembre, 1985. pp. 2555-2563.
2. 14. IEEE recommended practices and requirements for harmonics control in electrical power systems. ANSI/IEEE Standard 519. 1992.
3. Klingshirn, E. A. y H. E. Jordan. "Polyphase induction motor performance and losses on nonsinusoidal voltage sources". En: IEEE Trans. Power App. Syst. PAS-87. Marzo, 1968. pp. 624-631.
4. Cummings, P. G. "Estimating the effect of systems harmonics on losses and temperature rise of squirrel-cage motors". En: IEEE, 32nd Petroleum and Chemical Ind. Conf. Houston, TX. Sept., 1985.
5. Fuchs, E. F. *et al.* "Aging of electrical appliances due to harmonics of the power systems voltage". En: IEEE Trans. On Power Delivery. No. 3. July, 1986. pp. 301-07.
6. Emanuel, A. E. "Estimating the effects of harmonic voltage fluctuations on the temperature rise of squirrel-cage motors". En: IEEE Trans. On Energy Conversion. Vol. 6. No. 1. March, 1991.
7. Sen, P. K y H. Landa. "Derating of induction motors due to waveform distortion". En: IEEE Trans. Ind. Applicat. Vol. 26. No. 6. Nov./Dec., 1990.
8. Abreu, J. P. y A. E. Emanuel. "Induction motor thermal aging caused by voltage distortion and imbalance: Loss of useful life and estimated cost", IEEE trans. on Industry Applications, Vol. 38, No. 1, January/February 2002.
9. J. P. Abreu and A. E. Emanuel. "Induction motor loss of life due to voltage imbalance and harmonics: A preliminary study". En: Harmonics and Quality of Power, 2000. Proceedings. Ninth International Conference. Vol. 1. 2000.
10. Lee, Ching-Yin and Wei-Jen Lee. "Effects of nonsinusoidal voltage on the operation performance of a three-phase induction motor". En: IEEE Trans. On Energy Conversion. Vol. 14. No. 2. June, 1999.
11. Vijayraghavan, P. y R. Krishanan. "Noise in electric machines: A review". En: IEEE trans. on Industry Applications. Vol. 35. No. 5. Sep./Oct., 1999.
12. Stuart, R. and K. M. Hebbbar, "Torque pulsations in induction motors with inverter drives". En: IEEE Trans. on Industry and General Applications. Vol. 7. No. 2. March/April, 1971.
13. Barros, J. *et al.* "Effects of harmonics in voltage supply on the performance of induction motors". International Conference on Electrical Machines. August 28-30, 2000.