

Effects of single phase sinusoidal voltage fluctuations related to flicker limits on three phase induction motors

Carlos Cruz, Julio Molina

*Departamento de Potencia, Escuela de Ingeniería Eléctrica, Facultad de Ingeniería, Universidad Central de Venezuela. Apartado Postal 47456. Caracas 1041-A, Venezuela.
carloscruzd@gmail.com, julio.molina@ucv.ve*

Abstract

Rapid voltage fluctuations may cause lamp flicker. Therefore, in some standards these voltage fluctuations have been regulated through the use of a limit value for the short term flicker severity index (P_{st}). The purpose of this work is to determine, using computer simulations, how the three phase induction motor is affected when a sinusoidal voltage fluctuation is present in one of the phases of the voltage source. The voltage fluctuation considered is such that produces a short term flicker severity index equal to one, which corresponds to the limit value. The motor is modeled using its dynamic equations, and the variables studied are torque and speed. The motivating drive for this research, is to provide new criteria, which in the future may help review the regulations on voltage fluctuations in the power quality standards.

Keywords: voltage fluctuation, flicker, induction motor, power quality.

Efecto de las fluctuaciones de tensión sinusoidales monofásicas relacionadas con límites de flicker sobre motores de inducción trifásicos

Resumen

Las fluctuaciones rápidas de tensión pueden ocasionar el efecto flicker en las lámparas. Por lo tanto, en algunas normativas se han regulado estas fluctuaciones, utilizando un valor límite para el índice de severidad de flicker de corta duración (P_{st}). El objeto de este trabajo es determinar, a través de simulaciones, cómo resulta afectado el motor de inducción trifásico cuando existe una fluctuación de tensión sinusoidal en una de las fases de la fuente de alimentación. La fluctuación de tensión utilizada es tal, que produce un índice de severidad de flicker de corta duración igual a uno, que corresponde al valor límite. El motor es modelado por medio de sus ecuaciones dinámicas, y las variables estudiadas son el par y la velocidad. La motivación de esta investigación, es aportar criterios que en el futuro ayuden a revisar las regulaciones a las fluctuaciones de tensión en las normas de calidad del servicio eléctrico.

Palabras clave: fluctuación de tensión, flicker, motor de inducción, calidad del servicio eléctrico.

Introducción

Uno de los efectos producidos por las fluctuaciones rápidas de tensión, es el fenómeno lumínico conocido como flicker. El flicker está relacionado con la calidad del servicio eléctrico, ya

que puede producir molestia visual en las personas sometidas a él. Debido a esto, en algunas normas, como las Normas de Calidad del Servicio de Distribución de Electricidad de Venezuela [1], las fluctuaciones de tensión se encuentran sometidas a regulación. Esto se realiza a través del in-

dice de severidad de flicker de corta duración, también conocido como P_{st} . El valor máximo que puede alcanzar el P_{st} es uno (1), ya que este valor constituye el umbral de irritabilidad asociado a la fluctuación máxima de luminancia que puede ser soportada sin molestia [2-4].

La regulación a las fluctuaciones rápidas de tensión se basa únicamente en el fenómeno lumínico del flicker, es decir, no se toman en cuenta los posibles efectos de las fluctuaciones sobre otros equipos conectados a la red eléctrica. Conocer los efectos de las fluctuaciones sobre diversos equipos, en este caso el motor de inducción trifásico, permitirá construir una regulación con una mayor amplitud o diversidad de criterios, basados en argumentación técnica, que otorgará una mayor flexibilidad a la normativa. Por ejemplo, supongamos un escenario futuro, en el cual las lámparas presenten inmunidad ante las fluctuaciones rápidas de tensión y su uso sea generalizado, entonces cabría plantear la interrogante sobre si es necesario continuar con la regulación; quizás desde el punto de vista de las lámparas no, pero sí desde el punto de vista de otros equipos, y esta respuesta la puede dar una normativa con una mayor diversificación, como la que se está planteando. En el caso de que luego de realizados los estudios, resulte que el motor no es afectado en gran medida por las fluctuaciones asociadas a límites de flicker, entonces no sólo se dispondrá de una argumentación técnica para realizar tal afirmación, sino que se abre la posibilidad para cambiar los límites de referencia para las fluctuaciones (tomando en cuenta al motor), y ser establecidos, por ejemplo, para mayores magnitudes de fluctuación. Con el objeto de ofrecer aportes en este sentido, en el trabajo aquí presentado se estudian los efectos de las fluctuaciones de tensión sinusoidales monofásicas, relacionadas con límites de flicker, sobre el motor de inducción trifásico.

El motor de inducción fue modelado por medio de sus ecuaciones dinámicas en un sistema de coordenadas ortogonales, y luego se realizó un estudio del espectro de frecuencias de las curvas del par y de la velocidad en régimen permanente.

Como antecedente, se puede citar el trabajo realizado por Medeiros y De Oliveira [5], en el cual los autores observaron pequeñas oscilaciones en

el par y en la velocidad del motor. Sin embargo, en el trabajo aquí presentado, se analizó el problema de forma distinta, por medio del estudio del espectro de frecuencias. Además, las características de las fluctuaciones de tensión fueron obtenidas por medio de un flickermetro implementado en MatLab [6] según la Norma IEC 61000-4-15 [7].

Caracterización de la fluctuación de tensión

Una fluctuación de tensión sinusoidal, se representa matemáticamente como una onda modulada en amplitud:

$$v(t) = V_p \text{sen}(2\pi f_p t) \left[1 + \frac{1}{2} \Delta V \text{sen}(2\pi f_m t) \right] \quad (1)$$

donde V_p es la tensión máxima de la onda fundamental, f_p es la frecuencia de la onda fundamental, f_m es la frecuencia de la onda moduladora y ΔV representa la amplitud relativa de la fluctuación (tensión pico-pico de la onda moduladora referida a V_p). Desarrollando la ecuación (1), se llega a la siguiente ecuación:

$$v(t) = V_p \text{sen}(2\pi f_p t) + \frac{1}{4} (\Delta V) V_p \cos[2\pi(f_p - f_m)t] - \frac{1}{4} (\Delta V) V_p \cos[2\pi(f_p + f_m)t] \quad (2)$$

De la ecuación (2), se observa que la fluctuación de tensión tiene tres componentes de frecuencia, una a la frecuencia fundamental, otra que corresponde a la diferencia entre la frecuencia fundamental y la frecuencia moduladora, y otra que corresponde a la suma de la frecuencia fundamental y la frecuencia moduladora. Ahora, es necesario determinar los valores correspondientes a ΔV y f_m de la fluctuación, que producen un P_{st} igual a uno. En el presente trabajo se consideraron dos casos de estudio, correspondientes a las fluctuaciones cuyas características se presentan en la Tabla 1 y que fueron obtenidas a partir de la simulación del flickermetro.

La onda de tensión correspondiente a la fluctuación dada por la ecuación (2), se muestra en la Figura 1. Para realizar este gráfico, se utilizaron unas características de fluctuación correspondientes al caso 2 de la Tabla 1 y una tensión monofásica de 127.0171 V.

Tabla 1
Características de las fluctuaciones
de tensión

Caso	ΔV (%)	f_m (Hz)
1	0,84	15
2	2,090	25

Características del motor

Para realizar el estudio, se utilizó un motor de inducción trifásico, conexión estrella, de frecuencia nominal 60 Hz y de cuatro polos, cuyos datos nominales y parámetros se muestran en la Tabla 2.

En la Tabla 2, r_s es la resistencia por fase del estator, r_r es la resistencia por fase del rotor, X_{is} es la reactancia de dispersión por fase del estator, X_{ir} es la reactancia de dispersión por fase del rotor, X_M es la reactancia de magnetización y J es la inercia de la carga más la inercia del rotor.

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} r_s + L_{ss}p & -\omega L_{ss} & 0 & Mp & -\omega M & 0 \\ \omega L_{ss} & r_s + L_{ss}p & 0 & \omega M & Mp & 0 \\ 0 & 0 & r_s + L_{os}p & 0 & 0 & 0 \\ Mp & -(\omega - \omega_r)M & 0 & r_r + L'_{rr}p & -(\omega - \omega_r)L'_{rr} & 0 \\ (\omega - \omega_r)M & Mp & 0 & (\omega - \omega_r)L'_{rr} & r_r + L'_{rr}p & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & r'_r + L'_{or}p \end{bmatrix} \quad (5)$$

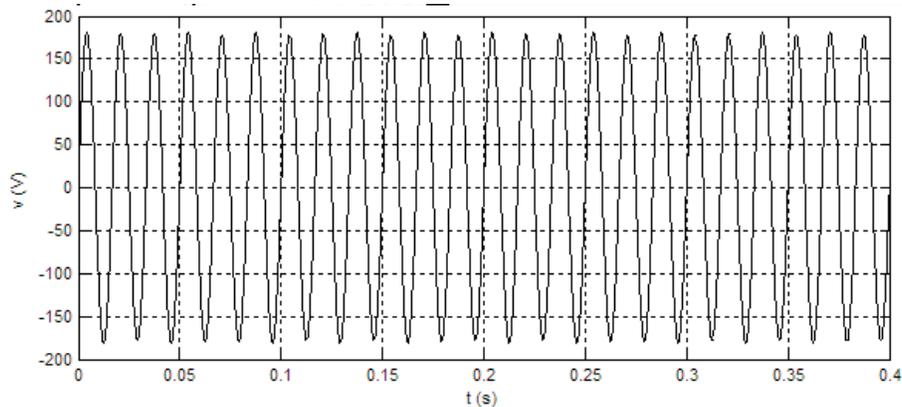


Figura 1. Fluctuación rápida de tensión monofásica: Caso 2.

Tabla 2
Características del motor [8]

Tensión (V)	Potencia (hp)	Velocidad (rpm)	$r_s(\Omega)$	$r_r(\Omega)$	$X_{is}(\Omega)$	$X_{ir}(\Omega)$	$X_M(\Omega)$	J ($\text{kg}\cdot\text{m}^2$)
220	3	1710	0,435	0,816	0,754	0,754	26,13	0,089

Modelo del motor de inducción

El motor de inducción fue modelado por medio de sus ecuaciones dinámicas en un sistema de coordenadas ortogonales estacionario en el estator. El desarrollo de las ecuaciones puede ser consultado en los trabajos de Krause y Thomas [9], y Krause, Wasynczuk y Sudhoff [10]. Las ecuaciones de tensión referidas al estator son:

$$\mathbf{v}_{dq0} = \mathbf{A} \cdot \mathbf{i}_{dq0} \quad (3)$$

donde:

$$\mathbf{v}_{dq0} = \begin{bmatrix} v_{ds} \\ v_{qs} \\ v_{0s} \\ v'_{dr} \\ v'_{qr} \\ v'_{or} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{i}_{dq0} = \begin{bmatrix} i_{ds} \\ i_{qs} \\ i_{0s} \\ i'_{dr} \\ i'_{qr} \\ i'_{or} \end{bmatrix} \quad (4)$$

y la matriz \mathbf{A} es igual a (ver ecuación 5):

donde la letra p representa al operador derivada y ω es la velocidad angular del sistema de coordenadas ortogonales. Las inductancias son:

$$L_{ss} = L_{os} + \frac{3}{2}L_{ms} \tag{6}$$

$$L'_{rr} = L'_{or} + \frac{3}{2}L_{ms} \tag{7}$$

$$M = \frac{3}{2}L_{ms} \tag{8}$$

donde L_{os} es la inductancia de dispersión del estator, L'_{or} es la inductancia de dispersión del rotor y L_{ms} es la inductancia de magnetización del estator.

Las ecuaciones mecánicas son:

$$T_e - T_L = J \frac{d\omega_m}{dt} \tag{9}$$

donde T_e es el par electromagnético, T_L es el par de carga y:

$$\omega_m = \frac{d\theta_m}{dt}, \tag{10}$$

$$\text{con } \omega_r = \frac{P}{2} \omega_m. \tag{11}$$

El par electromagnético es:

$$T_e = \frac{P}{2} M(i'_{dr}i_{qs} - i'_{qr}i_{ds}) \tag{12}$$

donde P es el número de polos.

Las ecuaciones (3), (9) y (10) forman un sistema de ecuaciones diferenciales, el cual modela el comportamiento dinámico del motor de inducción.

Resultados

Se simuló la respuesta del motor de inducción, considerando la presencia de la fluctuación de tensión en una de sus fases, y utilizando un par de carga constante e igual al par del motor a velocidad nominal ($T = 14,0269 \text{ N}\cdot\text{m}$). Estas respuestas se muestran en las Figuras 2 y 3.

Con el objeto de observar las fluctuaciones en el par y en la velocidad en régimen permanente, en las Figuras 4 y 5 se muestran sus respectivas ampliaciones.

Luego, a las respuestas en régimen permanente se les aplicó la Transformada Rápida de Fourier, obteniéndose su espectro de frecuencias. En la Figura 6 se observa el espectro de frecuencias del par y de la velocidad, correspondientes al caso 1. Sólo se aprecia la componente de 0 Hz, debido a la baja magnitud de las componentes a otras frecuencias. Por esta razón, en las Figuras 7 y 8 se presentan los mismos espectros pero utilizando escalas logarítmicas en el eje de las ordenadas.

Los valores de las componentes espectrales más relevantes para el caso 1 se muestran en la

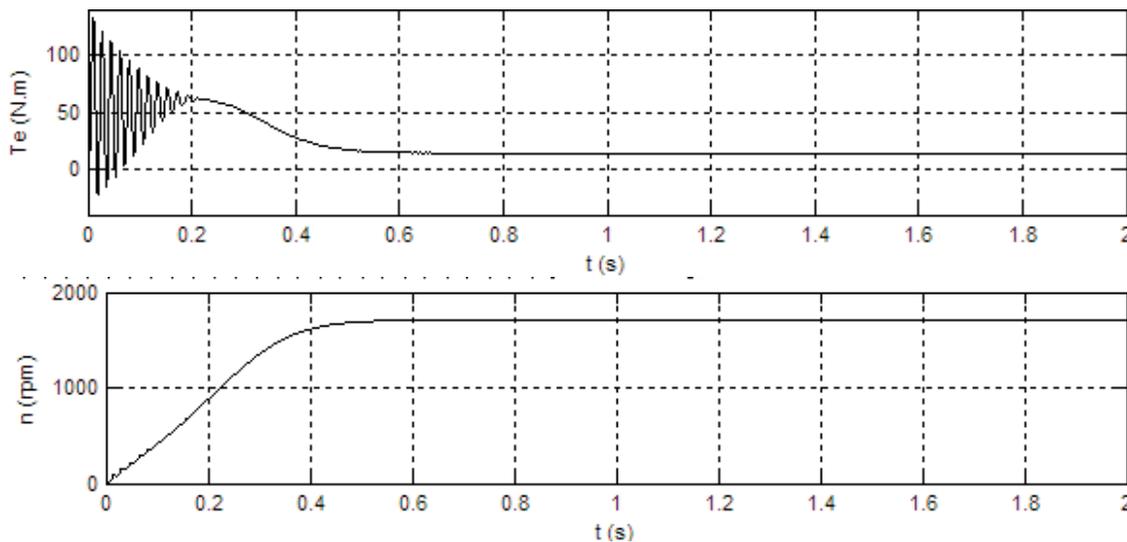


Figura 2. Respuestas temporales del par (T_e) y de la velocidad (n): Caso 1.

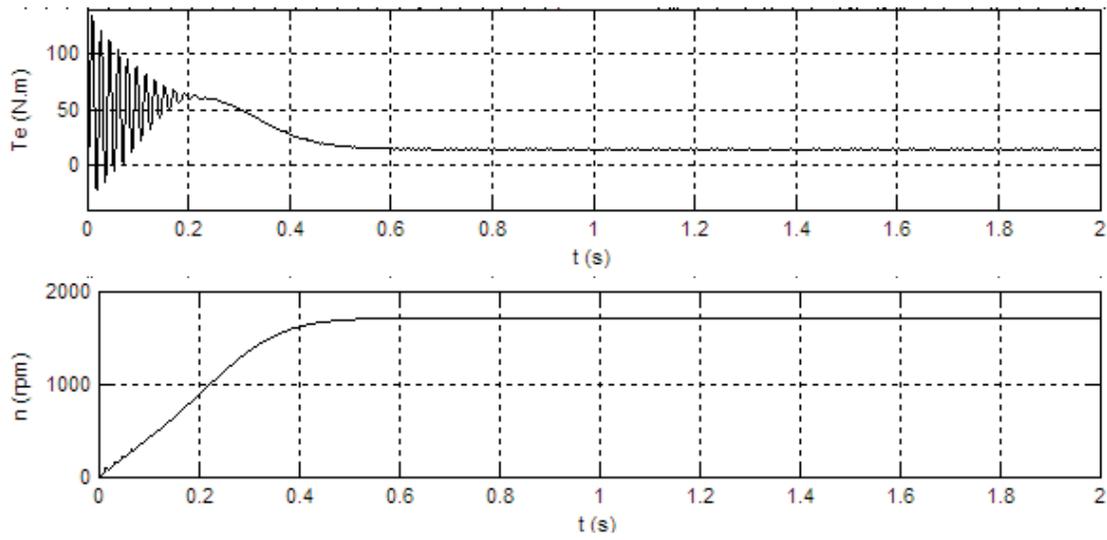


Figura 3. Respuestas temporales del par (T_e) y de la velocidad (n): Caso 2.

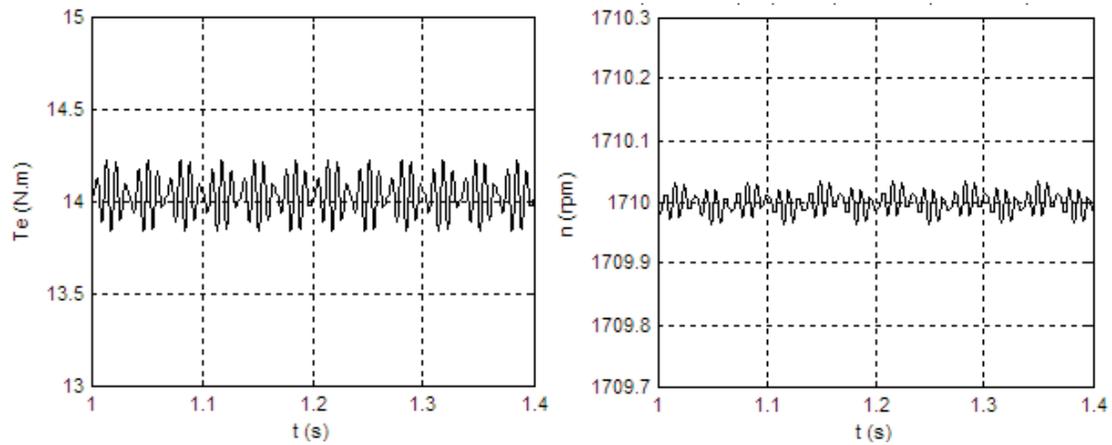


Figura 4. Par (T_e) y velocidad (n) en régimen permanente: Caso 1.

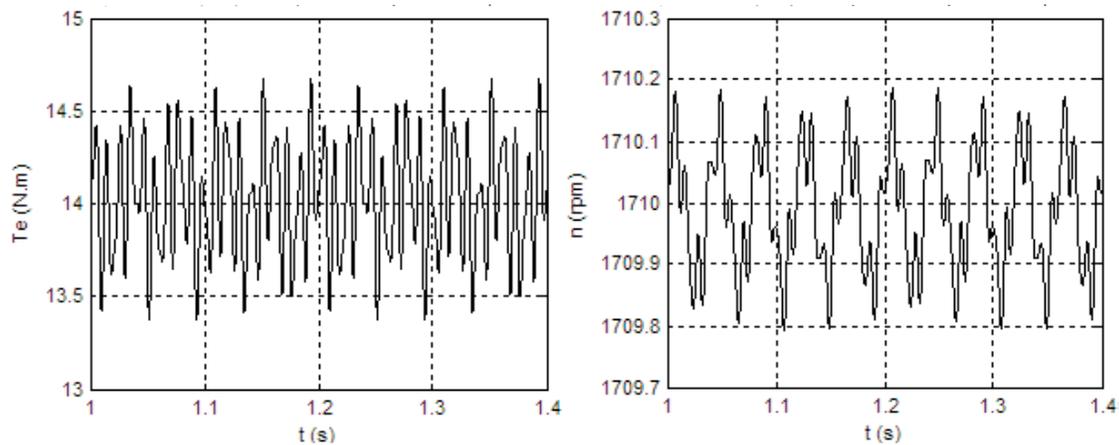


Figura 5. Par (T_e) y velocidad (n) en régimen permanente: Caso 2.

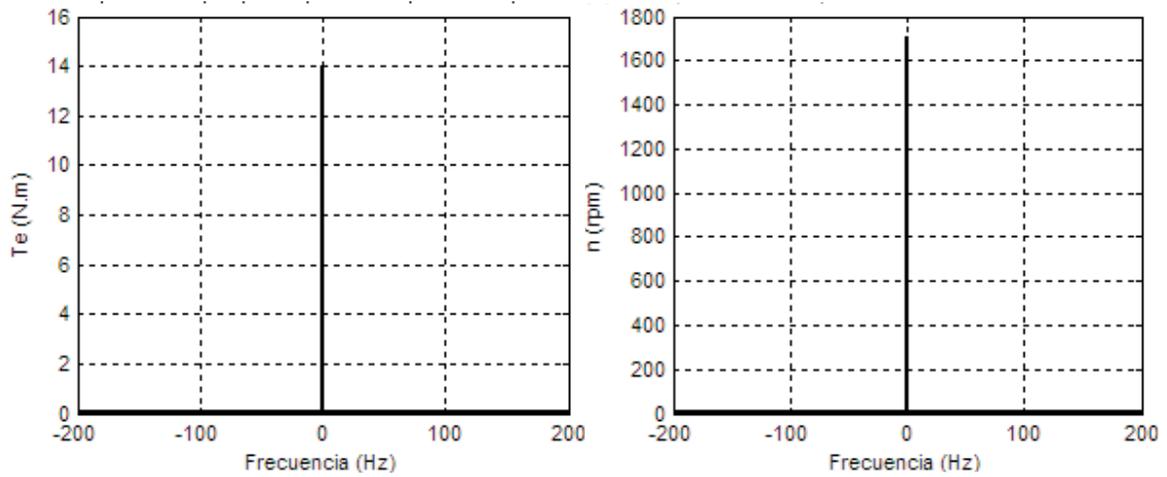


Figura 6. Espectro de frecuencias del par (T_e) y velocidad (n): Caso 1.

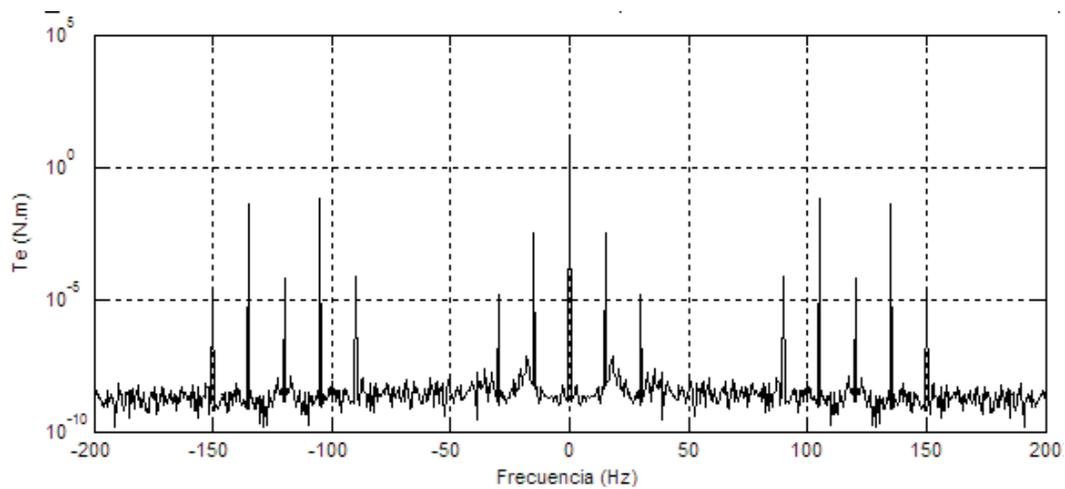


Figura 7. Espectro del par correspondiente al caso 1 utilizando escala logarítmica.

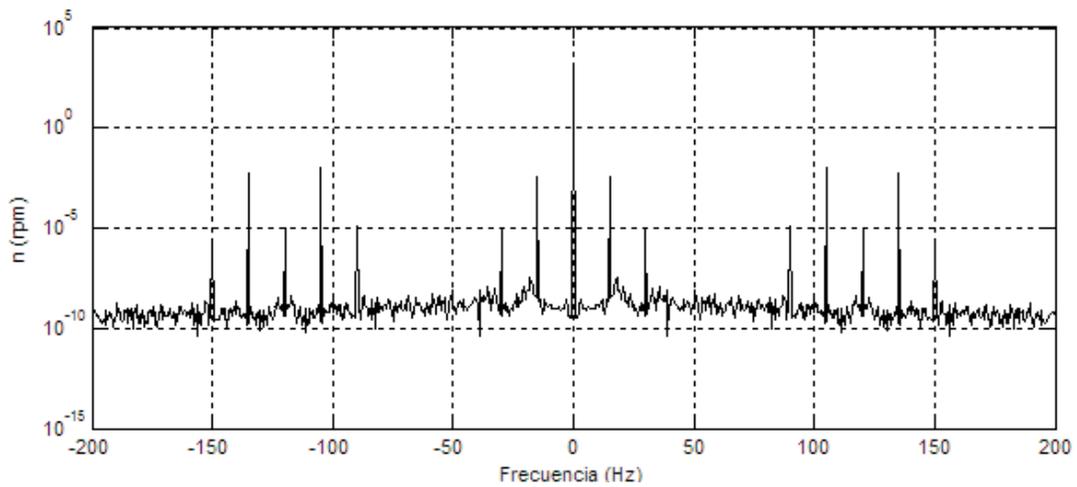


Figura 8. Espectro de la velocidad correspondiente al caso 1 utilizando escala logarítmica.

Tabla 3, y los respectivos valores para el caso 2 se muestran en la Tabla 4.

Discusión de resultados

De los resultados del presente trabajo, se observa la aparición en el par y la velocidad, de componentes oscilantes a diversas frecuencias. En el caso del par, estas componentes se denominan pares pulsantes. A continuación, se explicará por qué aparecen estos pares pulsantes.

La fuente de alimentación del motor está conformada por las siguientes tensiones:

$$v_a(t) = V_p \sin(2\pi f_p t) + \frac{1}{4}(\Delta V)V_p \cos[2\pi(f_p - f_m)t] - \frac{1}{4}(\Delta V)V_p \cos[2\pi(f_p + f_m)t] \quad (13)$$

$$v_b(t) = V_p \sin\left(2\pi f_p t - \frac{2\pi}{3}\right) \quad (14)$$

$$v_c(t) = V_p \sin\left(2\pi f_p t + \frac{2\pi}{3}\right) \quad (15)$$

Considerando las ecuaciones (13), (14) y (15) en conjunto, se observa la presencia de un sistema balanceado de tensión a la frecuencia f_p , de un sistema desbalanceado de tensión a la frecuencia $f_p - f_m$ y de un sistema desbalanceado de tensión a la frecuencia $f_p + f_m$. Cuando se aplica la fuente de tensión constituida por las ecuaciones (13), (14) y (15) al arrollado del estator del motor de inducción trifásico, comienzan a circular por el arrollado corrientes en secuencia positiva y secuencia negativa. En la Tabla 5, se muestra la secuencia de los sistemas balanceados de corrien-

Tabla 3
Componentes espectrales correspondientes al caso 1

Frecuencia (Hz)	Par (N·m)	Par (%)	Velocidad (rpm)	Velocidad (%)
0	$1,40269 \cdot 10^1$	100	$1,71000 \cdot 10^3$	100
15	$6,40000 \cdot 10^{-3}$	$4,56266 \cdot 10^{-2}$	$7,20000 \cdot 10^{-3}$	$4,21053 \cdot 10^{-4}$
30	$2,86620 \cdot 10^{-5}$	$2,04336 \cdot 10^{-4}$	$1,63100 \cdot 10^{-5}$	$9,53801 \cdot 10^{-7}$
90	$1,40390 \cdot 10^{-4}$	$1,00086 \cdot 10^{-3}$	$2,66400 \cdot 10^{-5}$	$1,55789 \cdot 10^{-6}$
105	$1,18200 \cdot 10^{-1}$	$8,42667 \cdot 10^{-1}$	$1,92000 \cdot 10^{-2}$	$1,12281 \cdot 10^{-3}$
120	$1,30784 \cdot 10^{-4}$	$9,32380 \cdot 10^{-4}$	$1,86116 \cdot 10^{-5}$	$1,08840 \cdot 10^{-6}$
135	$7,86000 \cdot 10^{-2}$	$5,60352 \cdot 10^{-1}$	$1,00000 \cdot 10^{-2}$	$5,84795 \cdot 10^{-4}$
150	$3,27860 \cdot 10^{-5}$	$2,33737 \cdot 10^{-4}$	$3,73300 \cdot 10^{-6}$	$2,18304 \cdot 10^{-7}$

Tabla 4
Componentes espectrales correspondientes al caso 2

Frecuencia (Hz)	Par (N·m)	Par (%)	Velocidad (rpm)	Velocidad (%)
0	$1,40269 \cdot 10^1$	100	$1,71000 \cdot 10^3$	100
25	$1,78800 \cdot 10^{-1}$	$1,27469 \cdot 10^0$	$1,22200 \cdot 10^{-1}$	$7,14620 \cdot 10^{-3}$
50	$2,58460 \cdot 10^{-4}$	$1,84260 \cdot 10^{-3}$	$8,83000 \cdot 10^{-5}$	$5,16374 \cdot 10^{-6}$
70	$1,48118 \cdot 10^{-3}$	$1,05596 \cdot 10^{-2}$	$3,61320 \cdot 10^{-4}$	$2,11298 \cdot 10^{-5}$
95	$3,51600 \cdot 10^{-1}$	$2,50661 \cdot 10^0$	$6,32000 \cdot 10^{-2}$	$3,69591 \cdot 10^{-3}$
120	$8,26120 \cdot 10^{-4}$	$5,88954 \cdot 10^{-3}$	$1,17576 \cdot 10^{-4}$	$2,35152 \cdot 10^{-4}$
145	$1,75800 \cdot 10^{-1}$	$1,25331 \cdot 10^0$	$2,06000 \cdot 10^{-2}$	$1,20468 \cdot 10^{-3}$
170	$1,29470 \cdot 10^{-4}$	$9,23012 \cdot 10^{-4}$	$1,30098 \cdot 10^{-5}$	$7,60807 \cdot 10^{-7}$

te, para cada una de las frecuencias que conforman la fuente de alimentación (f_p , f_p-f_m y f_p+f_m).

Cada sistema balanceado de corriente, tanto a secuencia positiva como a secuencia negativa, produce una fuerza magnetomotriz (FMM) rotante. Los sistemas de corriente que tienen la misma frecuencia pero distinta secuencia, producen fuerzas magnetomotrices que giran con igual magnitud de velocidad pero en sentido opuesto. Posteriormente, cada FMM origina la aparición de corrientes en el arrollado del rotor, las cuales a su vez producen otra FMM rotante. La interacción entre fuerzas magnetomotrices del estator y fuerzas magnetomotrices del rotor que giran a la misma velocidad, produce un par constante en el tiempo; la interacción entre fuerzas magnetomotrices del estator y fuerzas magnetomotrices del rotor que giran a velocidades distintas, produce un par pulsante en el tiempo. Si por ejemplo se tiene un sistema balanceado de corriente en el estator que produce una FMM rotante a una determinada velocidad, y se tiene un sistema balanceado de corriente en el rotor que produce una FMM rotante a otra velocidad, la interacción entre estas dos fuerzas magnetomotrices originará la aparición de un par pulsante, cuya frecuencia viene dada por la diferencia entre las frecuencias de los sistemas de corriente del estator y del rotor [10]. En las Tablas 6 y 7, se muestran las frecuencias de las corrientes del estator.

Otro aspecto a resaltar de los resultados, es que mientras mayor es la amplitud de la fluctuación de tensión (ΔV), mayores son las magnitudes de las componentes de par pulsante. Esto se observa cuando se comparan los resultados obtenidos para el caso 2 (ΔV igual a 2,090%) y para el caso 1 (ΔV igual a 0,84 %). Esto se debe a que en el motor de inducción, el par depende directamente del cuadrado de la tensión de alimentación.

También se evidenció de los casos de estudio considerados, que las componentes oscilantes del par y de la velocidad presentaron una magnitud relativamente baja respecto a su valor promedio. Por ejemplo, en las Tablas 3 y 4, se observa que estas componentes son inferiores a la componente promedio por varios órdenes de magnitud. Esto se debió a que las fluctuaciones

Tabla 5
Secuencia de los sistemas balanceados de corriente para cada frecuencia

Frecuencia	Secuencia
f_p	-Positiva
f_p-f_m	-Positiva -Negativa
f_p+f_m	-Positiva -Negativa

Tabla 6
Frecuencia de los sistemas balanceados de corriente para el caso 1

Frecuencia	Estator	
	sec(+)	sec(-)
f_p	60 Hz	-
f_p-f_m	45 Hz	45 Hz
f_p+f_m	75 Hz	75 Hz

Tabla 7
Frecuencia de los sistemas balanceados de corriente para el caso 2

Frecuencia	Estator	
	sec(+)	sec(-)
f_p	60 Hz	-
f_p-f_m	35 Hz	35 Hz
f_p+f_m	85 Hz	85 Hz

de tensión utilizadas tenían un bajo valor porcentual de amplitud ΔV .

Conclusiones

- La presencia de una fluctuación de tensión sinusoidal asociada a límite de flicker en una de las fases de la alimentación del motor de inducción trifásico, causa la aparición en régimen permanente, tanto en el par como en la velocidad, de componentes oscilantes a diversas frecuencias que se superponen a la componente promedio.

- La presencia de los pares pulsantes obedece a la interacción entre fuerzas magnetomotrices del estator y fuerzas magnetomotrices del rotor, que giran a distintas velocidades angulares.
 - Las fluctuaciones rápidas de tensión monofásicas sinusoidales asociadas a límites de flicker, producen componentes oscilantes en el par y en la velocidad con magnitudes no significativas respecto a su valor promedio.
 - El nivel de referencia para las fluctuaciones rápidas de tensión pudiera ser sujeto a modificación, ya que a partir de los resultados obtenidos, se observa que en el motor de inducción trifásico no hay mayores afectaciones con el nivel de referencia actual en el P_{st} .
 - Debido a las bajas magnitudes obtenidas para las componentes oscilantes del par y de la velocidad, se ampliará el estudio en el futuro para incluir fluctuaciones de tensión con mayores ΔV y a otras frecuencias, y poder determinar hasta qué punto la operación del motor de inducción trifásico se ve afectada. Además, se considerarán fluctuaciones rápidas de tensión trifásicas.
3. IEEE STD. 519-1992. "IEEE Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems". IEEE Institute of Electrical and Electronic Engineers.
 4. IEEE STD. 141-1993. "IEEE Recommended Practice for Electric Power Distribution for Industrial Plants". IEEE Institute of Electrical and Electronic Engineers.
 5. Medeiros C., de Oliveira J.: "Effects of voltage fluctuation associated to flicker limits on equipments performance". 10th International Conference on Harmonics and Quality of Power, Vol. 1 (2002), 347-352.
 6. Montoya D.: "Comparison between the modeled and simulation of the Flickermeter based on the Standard IEC-61000-4-15 through the Discrete Wavelet Transform and Fast Fourier Transform". Rev. Téc. Ing. Univ. Zulia, Vol. 31, No. 1 (2008), 31-40.
 7. International Standard IEC 61000-4-15, 2003. "Part 4: Testing and measurement techniques. Section 15: Flickermeter functional and design specifications". IEC International Electrotechnical Commission.
 8. Cathey J., Cavin R., Ayoub A.: "Transient Load Model of an Induction Motor". IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. 92 (1973), 1399-1406.
 9. Krause P., Thomas C.: "Simulation of Symmetrical Induction Machinery". IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-84, No. 11 (1965), 1038-1053.
 10. Krause P., Wasynczuk O., Sudhoff S.: "Analysis of Electric Machinery", IEEE PRESS, New York, 1995.

Referencias bibliográficas

1. Normas de Calidad del Servicio de Distribución de Electricidad. Gaceta Oficial de la República Bolivariana de Venezuela N° 38.029, 2004.
2. IEEE STD. 1453-2004. "IEEE Recommended Practice for Measurement and Limits of Voltage Fluctuations and Associated Light Flicker on AC Power Systems". IEEE Institute of Electrical and Electronic Engineers.

Recibido el 20 de Octubre de 2010

En forma revisada el 23 de Octubre de 2011