

Recibido 27 Septiembre 2018, aceptado 4 Diciembre 2018, fecha de publicación 16 Diciembre 2018

ISSN 2448-7775

Estrategias de Control y Ahorro Energético con el Empleo de Variadores de Velocidad

**FRANCISCO ENELDO LÓPEZ MONTEAGUDO¹, FRANCISCO BAÑUELOS RUEDAS¹,
RAFAEL VILLELA VARELA¹, AURELIO BELTRÁN TELLES¹,
JORGE DE LA TORRE Y RAMOS¹, JORGE LUIS DÍAZ RODRÍGUEZ².**

¹Universidad Autónoma de Zacatecas, México.

²Universidad de Pamplona, Colombia.

eneldolm@yahoo.com

fbanelosrs@hotmail.com

wrrmx@yahoo.com.mx

atellesz@yahoo.com.mx

jordortor@uaz.edu.mx

jdiazcu@gmail.com

RESUMEN En este artículo se analizan las diferentes estrategias avanzadas de control empleadas en los accionamientos de los motores de corriente alterna con convertidores de frecuencia, haciendo énfasis en las técnicas de regulación de velocidad a lazo cerrado, por sus mejores indicadores en el ahorro energético. Para estimar el ahorro energético es necesario conocer el proceso industrial en que se pretende instalar el regulador de velocidad. No todos los procesos ahorran energía, hay procesos en que la demanda de energía no varía con la velocidad. Con el fin de identificar puntos de ahorro en la industria, es necesario analizar el comportamiento de las cargas típicas.

PALABRAS CLAVES Ahorro energético, variadores de velocidad, convertidor de frecuencia, reguladores de corriente, inversores multinivel, deslizamiento.

I. INTRODUCCIÓN

En la industria es frecuente encontrarse con procesos que incluyen motores que trabajan en condiciones variables de carga tales como movimiento de líquidos, gases u otros. En estos casos, la regulación electrónica de la velocidad de los mismos en función de las necesidades sustituye a los sistemas tradicionales de controles obsoletos, responsables de importantes pérdidas de energía.

Actualmente más del 60% de la energía eléctrica demandada por la industria se utiliza en motores eléctricos, siendo el motor de inducción con rotor de jaula de ardilla, el más popular entre todos los motores eléctricos debido a que estos motores requieren menores exigencias de mantenimiento, tienen una gran robustez y una buena relación peso potencia, por lo tanto, el costo es significativamente más bajo. Por estas razones, dada su capacidad de soportar sobrecargas y su elevado rendimiento, es el motor más atractivo para la industria, [1-2].

Con el desarrollo de la electrónica se han desarrollado reguladores de velocidad para potencias bajas hasta varios MW,

Red de Sistemas Eléctricos de Potencia y Redes Inteligentes - CONACYT (RedSEP-RI/CONACYT).

lo que permite satisfacer todas las necesidades planteadas en sus diversas aplicaciones industriales. Su principal desventaja ha sido el control, problema totalmente resuelto con el empleo de los convertidores electrónicos, especialmente con los variadores de frecuencia, los cuales en algunas aplicaciones son capaces de producir ahorros energéticos de hasta el 70 % con estrategias de control eficientes, obteniéndose ahorros en mantenimiento ya que con estos sistemas de control los motores trabajan en todo momento en las condiciones de máxima eficiencia prolongando su vida útil en cualquier régimen de trabajo, mejorando la calidad del producto final.

Algunos convertidores de frecuencia incluyen funciones especiales de ahorro energético que ajustan la tensión aplicada al motor para maximizar su eficiencia en función de la carga conectada [3-4].

II. CONVERTIDORES DE FRECUENCIA

Los convertidores de frecuencia son dispositivos que se alimentan de la red de suministro eléctrico y generan corriente alterna de cualquier frecuencia, normalmente para accionar motores de inducción a velocidad variable, estos convertidores se alimentan de la RED industrial, se rectifica el voltaje y

mediante inversores se convierte la corriente directa (CD) a corriente alterna (CA), cuya magnitud y frecuencia pueden ser definidas [5-6].

Para garantizar una buena calidad en el suministro es necesario reducir la distorsión armónica producida por las ondas no sinusoidales generadas por los convertidores electrónicos, actualmente se han desarrollado diversas técnicas para atenuar este efecto, entre las más populares están las técnicas de modulación del ancho del pulso (PWM). Actualmente se han introducido las tecnologías de inversores multinivel como una alternativa muy importante en el área de media y alta tensión, estos inversores multinivel cuentan con un arreglo de semiconductores, que permiten la suma o resta de distintos niveles voltaje de CD, incrementando el número de niveles de voltaje de CD se puede obtener una onda casi sinusoidal [6-7].

Los convertidores electrónicos pueden ser directos e indirectos. Los primeros, también llamados cicloconvertidores, producen una tensión alterna uniendo fragmentos de senoide procedentes de las distintas fases del suministro. Tienen la ventaja de que pueden utilizar los tiristores de mayor potencia, relativamente lentos trabajando en conmutación natural. Pero sólo consiguen frecuencias muy inferiores a la de la red, además, se trata de dispositivos muy complicados que pueden necesitar 18, 36 o más tiristores para conectar las entradas a las salidas de todas las formas posibles. Por lo tanto, sólo se utilizan con potencias muy elevadas y motores lentos. Por esta razón los convertidores más utilizados en la industria son los indirectos, en la Fig. 1 se muestra una configuración de un convertidor indirecto [8].

Los convertidores indirectos se dividen en:

- Convertidores de fuente de voltaje (Voltage Source Inverter ó VSI).
- Convertidores de fuente de corriente (Current Source Inverter ó CSI).

Los convertidores de voltaje se dividen según la modulación utilizada en el inversor:

- Modulación por el valor de amplitud del pulso (Pulse Amplitude Modulation ó PAM).
- Modulación por ancho de pulso (Pulse Width Modulation ó PWM).

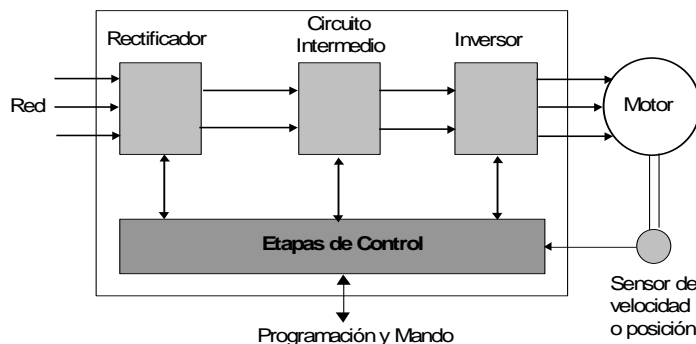


Fig. 1. Diagrama del Convertidor Indirecto.

La energía eléctrica procedente de la red en forma de corriente alterna monofásica o trifásica, normalmente de 60 Hz, llega a un rectificador que suministra corriente continua a una etapa intermedia más o menos compleja, le sigue un inversor que genera la corriente alterna trifásica de salida y alimenta el motor. Para controlar todos estos elementos se necesitan varios circuitos analógicos y digitales con sus correspondientes fuentes de alimentación y también algún sistema de programación, que permita introducir los parámetros de funcionamiento e indicar la consigna de velocidad o el torque mecánico que se desea.

III. ESTRATEGIAS DE CONTROL

Con el control a lazo abierto del motor de inducción a frecuencia variable, se puede obtener un accionamiento a velocidad variable satisfactorio cuando el motor trabaja a valores estables del torque, sin muchos requerimientos sobre la velocidad. Cuando los requerimientos del accionamiento necesitan de una respuesta dinámica rápida, de alta exactitud en la velocidad o de control del torque, el control a lazo abierto no brinda esta posibilidad. Es por ello que se hace necesario operar el motor en lazo cerrado cuando la operación en régimen dinámico del accionamiento representa un papel fundamental en los indicadores del sistema en el que él es parte.

El torque depende igualmente del flujo del entrehierro y de la velocidad del motor, por lo que se complica el diseño del sistema de control en los motores de inducción, no siendo así en su contra parte, el motor de corriente directa, donde el conmutador permite un control independiente del flujo y el torque, a costa del cual restringe la potencia y velocidad del motor, aumenta la inercia, la longitud axial y necesita mantenimiento, periódico. Sin embargo, los motores de corriente alterna trifásicos son más robustos, más eficientes y requieren menos mantenimiento, su principal desventaja ha sido el control de su velocidad cuestión totalmente resuelta con el empleo de los variadores de velocidad [8].

Las técnicas de control de la velocidad del motor de inducción se pueden clasificar en dos categorías:

A. Control Escalar

- Control Voltaje – Frecuencia (V/F).
- Control de la corriente del estator y de la frecuencia del deslizamiento (o simplemente Control del Deslizamiento).

B. Control Vectorial

- Control por Campo Orientado (FOC).
- Método Indirecto.
- Método Directo. Control sin Sensores (Speed Control without Sensors).
- Control Directo del Torque (DTC).

IV. CONTROL VOLTAJE – FRECUENCIA (V/F)

Para generar la mayor relación posible de torque por ampere en la corriente del estator y de aquí la mejor utilización posible de la capacidad de corriente disponible del accionamiento, el flujo debe permanecer constante y cercano a su valor nominal aun cuando las condiciones de operación varíen. Para lograr trabajar a flujo constante se puede ajustar para cada condición de operación dos parámetros controlables, que son la amplitud y frecuencia del voltaje de alimentación.

Un esquema de control V/F se muestra en la Fig. 2. En este tipo de control la relación entre la magnitud del voltaje y la frecuencia se conoce como ley de mando. Sin embargo, a bajas frecuencias disminuye el torque. Una posible solución es aumentar un poco más la tensión a frecuencias bajas, o aumentarla en proporción al consumo y la resistencia de los devanados. En los ventiladores y las bombas centrífugas apenas se necesita torque a bajas velocidades por lo que generalmente se hace es reducir la tensión para consumir menos energía. Muchos inversores permiten seleccionar la relación entre la tensión y la frecuencia según sea la carga mecánica. Las técnicas de control V/F están basadas en los modelos estáticos del motor de inducción para la operación a flujo constante [8].

V. CONTROL DEL DESLIZAMIENTO

Un sistema de control del deslizamiento de un motor de inducción alimentado por un inversor regulado por corriente se muestra en la Fig. 3. En esta técnica de regulación, las referencias trifásicas de corriente son comparadas con los valores instantáneos de las corrientes del motor. El error es la entrada a los Reguladores de Corriente y Generación de PWM. La amplitud de las referencias de corrientes se obtiene del bloque Generador de Funciones y la frecuencia se obtiene de la adición de la señal de frecuencia del rotor, que se obtiene mediante la medición de la velocidad y la señal de la frecuencia del deslizamiento. La frecuencia del deslizamiento se obtiene de la salida del regulador de velocidad, en el caso de accionamientos con control del torque.

Los reguladores de corriente generalmente son reguladores proporcionales integrales (PI), aunque también se pueden utilizar otras técnicas de regulación. El lazo intermedio de corriente usualmente debe de tener un ancho de banda grande para que el inversor se comporte como una fuente de corriente, en este caso se dice que el inversor está trabajando en modo de control de corriente (CCM) al que también se conoce con el nombre de inversor PWM regulado por corriente (CRPWM). En la Fig. 3 se muestra un inversor regulado por corriente con control de la frecuencia del deslizamiento [8].

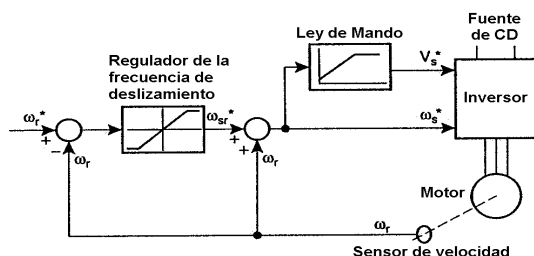


Fig. 2. Control de velocidad V/F con regulación de la frecuencia del deslizamiento.

VI. CONTROL POR CAMPO ORIENTADO (FOC)

Las técnicas de control vectorial han hecho posible la aplicación de motores de inducción para aplicaciones de altas prestaciones que solamente se podían lograr, hasta entonces, con motores de corriente directa. Los esquemas de control vectorial permiten controlar el motor de inducción de la misma manera que el motor de corriente directa de excitación independiente, obteniéndose un control independiente del flujo y el torque (por lo que el control vectorial se conoce también como control desacoplado). El control de este último se logra regulando la componente de la corriente que tiene que ver con el torque (i_{qs}) y el flujo se regula controlando (i_{ds}). Los esquemas básicos de los métodos indirecto y directo de control vectorial se muestran en la Fig. 4 y 5, respectivamente [8].

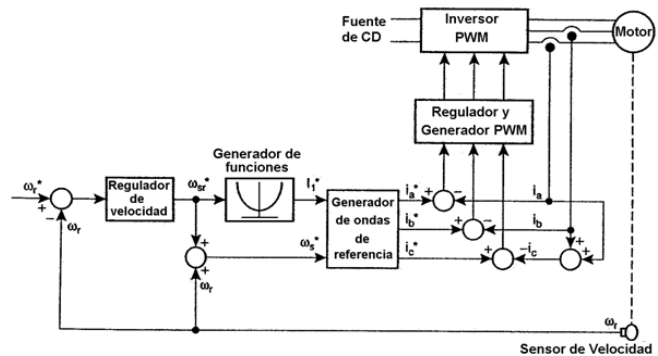


Fig. 3. Inversor CRPWM con control de la frecuencia del deslizamiento.

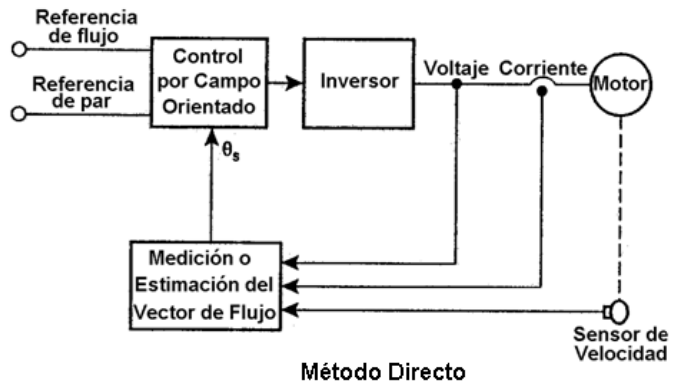


Fig. 4. Control Vectorial por Campo Orientado Directo.

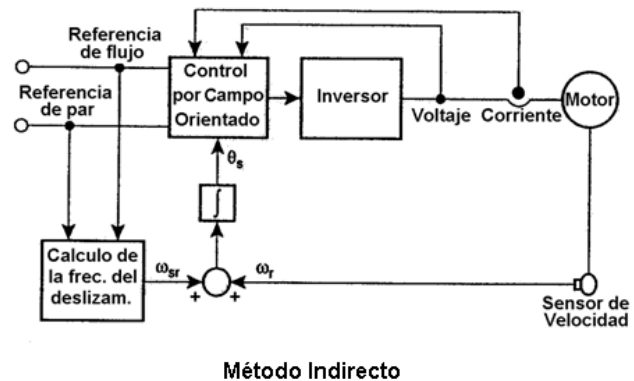


Fig. 5. Control Vectorial por Campo Orientado Indirecto.

En el método directo la generación del vector de corriente depende de las señales de flujo del estator o del entrehierro y el flujo del entrehierro puede ser medido directamente (sensores de efecto Hall) o estimarlo mediante los valores de voltaje y corrientes del estator. Las componentes del flujo del estator pueden ser directamente calculadas a través de sus magnitudes. En este método, la velocidad del rotor no es un requerimiento para obtener la información del ángulo espacial del campo o flujo del rotor (este ángulo también se conoce como ángulo de desacople).

El método indirecto es más simple de implementar debido a que se puede prescindir de medir o estimar el vector de flujo. El vector de la corriente se calcula con la medición de la velocidad del rotor y el valor de las referencias de flujo y torque (con las cuales se determina la frecuencia del deslizamiento).

VII. CONTROL SIN SENSORES

Los esquemas de control requieren de sensor de velocidad para su operación en lazo cerrado. El sensor de velocidad posee varios inconvenientes desde el punto de vista de costo, confiabilidad e inmunidad al ruido. Actualmente han sido propuestos varios métodos para la estimación de la velocidad, utilizando voltaje, corrientes y frecuencia del estator.

VIII. CONTROL DIRECTO DEL TORQUE (DTC)

La principal diferencia con los otros métodos de control es que el DTC no contiene un modulador PWM separado, sino que la posición de los interruptores del convertidor de potencia es determinada directamente por el estado electromagnético del motor. Para ello es necesario disponer de un modelo muy exacto del motor junto con una elevadísima capacidad de cálculo.

En la Fig. 6 se muestra un esquema básico de control directo del torque, el cual permite una respuesta dinámica mucho más rápida, que puede llegar a duplicar las prestaciones de los esquemas de control vectorial anteriores. El bloque de histéresis del torque y del flujo, compara los valores reales de estas variables con sus valores actuales y elabora la posición óptima de los interruptores del convertidor de potencia para seleccionar el vector de voltaje más indicado. El objetivo es obligar al vector de flujo del estator a variar en la forma que se establece los valores de referencia del torque y flujo del estator.

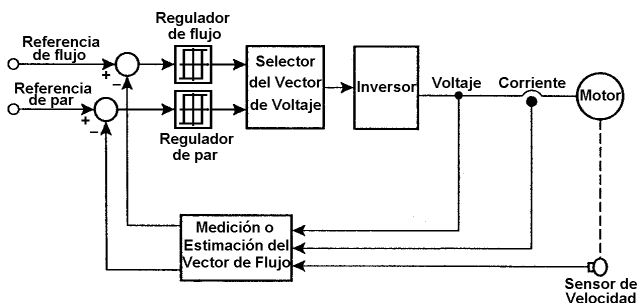


Fig. 6. Control Directo del Torque y Control Vectorial del Flujo del Estator.

Para determinar la secuencia de conmutación del inversor el DTC utiliza las últimas tecnologías de los microprocesadores, los procesadores digitales de señales (DSP), juntos con circuitos de propósito específicos (ASIC). Todas las señales de control se transmiten por fibra óptica para conseguir elevadas velocidades de transmisión.

IX. AHORRO ENERGÉTICO CON VARIADORES DE VELOCIDAD

Para estimar el ahorro energético es necesario conocer el proceso industrial en que se pretende instalar el regulador de velocidad. No todos los procesos ahorran energía, hay procesos en que la demanda de energía no varía con la velocidad. Con el fin de identificar puntos de ahorro en la industria, hay que analizar las cargas típicas y su comportamiento.

A. CARGA DE TORQUE CONSTANTE

En este tipo de cargas el torque es independiente de la velocidad aunque generalmente requieren un torque de arranque superior al torque nominal. En este tipo de accionamiento la característica mecánica es típica en cargas en las que predomina el efecto de la gravedad, como por ejemplo puentes grúa y montacargas, cintas transportadoras, etc. La Fig. 7 muestra el comportamiento de cargas de torque constante. En este tipo de carga el torque de arranque puede ser hasta un 50 % superior al torque nominal.

B. CARGA DE TORQUE CUADRÁTICO (TORQUE VARIABLE)

En este tipo de cargas el torque demandado al motor es proporcional al cuadrado de la velocidad, y por tanto, la potencia demandada lo será al cubo del caudal. Es característica de los accionamientos, ventiladores, bombas centrífugas, compresores centrífugos y axiales, etc. También es de tipo cuadrático el torque de fricción aerodinámico en vehículos y, por supuesto, el torque debido al ventilador en el propio eje en motores eléctricos autoventilados. La Fig. 8 muestra el comportamiento de cargas de torque variable. En este tipo de cargas el torque aumenta con la velocidad, generalmente el torque de arranque suele ser hasta de un 20 % superior al torque nominal.

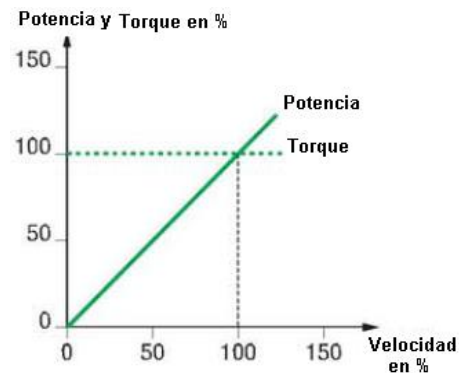


Fig. 7. Cargas de Torque Constante.

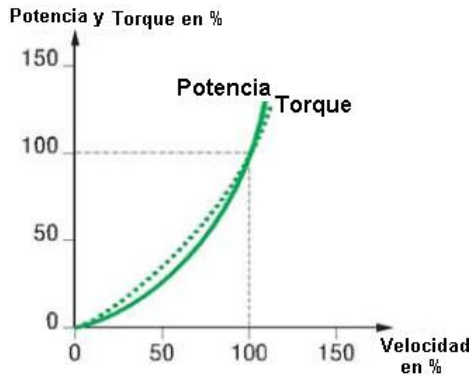


Fig. 8. Cargas de Torque Variable.

C. CARGA DE POTENCIA CONSTANTE

En este tipo de cargas el torque es inversamente proporcional a la velocidad, porque la potencia consumida es constante en toda la gama de velocidades. Es típico en máquinas herramientas con avance constante, como tornos, fresadoras, enrolladoras de cable, etc. La Fig. 9 muestra el comportamiento de cargas de potencia constante.

X. SELECCIÓN DEL CONVERTIDOR Y AHORRO ENERGÉTICO

En general, la conveniencia o no de instalar un convertidor de frecuencia en cada proceso industrial para regular un motor, dependerá de varios aspectos, entre los cuales destacan:

A. FORMA DE REGULACIÓN

Cuando la regulación del proceso se hace de forma mecánica, por ejemplo, válvulas de estrangulamiento en compresores, bombas, etc., ó cuando simplemente no se regula y se tiene continuamente sobredimensionado un mecanismo, la inclusión de un regulador de frecuencia permitirá un ahorro sustancial de energía.

B. CARACTERÍSTICAS DE LA INSTALACIÓN

Cuando una instalación se ha quedado pequeña, ha sufrido modificaciones ó simplemente, ha envejecido, y no soporta los esfuerzos que se le demandan, el hecho de regular arranques, paradas y velocidad de proceso para trabajar de una forma más continua pero más suave, proporcionará una disminución significativa de las averías y minimizará el número de paradas en el proceso de producción.

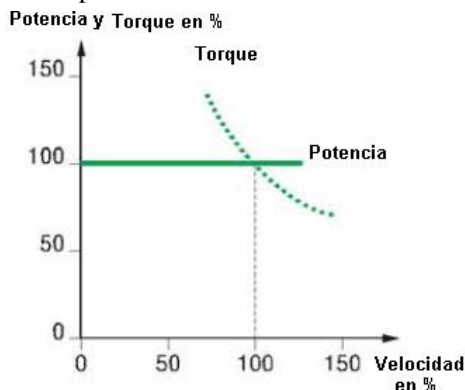


Fig. 9 Cargas de Potencia Constante.

C. TIEMPO DE FUNCIONAMIENTO

Si un equipo (bomba, compresor, cinta transportadora, etc.) trabaja un porcentaje de tiempo significativamente alto (más de 2.000 horas al año), con una regulación antieconómica, la amortización de la inversión será financiada por el ahorro, con tiempos de retorno del dinero invertido, en muchos casos, menores de un año.

Los tres parámetros que se acaban de citar son fundamentales para tomar la decisión de instalar un regulador de velocidad desde el punto de vista del ahorro energético. Una mala regulación en el proceso productivo provoca costos energéticos altos, calidades de producto alejadas del óptimo y averías que, una vez más, repercuten en una elevación innecesaria en el incremento de los costos.

Los ahorros más importantes se obtienen en cargas de torque cuadrático, donde una pequeña disminución de velocidad produce una gran disminución en la potencia absorbida por el motor, en este tipo de cargas es posible conseguir ahorros energéticos, siempre y cuando la demanda de caudal sea variable. En estas aplicaciones en lugar de regular el caudal mediante estrangulamiento se ajusta la velocidad del motor para que proporcione el caudal necesario en cada momento, como el caudal es proporcional a la velocidad del motor, bastará reducir al 50 % la velocidad del motor para reducir al 50 % el caudal, pero la potencia es proporcional al cubo de la velocidad luego al reducir la velocidad al 50 %, la potencia se reducirá a la octava parte, ya que $1/2$ elevado al cubo resulta ser $1/8$, un 25 % de la potencia. En este caso se obtienen ahorros del 75 % de la potencia nominal.

Finalmente, el ahorro de energía se determina por la fracción de tiempo operando bajo un nivel de carga en particular y el período de operación bajo esas condiciones.

D. AHORRO ENERGÉTICO CON CONVERTIDORES DE FRECUENCIA EN BOMBAS Y VENTILADORES

Un convertidor de frecuencia puede reducir el consumo de energía hasta un 70% variando la velocidad del motor. Incluso una reducción pequeña en la velocidad puede representar ahorros significativos. Por ejemplo, una bomba centrífuga o un ventilador funcionando al 80% de la velocidad consume sólo la mitad de la energía comparado con otro funcionando a plena velocidad.

Cerca del 60 % de las aplicaciones de los procesos industriales son bombas y ventiladores, es por ello por lo que son muy comunes en la industria y en el sector residencial. Una bomba centrífuga o un ventilador funcionando a media velocidad sólo consumen un octavo de la energía si se compara a su funcionamiento a plena velocidad. Esto es porque el torque necesitado para una bomba o un ventilador tienen una relación cuadrática con el volumen. Por ejemplo, reducir la velocidad de una bomba al 80% solamente requiere el 64% del torque (0.8×0.8). Y esto no es todo: para producir el 64% del torque sólo se requiere el 51% de la potencia (0.64×0.8), debido a que el requerimiento de potencia se reduce en el mismo sentido.

Si por ejemplo en un ventilador que gira a 1400 rpm con un consumo de 1500 W, al reducir la velocidad en un 20%, (1120 rpm), el consumo eléctrico se reduce aproximadamente en un

51.2%. Para determinar el ahorro energético se calcula la potencia mediante la Ecuación (1).

$$P_F = P_1 \left(\frac{n_F}{n_1} \right)^3 \quad (1)$$

$$P_F = 1500 (1120/1400)^3$$

P_F = 768 W (51.2% menos con respecto al consumo inicial)

Con los variadores de velocidad se minimizan las corrientes de arranque evitando caídas de tensión y eliminando paradas imprevistas, la variación de la velocidad del motor eléctrico se logra por variación de la frecuencia, lo cual permite una operación a máxima eficiencia en cualquier régimen de trabajo controlando la máxima demanda.

Un aspecto importante es la selección del variador de velocidad más adecuado basándose en las características de carga, ya que el torque de arranque del motor con el variador difiere del torque que se obtiene cuando se conecta directamente a la RED.

Los variadores de velocidad, pueden reducir el consumo eléctrico y alargar la vida de los motores, evitando las vibraciones de los arranques y paradas bruscas. Además poseen otras ventajas, por disponer de salidas de comunicación que le permiten comunicarse fácilmente a cualquier programa de control, entre las ventajas más significativas tenemos:

- Arranque suave de los motores
- Reducción del consumo.
- Arranque y freno programable por software
- Amplio rango en el control de la velocidad, el torque y la potencia.
- Alta respuesta dinámica.
- Mejora el proceso de control y por lo tanto la calidad del producto.
- Eleva la rentabilidad y la productividad de los procesos productivos.
- Minimiza las pérdidas en las instalaciones.
- Incremento de la vida útil del motor.
- Ahorro en mantenimiento (el motor trabaja siempre en las condiciones óptimas de funcionamiento).
- Reducción de picos de corriente (Reducción de estrés mecánico).
- Amplio rango de velocidad, torque y potencia.
- Protección del motor frente a sobrecorrientes y sobretensiones.

La utilización de variadores de velocidad tiene como consecuencia una fuerte inversión inicial sin embargo la amortización se financiará con el ahorro.

XI. CONCLUSIONES

Los convertidores de frecuencia han surgido como una excelente alternativa para controlar la velocidad al motor asincrónico de jaula de ardilla. Cuestión que hoy en día es casi imprescindible en muchas aplicaciones. Permitiendo que los procesos se adapten fácilmente a cualquier variación de la demanda o el suministro, lo que contribuye a reducir costos y a mejorar la calidad del producto, además, al suavizar los cambios

de velocidad reduce la fatiga de los mecanismos evitando un buen número de problemas. En otros casos puede interesar optimizar el torque y alcanzar la máxima aceleración que tolera el motor.

Los avances en la fabricación de semiconductores de potencia y el desarrollo de controles más potentes, unido a la experiencia cada vez mayor de fabricantes y usuarios, ha hecho que las aplicaciones de los convertidores de frecuencia hayan pasado muy rápidamente de ser una excepción a convertirse en un equipo omnipresente en muchas aplicaciones industriales.

En el ejemplo analizado con el variador de velocidad se obtiene un ahorro de energía del 51.26 %. Además, es necesario añadir los beneficios indirectos derivados de ahorro de mano de obra por automatización y el mejor funcionamiento de la instalación debido a la regulación más precisa del caudal demandado.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al CONACYT y a la Red de Sistemas Eléctricos de Potencia y Redes Inteligentes (RedSEP-RI/CONACYT) por su apoyo para la elaboración y difusión de estos trabajos de investigación.

REFERENCIAS

- [1] M. Parkhi, R.K. Dhatrak y Z. Khan. "Analysis of three phase induction motor fed by multilevel inverter using various modulation techniques with matlab simulink". International Journal of Advanced Research in Electrical, Electronics and Instrumentation Engineering ISSN (Print): 2320 - 3765, 2013, pp 3768-3777.
- [2] F. S. Castro C., J. Pérez R., J. A. Beristáin J. y A. Aganza T. "Control automático de velocidad para un motor de inducción trifásico". Revista de ingeniería eléctrica, electrónica y computación, vol. 4, No. 1, Julio 2008.
- [3] S. J. Chapman. Máquinas Eléctricas, 3ª. Ed., Mexico, McGrawHill, 2001.
- [4] J. Fraile Mora. Máquinas eléctricas, 6ª Ed. España, McGraw-Hill Interamericana de España, S.A. 2008.
- [5] A. Pardo, y J. L. Díaz. "Aplicaciones de los convertidores de frecuencia. Estrategias PWM". Editorial Java E. U., Pamplona, Colombia 2004.
- [6] F. Sevillano Calvo. Variadores de Frecuencia (2010), pp1-10.
- [7] L. X. Arana Suarez. "Variadores de frecuencia para el control de velocidad de motores asincrónicos jaula de ardilla". Trabajo de investigación, Quito D.M., 03 de Agosto del 2017. Disponible en: <http://www.dspace.uce.edu.ec/bitstream/25000/12956/1/T-UC-0010-002-2017.pdf>
- [8] J. L. Díaz Rodríguez. "Control por campo orientado del motor de inducción con adaptación de parámetros por modelo de referencia". Tesis de Maestría, Cuba, Universidad Central de Las Villas, 2000.