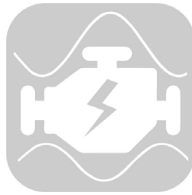


Estudio de la Calidad de Energía para la Identificación de Interarmónicos en Motores de Inducción, Utilizando Programas de Simulación



Colaboración

Jaime Jalomo Cuevas; Melani Sofía Mireles Santillán; Ramón Chávez Bracamontes; Sergio Sandoval Pérez; Fernando Lúa Madrigal, Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico de Ciudad Guzmán

Fecha de recepción: 11 de marzo 2024

Fecha de aceptación: 18 de junio de 2024

RESUMEN: En este trabajo se reportan los resultados en simulación del estudio de armónicos e interarmónicos en sistemas de motor de inducción/variador de velocidad sujetos a variaciones en la carga mecánica. Se muestra que las variaciones de carga generan patrones de armónicos e interarmónicos más complejos que solo son comparables con el arranque. Se utiliza la transformada rápida de Fourier (FFT, por sus siglas en inglés, “Fast Fourier Transform”) para obtener el patrón de armónicos y la transformada de sincronización (SST, “Syncrosqueezing Transform”) para obtener el patrón de interarmónicos. Se presenta el patrón de interarmónicos de un motor alimentado directamente a la línea de suministro, validando la hipótesis del mejor aprovechamiento de la energía mediante el uso de variadores de velocidad, puesto que el patrón de armónicos del sistema con variador es menos complejo. También se muestran las gráficas de los interarmónicos en régimen de estado estable de funcionamiento del motor en el caso de la implementación del variador de velocidad para detectar la reducción de los interarmónicos.

PALABRAS CLAVE: Armónicos, Calidad de energía, FFT, Interarmónicos, SST.

ABSTRACT: This paper presents the different simulation results of the power quality study of single harmonics and interharmonics in induction motor/variable speed drive systems subjected to constant variations in mechanical load. It is shown that load variations generate more complex harmonic and interharmonic patterns, comparable only with motor starting. The conventional Fast Fourier Transform (FFT) algorithm is used to obtain the harmonic pattern and the Syncrosqueezing Transform (SST) is used to obtain the interharmonic pattern.

The harmonics and interharmonics pattern of interest in the motor fed directly from the supply line is presented, validating the hypothesis of the best use of energy by using variable speed drives, since the interharmonic pattern of the system with drive is less complex. We also show the plots of the interharmonics in steady state regime of the motor operation in the case of the implementation of the variable speed drive to detect the reduction of the interharmonics..

KEYWORDS: FFT, Harmonics, interharmonics, Power Quality, SST.

INTRODUCCIÓN

El aprovechamiento de la energía eléctrica es uno de los temas de mayor importancia a nivel mundial, dado el gran crecimiento de la tecnología eléctrica y electrónica de los últimos años [1,2]. Dentro de esta área de estudio se encuentran los temas de la calidad de la energía que son de vital importancia para la optimización de los recursos de energía [3,4]. En este mismo sentido, los interarmónicos son efectos que poco se han estudiado, dado la complejidad teórica y las dificultades técnicas que existen al momento para su estudio, pues la mayoría de los instrumentos de calidad de la energía no los contemplan como parte de su lista de índices de análisis [5,6]. Dentro de los trabajos que se han estudiado se encuentran estudios en simulación de motores trifásicos de corriente alterna conecta-

dos directamente a la línea de suministro, en donde se demuestra una mejor eficiencia en la detección de interarmónicos de la transformada de sincronización (SST, "Syncrosqueezing Transform") con respecto de la transformada wavelet continua y la transformada de Fourier de tiempo corto [7].

En este trabajo se buscó aprovechar las ventajas del uso de las plataformas de simulación para realizar el estudio de los interarmónicos, como parte de una serie de sistemas diseñados que se presentan en la práctica de ingeniería de campo que son el arranque de motores de inducción mediante cajas de fusibles o interruptores termomagnéticos, así como el arranque con variador de velocidad. En esos casos se busca identificar los factores que intervienen en la generación de interarmónicos de manera significativa, puesto que el motor de inducción es una fuente importante de interarmónicos por las componentes dinámicas no lineales de su modelo matemático, pero también lo son los variadores de velocidad debido a su tecnología de diseño en base de semiconductores, por lo que al aplicar estas tecnologías en casos de arranque de motor y de régimen de estado estable, es posible identificar factores que ayuden a caracterizar el fenómeno de los interarmónicos.

MATERIAL Y MÉTODOS

En este estudio se realizaron varios experimentos en simulación buscando detectar patrones que permitieran identificar el comportamiento de los interarmónicos bajo diferentes condiciones de funcionamiento del proceso. Para este caso se eligió como proceso principal el motor de inducción trifásico por su fácil instalación, bajo costo, además de ser uno de los motores más ampliamente usados para las aplicaciones industriales. En primer término se realizaron tres experimentos con el motor conectándolo directamente a una línea de suministro de energía, para reproducir una de las maneras en que se trabaja en muchos lugares este tipo de motores, sobre todo a nivel de los talleres domésticos donde son activados con una simple caja de fusibles con un interruptor. Aquí se realizaron tres experimentos, en donde se inició la simulación con una carga de 2 Nw.m y después de 0.5 segundos que correspondió a la fase de arranque, se aplicó un cambio en la carga a 4 Nw.m, 8 Nw.m y 10 Nw.m, en donde se tomaron mediciones de las señales de corriente para hacer los análisis de armónicos e interarmónicos. Los valores de la carga inicial y de los cambios de carga se propusieron dado que, de acuerdo a estudios para el tipo de motor propuesto con los parámetros usados, la respuesta de torque está alrededor de estos valores, por lo que se considera un buen estudio de las condiciones reales. El criterio para aplicar los cambios de carga a los 0.5 segundos se tomó dado que las simulaciones realizadas son computacionalmente muy costosas y es recomendable que se trabajen en tiempos reducidos.

Posteriormente se implementó un segundo grupo de experimentos, en la que se realizó el arranque ahora usando un variador de velocidad de tecnología DTC (Direct Torque Control por sus siglas en inglés). Aquí también se implementaron la misma cantidad de cambios en la carga, de manera similar a la primera serie de tres experimentos, donde se buscó detectar patrones de comportamiento de los interarmónicos. En el caso de los experimentos de arranque con variador de velocidad el funcionamiento de estado estable se alcanzó antes de los 0.5 segundos, así que la variación de la carga implementada se tuvo en régimen de funcionamiento de estado estable.

Todos los experimentos fueron desarrollados utilizando las herramientas de simulación del programa Matlab/Simlink, para la cual también se usó el paquete de herramientas de SimPowerSystems existente en el mismo programa Matlab y que cuenta con bloques de motor de inducción/variador de velocidad los cuales pueden ser configurados en diferentes modos de funcionamiento y diversos parámetros [8,9]. El motor de inducción que se implementó para estos experimentos fue de una capacidad de 0.33 hp, mientras que el variador que se eligió fue el de tipo control directo de torque o DTC. Por otra parte también se usó la herramienta de cálculo de armónicos "powergui" existente en Matlab, que cuenta con algoritmos FFT para generar gráficas del comportamiento de los armónicos. Los interarmónicos se calcularon con el comando "wsst" para la transformada de sincronización que ha sido incluida en las últimas versiones de Matlab a partir del año 2021.

Experimentos de simulación

En esta sección se presentan las diferentes figuras relacionadas con los diagramas y los experimentos que se realizaron en este estudio. En primer lugar, en la Figura 1 se presenta el diagrama de la conexión de un motor de inducción con la línea de suministro, en donde se aplica un cambio de la carga mecánica después de 0.5 segundos. Los parámetros del motor se describen en la Tabla 1.

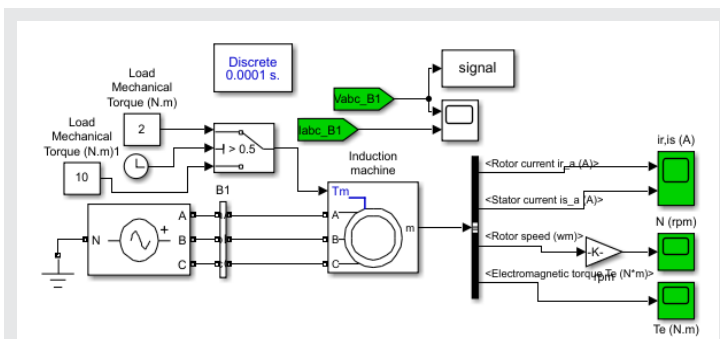


Figura 1. Diagrama de motor con cambio de carga de 2 a 10 Nw.m.

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 1. Parámetros del motor.

Parámetro	Símbolo	Valor
Resistencia de estator	R_S	0.435 Ω
Inductancia de estator	L_S	2 mH
Resistencia del rotor	R_r	0.816 Ω
Inductancia del rotor	L_r	2 mH
Inductancia mutua	M	69.31 mH
Numero de pares de polos	n_p	2
Momento de inercia	J	0.089 $\text{Kg}\cdot\text{m}^2$

Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 2 se muestra la señal de la corriente de una de las fases del experimento del motor del diagrama de la Figura 1, aquí se puede apreciar de forma clara la perturbación generada en el momento de hacer el cambio en el valor del torque de carga de 2 a 8 Nw.m en t=0.5 seg.

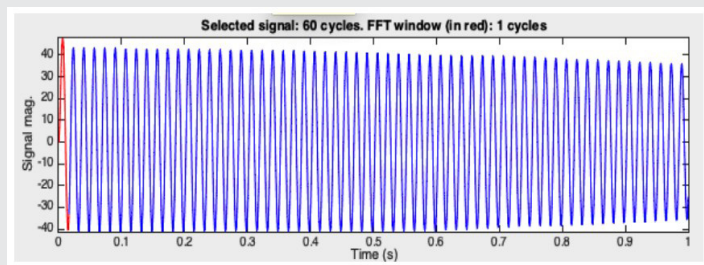


Figura 2. Gráfico de la señal de corriente del motor.
Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 3 se observa una gráfica de los armónicos de la corriente de una de las líneas de alimentación del motor en el inicio del arranque, los armónicos fueron calculados mediante la herramienta "powergui" de Matlab/Simulink donde se usa la transformada FFT.

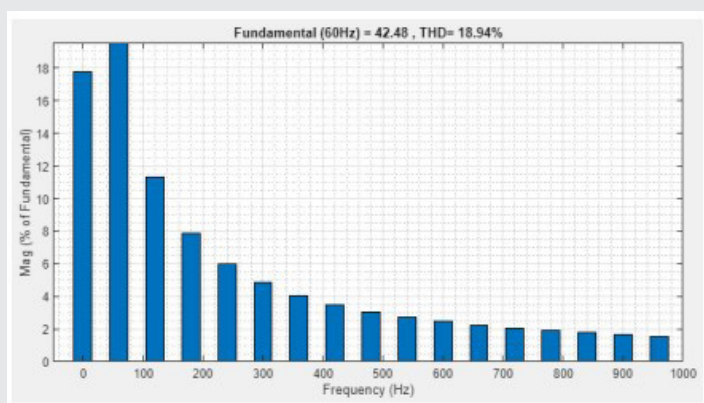


Figura 3. Gráfico de armónicos del motor en proceso.
Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 4 se muestra el diagrama de la conexión de un motor de inducción con un variador de velocidad, en donde se aplica un cambio de la carga mecánica

después de 0.5 segundos, los parámetros del motor también fueron tomados como en la tabla 1.

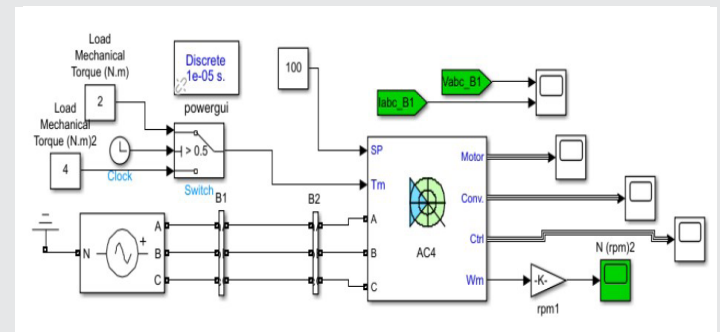


Figura 4. Diagrama del motor-variador de velocidad.
Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 5 se muestra la señal de la corriente de una de las fases del experimento del motor del diagrama de la Figura 4. En esta imagen se ve la gran variedad de dinámicas que se involucran al implementar variadores de velocidad, así también se puede ver la perturbación generada en el momento de hacer el cambio en el valor del torque de carga de 2 a 8 Nw.m en t=0.5 seg.

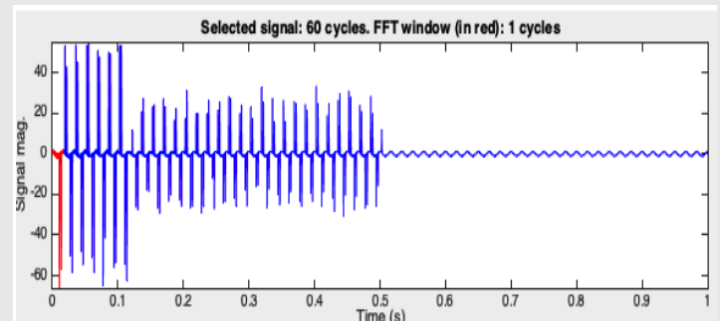


Figura 5. Gráfico de la señal de corriente del motor.
Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 6 se tiene la gráfica de los armónicos de la corriente de una de las líneas de alimentación del motor al inicio del arranque, los armónicos fueron calculados con la transformada FFT.

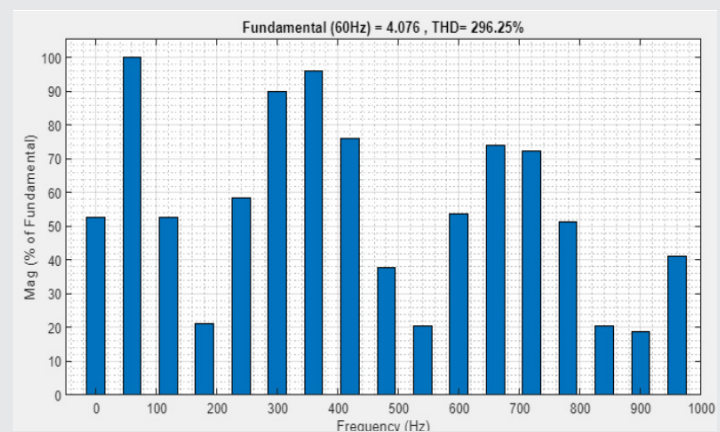


Figura 6. Gráfico de armónicos del motor-variador en proceso de arranque.
Fuente: Elaboración propia.

A diferencia de la prueba del motor sin variador de la Figura 2, en esta prueba se aprecia una dinámica mucho más variada de los armónicos, pues se tienen mayores magnitudes, así como diferentes asimetrías donde es claro que no se identifica ningún patrón. Estos dos primeros experimentos nos permiten observar una parte del proceso que se refiere al comportamiento lineal del motor y del variador de velocidad.

En la Figura 7 se muestra la primera gráfica de los interarmónicos correspondiente al experimento del arranque del motor conectado directamente a la línea de suministro, en este caso se aplicó un cambio en la carga mecánica de 2 a 4 Nw.m después de un tiempo de 0.5 segundos, en donde es clara la presencia de los interarmónicos en diferentes momentos de la gráfica, pues se presentan como señales que no son múltiplos enteros de la componente fundamental que es la de señal de 60 Hz. En estos siguientes experimentos es posible apreciar el comportamiento no lineal del motor de inducción tanto en el arranque como en régimen de estado estable dada la presencia de los interarmónicos. En esta gráfica es posible observar de manera muy clara la componente de 60 Hz de la línea de suministro que es la única que se mantiene constante a lo largo de prácticamente todo el eje del tiempo en la gráfica. Así también es posible apreciar otro fenómeno muy interesante de los procesos de la ingeniería eléctrica de sistemas de potencia que son los subarmónicos pues se presentan como componentes menores que la frecuencia fundamental y donde también se puede apreciar el efecto de interarmónicos.

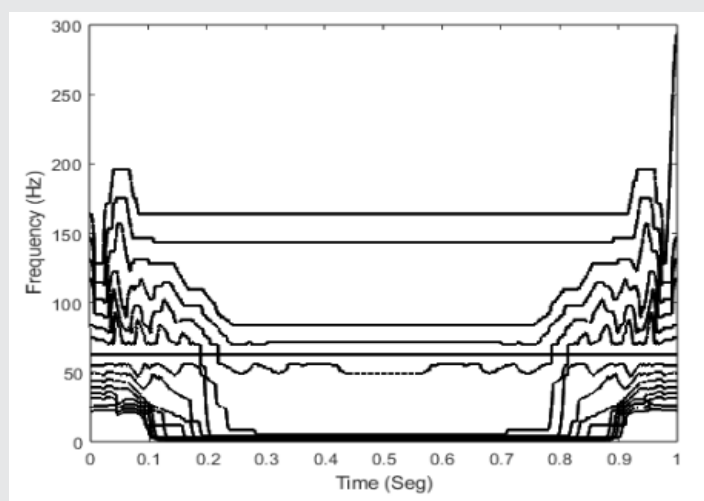


Figura 7. Motor con cambio de carga de 2 a 4 Nw.m.
Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 8 se presenta la gráfica de los interarmónicos del experimento del arranque del motor conectado directamente a la línea de suministro, donde se aplicó un cambio en la carga mecánica de 2 a 8 Nw.m en $t = 0.5$ seg.

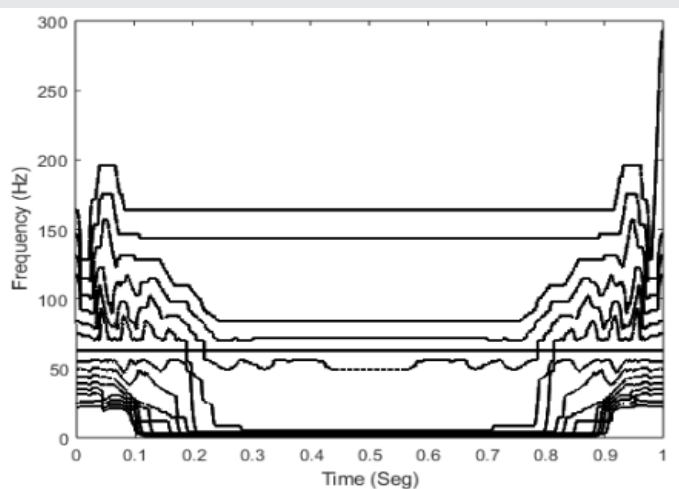


Figura 8. Motor con cambio de carga de 2 a 8 Nw.m.
Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 9 se ve la gráfica de los interarmónicos para el experimento del arranque del motor conectado directamente a la línea de suministro, donde se aplicó un cambio en la carga mecánica de 2 a 10 Nw.m en $t = 0.5$ seg. Estas tres gráficas tienen diferencias muy pequeñas pues los cambios de carga no se reflejan en el comportamiento de la interarmónicos y es necesario ampliar estas gráficas para notar unas diferencias sin embargo se considera importante presentarlas para dar evidencia de estos resultados.

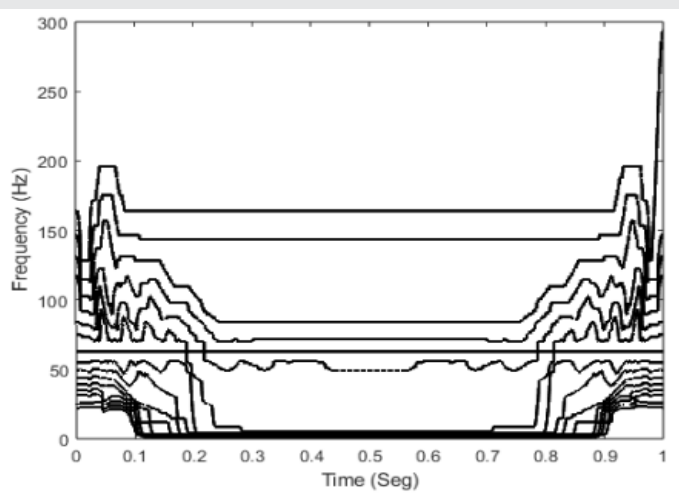


Figura 9. Motor con cambio de carga de 2 a 10 Nw.m.
Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 10 se ve la gráfica de los interarmónicos para el experimento del arranque del motor con su variador de velocidad, donde se aplicó un cambio en la carga mecánica de 2 a 4 Nw.m en $t = 0.5$ seg. En esta Figura se pueden ver importantes diferencias respecto de las gráficas anteriores pues se aprecia una disminución de las magnitudes de los interarmónicos, una característica importante es que aquí solo se apre-

cian subarmónicos, sin embargo si se puede observar una asimetría cerca de los 0.5 segundos que es donde ocurre el cambio de carga mecánica.

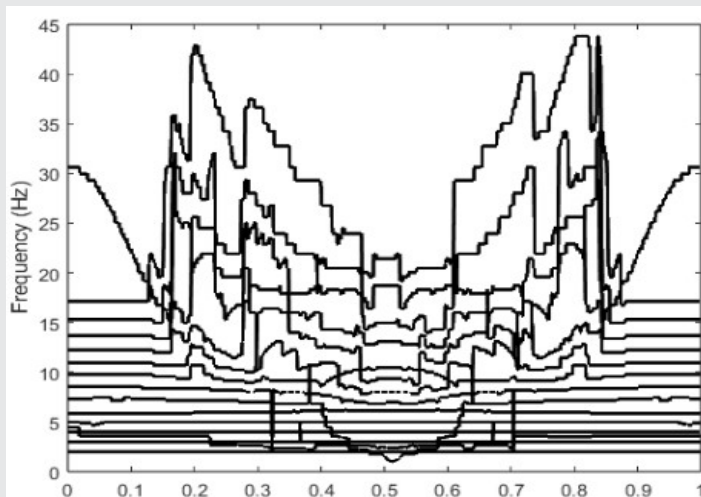


Figura 10. Motor con variador con cambio de carga 2 a 4 Nw.m.
Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 11 se observa la gráfica de los interarmónicos en el experimento del arranque del motor con variador de velocidad, donde hay un cambio en la carga mecánica de 2 a 8 Nw.m en $t = 0.5$ seg. En la Figura 12 se muestra la gráfica de interarmónicos con experimento del arranque del motor con variador de velocidad, donde se implementó el cambio en la carga mecánica de 2 a 10 Nw.m en $t = 0.5$ seg. En estas últimas tres gráficas se puede ver que los interarmónicos se comportan de forma relativamente parecida pues hay cambios en el momento de aplicar más carga mecánica, sin embargo si se ven cambios con respecto de los tres primeros experimentos pues el centro de la gráfica es mucho más dinámico.

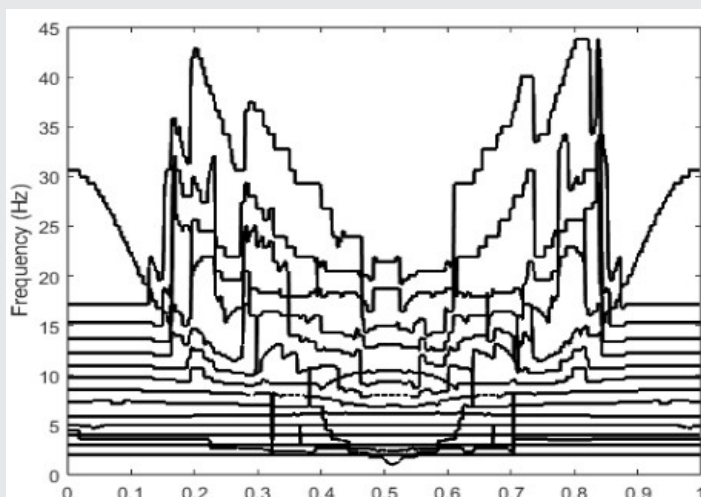


Figura 11. Motor con variador con cambio de carga 2 a 8 Nw.m.
Fuente: Elaboración propia.

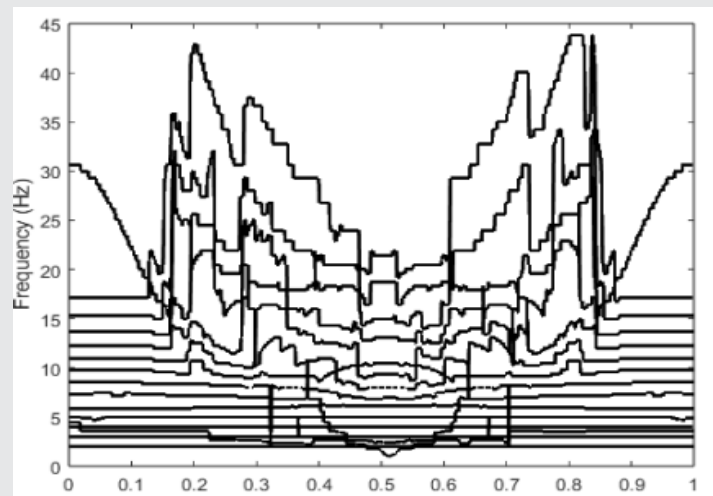


Figura 12. Motor con variador con cambio de carga 2 a 10 Nw.m.
Fuente: Elaboración propia.

RESULTADOS

Como se puede observar en las gráficas de los resultados obtenidos en cada uno de los experimentos de simulación, hay diferencias significativas en los experimentos sin variador de velocidad respecto de los experimentos con variador. Por ejemplo en los experimentos sin variador los interarmónicos suben de magnitud de manera muy importante, lo que valida la experiencia cotidiana de ver efectos en la línea de suministro cuando se activan las bombas de agua domésticas, sin embargo en el caso de los arranques con variador, los armónicos son de muy baja magnitud lo que valida las ventajas del uso de este tipo de arrancador para proteger a los equipos electrónicos. En general se considera que los interarmónicos son producidos por los efectos no lineales de los diferentes componentes involucrados en el proceso de arranque del motor, por ejemplo en el caso del arranque sin variador, lo que genera los interarmónicos son las dinámicas no lineales inherentes al modelo matemático del motor de CA. Por otra parte en el caso del arranque con variador de velocidad la producción de interarmónicos además de lo antes mencionado también se relacionan con la tecnología de los interruptores de silicio que son usados para los diseños de los inversores y de los controladores de los variadores..

CONCLUSIONES

Se ha realizado un estudio sobre los armónicos e interarmónicos en sistemas de motor de inducción y variadores de velocidad. Se logró verificar la alta dinámica que tienen los interarmónicos cuando se conectan los motores directamente a la línea de suministro sin el uso de variadores de velocidad. Se comprobó que los variadores de velocidad si mejoran las condiciones de calidad de la energía en aplicaciones de motores de CA. Se validó que los incrementos en la carga generen un incremento en la dinámica de los interarmónicos. Se

verifica que la dinámica de los armónicos es más compleja con el variador de velocidad que con el motor conectado directamente. Como recomendaciones de trabajo futuro se propone verificar estos resultados en pruebas físicas, así también se propone incluir un módulo de paneles solares en conjunto con el controlador para estudios de armónicos y de interarmónicos aplicando energías renovables. Otro caso de estudio es la comparación de varios tipos de variadores de velocidad como los son de control vectorial y los de modulación de ancho del pulso.

AGRADECIMIENTOS

Los autores desean externar su agradecimiento al Consejo Nacional de Humanidades, Ciencia y Tecnología (CONAHCyT) por el apoyo financiero de gran utilidad para cumplir estas metas. Así como al Tecnológico Nacional de México y a nuestra alma mater el Instituto Tecnológico de Ciudad Guzmán.

BIBLIOGRAFÍA

[1] Dugan, R. et all (2004). *Electrical Power Systems Quality*. McGraw-Hill editors, 2a Ed., E.U. pp 1-2.

[2] Kusko, A. and Thompson, M. (2007). *Power Quality in Electrical Systems*. McGraw-Hill editors, 1a Ed., E.U. pp 1-2.

[3] Masoum, M. and Fuchs, E., (2008). *Power Quality in Power Systems and Electrical Machines*. Elsevier, 2a Ed., E.U.

[4] Li, H., Song, Y., Zhu, M., & Jiao, Y. (2022). *Experimental Interharmonic Sensitivity Evaluation of LED Lamps Based on the Luminous Flux Flicker Model*. *Energies*, 15(9), 2990.

[5] Drapela, J., Halpin, M., Langella, R., Meyer, J., Mueller, D., Sharma, H., ... & Zech, D. (2020, July). *Issues and challenges related to interharmonic distortion limits*. In *2020 19th International Conference on Harmonics and Quality of Power (ICHQP)* (pp. 1-6). IEEE

[6] Sangwongwanich, A., Yang, Y., Sera, D., & Blaabjerg, F. (2019). *Mission profile-oriented control for reliability and lifetime of photovoltaic inverters*. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 56(1), 601-610.

[7] Gudiño-Ochoa, A. et all , R. (2022). *Detección de Armónicos e Interarmónicos en la Calidad de Energía Aplicando la Transformada Wavelet Synchronizing*. *Difu100ci@, Revista De difusión científica, ingeniería Y tecnologías*, 16(3), 132-141.

[8] Mokhtari, M., and Martaj N. (2012). *Electronique Appliquée, Electromécanique sous Simscape & SimPowerSystems*. Springer. Germany

[9] Perelmuter, V. (2020). *Advanced Simulation of Alternative Energy. Simulation with Simulink and SimPowerSystems*. CRC Press. E.U.

