

Estrategias avanzadas de control en accionamientos de corriente alterna

Advanced control strategies on alternating current drives

J. L. Díaz

Departamento de Ing. Eléctrica, Facultad de Electromecánica,
Universidad de Camagüey, Camagüey, Cuba.
jdiazcu2002@yahoo.com.es

A. Pardo

Instituto de Investigación y Desarrollo de Tecnologías Aplicadas,
Universidad de Pamplona, Pamplona, Colombia.
apardo13@hotmail.com

Resumen

En este trabajo se revisa las diferentes estrategias avanzadas de control que se usan hoy en día en los convertidores de frecuencia empleados en el control de los motores de corriente alterna, principalmente del motor de inducción, haciendo énfasis en las técnicas de regulación de velocidad a lazo cerrado, por sus mejores indicadores. Las técnicas tratadas fue el Control Escalar, el Control Vectorial, el Control Directo del Par y el Control sin Sensores. Finalmente se expone en forma sintética la tendencia general en el accionamiento eléctrico automatizado.

Palabras claves: Control de motores, accionamiento eléctrico, control vectorial, control en campo orientado, control sin sensores, control directo del par (DTC).

Abstract

This work reviews different advanced electric motor control strategies, they are mentioned and use nowadays in frequency converters employ in the control of alternating currents motors, mainly of induction motor, emphasizing in close loop speed control techniques, for obtaining their best performance. The studied techniques were the Scalar Control, Vector Control, Sensorless Control and Direct Torque Control (DTC). Finally, were exposed a resume of the general trends in the automated electric drives.

Key words: Motor control, electric drives, vector control, field oriented control, sensorless control, DTC.

1 Introducción

Robusto y barato, el motor de inducción con rotor de jaula de ardilla es, sin duda, el más popular entre todos los motores eléctricos. Su campo de aplicación va desde potencias fraccionarias hasta varios cientos de kW. En el caso de estas últimas, o para ciertas aplicaciones especiales, hay que tener en cuenta también las posibilidades que ofrecen los motores sincrónicos. En ambos casos se trata de máquinas de corriente alterna, que pueden alimentarse de la red eléctrica y cuyo funcionamiento no presenta grandes

dificultades siempre que se desea trabajar a velocidad constante.

Cuando se desea controlar la velocidad o el par mecánico de forma ágil y precisa, no hay nada mejor que un motor eléctrico alimentado por un regulador electrónico. Hace unos diez años el motor de continua era el líder de las aplicaciones a velocidad variable, porque hasta entonces los convertidores de frecuencia todavía eran bastante caros, complejos y pocos fiables. Pero la situación ha cambiado por los avances en la fabricación de semiconductores de potencia y circuitos de control más potentes que permiten incluir estrategias más eficaces.

2 Tipos de 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, actualmente casi todos son electrónicos, pero también se fabrican algunos convertidores electromecánicos. Estos últimos son más caros, más grandes y necesitan más cuidados, pero a cambio suministran una CA más sinusoidal, suelen utilizarse a frecuencia fija, para alimentar motores especiales y aparatos que han sido diseñados para alimentarse con frecuencias de 60 o 400 Hz.

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. Los convertidores más habituales (los únicos a los que se hará referencia a partir de ahora) son los indirectos.

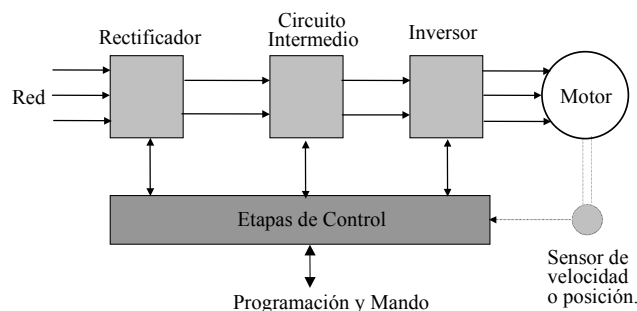


Fig. 1. Diagrama del convertidor indirecto.

Los convertidores indirectos se dividen en:

- Convertidores de fuente de voltaje (voltage source inverter o VSI).
- Convertidores de fuente de corriente (current source inverter o 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 o PAM).
- Modulación por ancho de pulso (pulse width modulation o PWM).

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 par mecánico que se desea.

3 Estrategias de control

3.1 Introducción

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 par, 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 par, el control a lazo abierto no brinda esta posibilidad. Es por eso 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 par depende igualmente del flujo del entrehierro y de la velocidad del motor, hecho este que complica el diseño del sistema de control en los motores de inducción, no siendo así en su contra parte, el motor de CD, donde el conmutador permite un control independiente del flujo y el par, a costa del cual restringe la potencia y velocidad del motor, aumenta la inercia, la longitud axial y necesita mantenimiento periódico. Con los motores de alterna, alimentados con convertidores de frecuencia, el conmutador es eliminado, a un considerable costo y complejidad, sin embargo.

Varias técnicas de control de la velocidad del motor de inducción han sido propuestas. Estos esquemas de forma general se pueden clasificar en dos grandes categorías:

- Control escalar:
 - Control voltaje – frecuencia (v/f).
 - Control de la corriente del estator y de la frecuencia del deslizamiento (control del deslizamiento).
- Control vectorial:
 - Control por campo orientado (foc) *método indirecto.*
 - Control sin sensores. (sensorless).
- Control directo del par. (dte).

3.2 Técnicas de control escalar

Control voltaje – frecuencia (V/F): Para generar la mayor posible relación de par 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 simple 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.

Los primeros convertidores que utilizaron esta técnica sólo permitían un margen muy limitado de velocidades porque al mantener constante la relación V/F no se ha tenido en cuenta que los devanados también tienen resistencia óhmica, que no varía con la frecuencia. El resultado es que a bajas frecuencias disminuye el par. 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 para a bajas velocidades y lo que suele hacerse es reducir más 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.

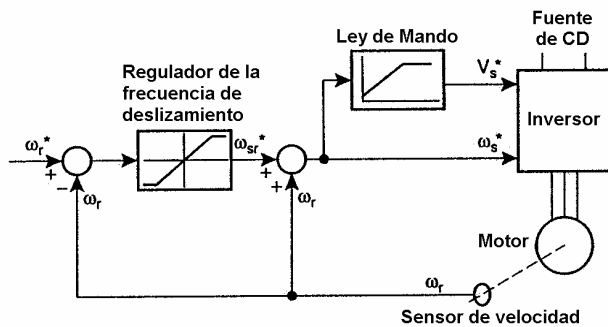


Fig. 2. Control de vel. V/F con regulación de la frec. del deslizamiento.

Control del deslizamiento: Un típico sistema de control 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 obtienen 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 con un encoder, y la señal de la frecuencia del deslizamiento. La frecuencia del deslizamiento se obtiene de salida del regulador de velocidad o de una tabla con los valores optimizados del deslizamiento, en el caso de accionamientos con control del par.

Los reguladores de corriente y generación de pwm pueden ser reguladores histerésicos o reguladores proporcionales integrales (PI) con comparación con rampa (método suboscilatorio), aunque también se pueden utilizar

otras técnicas de regulación. Este lazo intermedio de corriente, que usualmente debe de tener un ancho de banda grande, hace que el inversor se comporte como fuente de corriente, siendo la técnica de modulación PWM utilizada en los convertidores por voltaje.

En este caso se dice que el inversor está trabajando en modo de control de corriente (Current Control Mode o simplemente CCM), también se conoce con el nombre de inversor PWM regulado por corriente (Current Regulated Pulse Width Modulation o simplemente CRPWM).

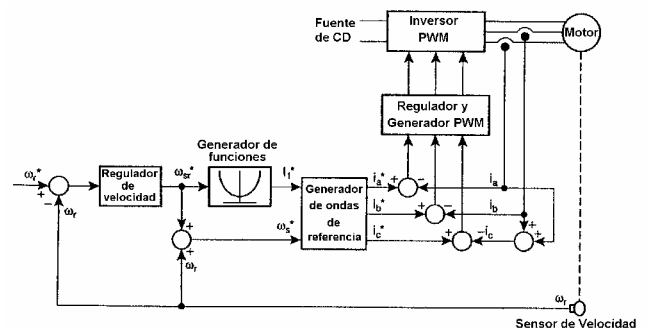


Fig. 3. Inversor CRPWM con control de la frec. del deslizamiento.

4 Técnicas de control vectorial

Control por campo orientado (FOC): Las técnicas de control vectorial han hecho posible la aplicación de motores de inducción para aplicaciones de alta prestaciones donde 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. Como en el motor de CD, se logra un control independiente del flujo y el par (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 par (i_{qs}) y el del flujo, controlando (i_{ds}). Los esquemas básicos los métodos indirecto y directo de control vectorial se muestran en la Figs. 4 a y b.

El método directo es mostrado en la Fig. 4 (a). La generación del vector de corriente depende de las señales de flujo del estator o del entrehierro. El flujo del entrehierro puede ser medido directamente (sensores de efecto Hall) o estimando 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 desacoplo).

En el método indirecto que se muestra en la Fig. 4 (b) es más simple de implementar debido a se prescinde 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 par (con las cuales se determina la frecuencia del deslizamiento). Anteriormente se mencionó el Control Vectorial por Campo Orientado, que este nombre genérico se le da al caso de cuando la orientación del flujo es el flujo del rotor. De hecho el sistema de Control Vectorial puede estar orientado al flujo del estator o también al el flujo del entrehierro.

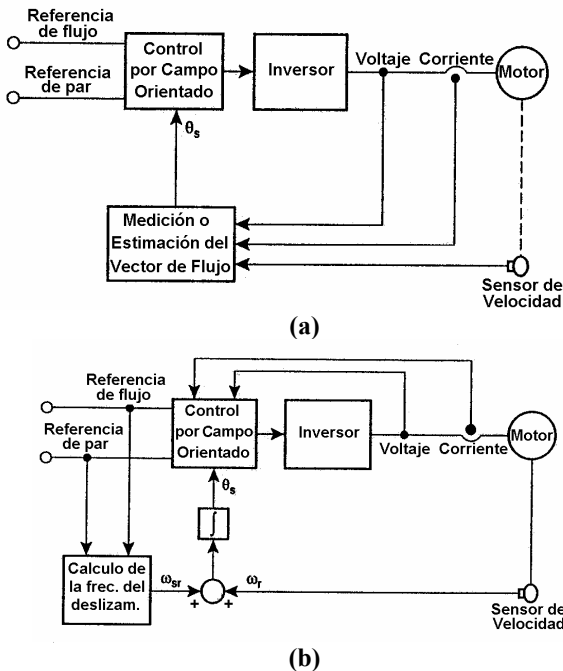


Fig. 4. Control vectorial por campo orientado. Método directo (a) y método indirecto (b)

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. Este tema se conoce como Control de Velocidad sin Sensores (Speed Sensorless Control) en el cual se está investigando.

Estas técnicas se pueden clasificar en:

- Control de velocidad en lazo abierto con compensación del deslizamiento.
- Control a lazo cerrado con estimación de la velocidad.

En el primer caso la velocidad sincrónica del motor se regula, mientras que la frecuencia del deslizamiento se utiliza solamente para compensar los cambios de la carga. Y en el segundo caso, la velocidad del motor se estima y se utiliza como señal de retroalimentación a lazo cerrado.

Control directo del par (DTC): La principal diferencia con los otros métodos de control anteriores es que el DTC no existe 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.

La Fig. 5 muestra un esquema básico de control directo del par el cual permite una respuesta dinámica mucho más rápida, que inclusive puede llegar a duplicar las prestaciones de los esquemas de control vectorial anteriores.

El bloque de histéresis del par 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 par y 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.

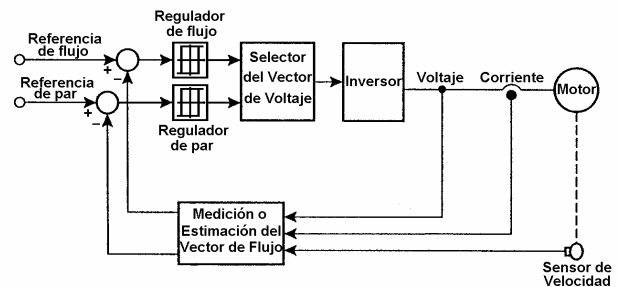


Fig. 5. Control directo del par.

5 Notas finales

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 muchos casos. 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 y, además, el suavizar los cambios de velocidad reduce la fatiga de los mecanismos evitando un buen número de problemas. En otros casos puede interesar optimizar el par y alcanzar la máxima aceleración que tolera el motor.

Esta es la razón del éxito que han tenido, desde su aparición en el mercado, unos equipos como los convertidores de frecuencia. Ya que son capaces de actuar simultáneamente sobre la frecuencia y sobre la tensión o la intensidad de su alimentación. Dotando a los motores de corriente alterna con la posibilidad de variación de velocidad sin saltos y con pocas pérdidas.

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.

El futuro de los accionamientos estará caracterizado de forma general por:

- El descenso cada día más de la utilidad de los accionamientos de CD.
- El ascenso gradual y la superioridad de los accionamientos de CA, con predominio del motor asincrónico de jaula de ardilla. En aplicaciones de precisión y alta potencia dominio de motores sincrónicos de imán permanente.
- Seguirán dominando los accionamientos en lazo abierto según su aplicación específica, pero emergerá cada vez más el uso de accionamientos en lazo cerrado.
- Aumento de la aplicación de técnicas avanzadas de control como Control Inteligente (Control por Lógica Fuzzy, Redes Neuronales Artificiales, Algoritmos Genéticos, etc.), Técnicas de Control Adaptable, Control Predictivo, etc.
- Aun mayor presencia de controles adaptables y autosintonizables gracias al desarrollo y abaratamiento de los DSPs.
- Se comenzará a utilizar el término MOTOR ELECTRONICO. Debido a la venta compacta de los bloques convertidor - motor.
- Tendencia a la simplificación que condiciona la limitación del empleo de máquinas que precisen de más de una fuente de alimentación.
- Eliminación de los elementos sensores de velocidad.

Referencias

Bergas J y Sudrià A, 1995, DTC: la tecnología más avanzada, *Automática e Instrumentación*, España, No. 255, pp. 83 - 84.

Bose BK, 1992, *Power electronics – a technology review*, Proceedings of IEEE, Vol. 82, No. 8.

Bose BK, 1986, *Power electronics and AC drives*, Prentice-Hall, NJ.

Briz F, 1995, Control vectorial del motor de inducción con identificación y adaptación a los parámetros de la carga, Tesis doctoral, Universidad de Oviedo.

Díaz JL, 2000, Control por campo orientado del motor de inducción con adaptación de parámetros por modelo de referencia, Tesis de Maestría, Universidad Central de Las Villas.

Díaz JL, 1996, Simulación de sistemas de accionamiento eléctrico, Trabajo de Diploma, Universidad de Camagüey, Cuba.

Ho EY y Sen PC, 1988, Decoupling control of induction motor drive, *IEEE Trans. Ind. Elect.*, Vol. IE-35, No. 2, pp. 253-262.

Holtz J, 1993, Speed estimation and sensorless control of AC drives, *IEEE IECON*.

Kubota H y Matsuse K, 1994, Speed sensorless field oriented control of induction machines, *IEEE IECON*, pp. 1611-1615.

Leonhard W, 1988, Adjustable-speed AC drives, *Proc. of IEEE*, Vol. 76, No. 4, pp. 455-470.

Leonhard W, 1985, *Control of electrical drives*, Springer-Verlag, Heidelberg.

Pohjalainen P, Tiitinen P y Lalu J, 1994, The next generation motor control method - direct torque control, DTC, *EPE Chapter Symposium*, Lausana, Suiza.

Rajashékara K, Kawamura A y Matsuse K, 1996, *Sensorless control of AC drives*, IEEE Press.

Ramos R y López E, 1998, Control vectorial del motor de inducción por campo orientado, Trabajo de Diploma, Universidad de Camagüey, Cuba.

Rojas I, 2000, Inversores de frecuencia con modulación del ancho de pulso empleados para el control del motor de inducción, Tesis de Maestría, Universidad de Camagüey, Cuba.

Sudrià A, 1995, Una nueva generación de métodos de control del motor de inducción, *Automática e Instrumentación*, España, No. 250, pp. 52 - 54.

Suelves F, 1995, Convertidores de frecuencia, *Automática e Instrumentación*, España, No. 257, pp. 104 -116.

Vas P, 1990, *Vector control of AC machines*, Oxford Science Publications, New York.

