

DTC: una técnica de control de motores para todas las estaciones

DTC: una técnica de control de motores para todas las estaciones

Los variadores de velocidad (variadores de frecuencia o VSD, por sus siglas en inglés, o convertidores de frecuencia) han hecho posible un rendimiento sin precedentes en los motores eléctricos y han supuesto un enorme ahorro energético al igualar la velocidad y el par de los motores a los requisitos reales de la carga accionada. La mayoría de los variadores del mercado se basan en una etapa de modulador que acondiciona las entradas de tensión y frecuencia al motor, pero que provocan una demora inherente en el procesamiento de las señales de control. Por contra, los variadores de altas prestaciones de ABB emplean el control directo de par (DTC) –una tecnología innovadora creada por ABB– y aumentan considerablemente la respuesta de par del motor. Además, el DTC aporta otras ventajas y ha crecido hasta convertirse en una marca tecnológica mayor que abarca el hardware del convertidor, el software de control y numerosas características del nivel de sistema.

Con frecuencia, los motores eléctricos se encuentran en primera línea de los sistemas de producción modernos, ya sea en líneas de procesamiento de metales, células robotizadas de mecanizado o sistemas de automatización de edificios y oficinas. Sin duda, los motores que vemos en la actualidad se han beneficiado del avance de los materiales eléctricos, las eficiencias de fabricación y las herramientas analíticas. Sin embargo, sus principios de diseño no han variado durante más de 100 años en el caso del caballo de batalla, el motor asíncrono (o de inducción) de corriente alterna (CA). De hecho, el rendimiento notable de estos motores en las aplicaciones actuales se debe al uso de controles electrónicos modernos –los variadores de velocidad (VSD)– y modelos de motor exactos cuyos algoritmos de control avanzados pueden ejecutarse rápidamente en procesadores de señales digitales de alto rendimiento. Además, el desarrollo de los variadores ha permitido el uso de nuevas tecnologías de motor de CA, tales como los motores síncronos de imanes permanentes y los motores síncronos de reluctancia.

En un principio, la atención de los desarrolladores de convertidores de frecuencia se centró en los motores de corriente continua (CC). Con una historia aún más larga que la de sus primos de CA, los motores de CC ofrecían un control inherentemente simple de la velocidad y el par. Sin embargo, los motores de CC también tienen la contrapartida de un mayor coste del motor, una construcción más compleja dependiente de un conmutador mecánico y problemas de mantenimiento de las escobillas.

Los motores de inducción de CA presentaban una construcción más simple y resistente y suponían un menor coste y menos preocupaciones de mantenimiento,

características todas ellas que han universalizado su uso y han dado lugar a una enorme base instalada en todo el mundo. Por otra parte, se comprobó que el control de los motores de inducción resultaba más complejo. Un control exacto de la velocidad y, en particular, el control del par, eran un problema por resolver en los primeros convertidores de CA. Naturalmente, el objetivo de los diseñadores fue en un principio emular en los convertidores de CA el control sencillo del par motor ya presente en los convertidores de CC. Se basaron en la corriente del inducido. Con el paso del tiempo, los diseños de los convertidores de CA han evolucionado para aportar un mayor rendimiento dinámico. (En la Ref. 1 encontrará un análisis reciente y digno de mención sobre los distintos métodos de control disponibles en los convertidores de CA.)

La mayoría de los variadores de altas prestaciones de la década de 1980 se basaban en la modulación por ancho de pulso (PWM, por sus siglas en inglés). Sin embargo, una consecuencia de utilizar una etapa de modulador es la demora y la necesidad de filtrar las corrientes medidas al ejecutar órdenes de control de los motores, lo que ralentiza la respuesta de par motor.

Por contra, ABB adoptó un planteamiento diferente para el control de los motores de CA de altas prestaciones. Los convertidores de CA de ABB destinados a aplicaciones exigentes utilizan una tecnología innovadora llamada «control directo de par» (DTC, por sus siglas en inglés). Este método controla directamente el par motor en lugar de intentar controlar de forma analógica las corrientes que llegan a los convertidores de CC. Se traduce en una mayor precisión en la adaptación a los requisitos de carga del sistema accionado. Creado por una de las compañías

fundadoras de ABB y patentado a mediados de la década de 1980, el DTC elimina además la necesidad de una etapa de modulador adicional y, con ello, logra una dinámica de control cercana al máximo teórico. ABB lanzó al mercado su primer convertidor de frecuencia industrial de CA con control directo de par en 1995 (Ref. 2).

Aunque en 1995 el DTC ya era una tecnología líder, posteriores desarrollos en cuanto a potencia de cálculo de los procesadores, interfaces de comunicación, programación de aplicaciones, etc., han hecho posible un mayor rendimiento y permiten un control exacto de los motores en una amplia variedad de aplicaciones.

¿Por qué usar el DTC? Una respuesta de par superior es solo una de las características del DTC. Esta tecnología ofrece otras ventajas al cliente, por ejemplo

- No requiere realimentación de la velocidad o la posición del motor en el 95 % de las aplicaciones. Por tanto, se evita la instalación de costosos encoders u otros dispositivos de realimentación.
- El control DTC está disponible para distintos tipos de motores, incluidos los motores de imanes permanentes y los síncronos de reluctancia.
- Control exacto del par y la velocidad incluso a bajas velocidades, además de un par máximo de arranque desde incluso la velocidad cero.

- Excelente linealidad del par.
- Alta exactitud de velocidad estática y dinámica.
- Sin frecuencia de conmutación preestablecida. La conmutación de transistores óptima se determina en cada ciclo de control, por lo que el convertidor puede adaptarse más fácilmente a los requisitos de la carga accionada.

A una escala mayor, las ventajas del DTC se extienden al software, las interfaces de usuario, el mantenimiento y las características de sistema.

Tal como sugiere su nombre, el objetivo del DTC es controlar directamente el flujo y el par del motor, en lugar de intentar controlar estas variables indirectamente como hacen los convertidores de CC y los convertidores de CA controlados por vectores. El sistema de DTC completo consta de bucles de control de par y velocidad separados que, no obstante, funcionan de forma integrada (véase la Fig. 1, Esquema de bloques del DTC).

El corazón del DTC es el bucle de control de par, donde un modelo de motor adaptativo avanzado aplica algoritmos matemáticos sofisticados para predecir el estado del motor. El modelo de motor predice con exactitud las principales variables controladas, tales como el flujo del estator y el par motor, tomando como entradas las corrientes de las fases del motor y las mediciones de tensión del bus de CC,

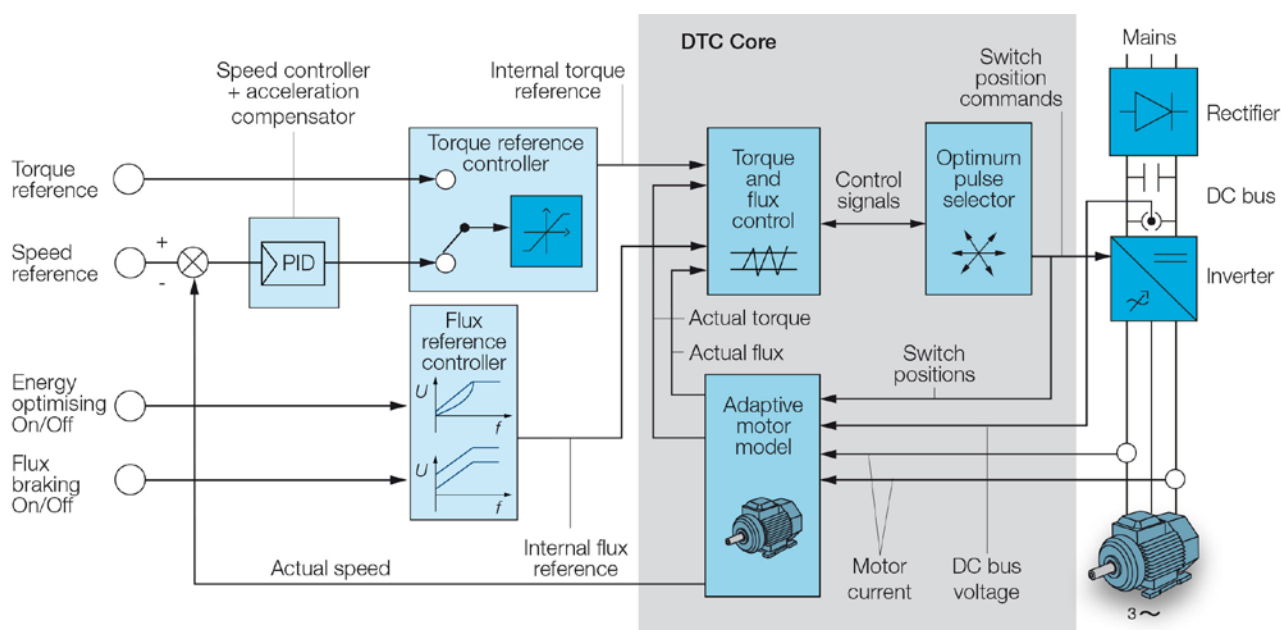


Figura 1: Principio de funcionamiento del DTC.

así como los estados de los transistores de conmutación de potencia del convertidor. El modelo de motor también calcula la velocidad del eje. La compensación de temperatura ayuda a mejorar la exactitud del cálculo sin necesidad de un encoder.

Existen otros parámetros del motor que se alimentan automáticamente al modelo adaptativo durante una marcha de identificación de motor que forma parte de la puesta en servicio del convertidor. En muchos casos, la identificación de los parámetros adecuados para el modelo puede realizarse sin hacer girar el eje del motor. El ajuste fino del modelo de motor, que solo se requiere en unas pocas aplicaciones altamente exigentes, requiere el funcionamiento del motor, aunque solo durante un tiempo breve y sin carga.

El único parámetro –y, además, fácil de medir– necesario para predecir el flujo magnético del motor es la resistencia del estátor (la caída de tensión). Con él es posible calcular el par motor, como producto vectorial del flujo de estátor estimado y los vectores de corriente del estátor. Aunque la resistencia del estátor es la principal fuente de errores de predicción, su influencia se reduce a medida que aumentan la velocidad del motor y la tensión. Por tanto, el DTC presenta una excelente exactitud de par en un amplio intervalo de velocidades. Además, el DTC incluye formas avanzadas para minimizar los errores de predicción con bajas velocidades de motor.

Las señales de salida del modelo de motor –que representan los valores reales de flujo de estátor y par motor– pasan por un comparador de flujo y un comparador de par, respectivamente (Fig.1). Estas unidades de control separadas comparan sus entradas con un valor de referencia de flujo y par. Ya desde mediados de la década de 1990, los primeros convertidores controlados por DTC realizaban estas funciones cada 25 microsegundos (μs) mediante un potente procesador de señales digitales (DSP). En la generación de control más reciente, este intervalo se reduce a tan solo 12,5 μs , lo que aumenta aún más el rendimiento de control. Ambos comparadores trabajan para mantener su respectiva magnitud vectorial de flujo o par dentro de una estrecha franja de histéresis alrededor de un valor de referencia. La rápida respuesta de par del DTC sin superación de referencia se debe, en parte, a su capacidad para minimizar estas fluctuaciones en los vectores. Su excepcional respuesta de motor también es fruto de los algoritmos de control de los DSP, que actualizan el modelo de motor adaptativo con una

frecuencia de ciclo igualmente elevada.

Los errores de flujo y par –las diferencias entre los valores estimados y los de referencia– y la posición angular (o sectorial) del vector de flujo de estátor se utilizan para calcular el estado de flujo y par de los controladores de histéresis. A continuación, estos valores de estado se convierten en entradas del selector de pulso óptimo, que selecciona el vector de tensión óptimo con una tabla de referencia (Fig. 1). De este modo, es posible enviar los pulsos de señal más adecuados para cada ciclo de control a los conmutadores de potencia del inversor, obteniendo y manteniendo así un par motor exacto.

Una forma de lógica programable –la así llamada matriz de puertas programable por el usuario (FPGA, por sus siglas en inglés)– ayuda al DSP a determinar la lógica de conmutación del inversor y otras tareas. La FPGA permite realizar modificaciones de control o cambios en el diseño del convertidor, a diferencia de un circuito integrado de aplicación específica (ASIC) que obligaría a mantener un diseño fijo. El bucle de control de velocidad, que contiene el resto de los bloques funcionales del DTC, se describe en el Anexo 1.

Indicadores de rendimiento

El DTC ofrece a los clientes características de rendimiento superiores a los métodos de convertidor competidores. Al ser desde sus inicios un método de control sin sensores (basado en la predicción de la velocidad en lugar de su medición), en la mayoría de los casos no se requieren costosos dispositivos de realimentación de velocidad o posición del motor. En función del tamaño del motor, se consigue una exactitud típica con el motor estacionario de incluso un $\pm 0,1$ %. En las aplicaciones más exigentes, un convertidor DTC equipado con un encoder estándar (1024 pulsos/rev.) logra típicamente una exactitud de velocidad del $\pm 0,01$ %.

La exactitud de velocidad dinámica (la integral de la desviación de velocidad respecto al tiempo con un impacto de carga del 100 %) es de 0,3-0,4 %s con los equipos típicos accionados por el motor. Cuando se utiliza un encoder, la exactitud de velocidad aumenta típicamente hasta los 0,1 %s e iguala a la exactitud de un convertidor servo.

El tiempo de respuesta de par típico para un paso de referencia de par del 100 % es de 1-5 milisegundos (ms), lo que se sitúa cerca del límite físico del motor. La repetitividad de par típica ante una misma orden de referencia es de tan solo un 1 % del par nominal en todo el intervalo de velocidades del convertidor. En cuanto al control de velocidades de motor muy bajas, el DTC proporciona un 100 % de par incluso hasta la velocidad cero, sin (o con) realimentación de velocidad, además de una característica de control de posición si se utiliza un encoder. Estos valores de rendimiento se refieren específicamente al control de motores de inducción.

No solo motores de inducción

El DTC se desarrolló originalmente para los motores de inducción de CA dada su popularidad en un sinfín de aplicaciones industriales y comerciales. Sin duda alguna, la tecnología de motor de inducción conservará su papel como «caballo de batalla» en un futuro previsible. Sin embargo, ante la búsqueda de una mayor densidad de potencia y la evolución de la legislación internacional en materia de eficiencia, otras topologías de motor están suscitando un nuevo interés.

Por ejemplo, la norma IEC 60034 parte 30 (Ref. 3) define clases de eficiencia internacional (o IE), la mayor de las cuales –la IE4 (eficiencia súper premium)– resulta difícil de alcanzar para los motores de inducción. Aunque sin más especificaciones, la recientemente aprobada 2.ª edición de la norma IEC 60034-30 propone una clase aún superior, la IE5.

La buena noticia es que el DTC es igualmente aplicable a otros tipos de motores, tales como los motores síncronos de imanes permanentes (PM) y los síncronos de reluctancia (SynRM). La diferencia principal radica en el arranque del motor. A diferencia de los motores de inducción, los motores síncronos PM y los motores SynRM requieren que el sistema de control realice una estimación de la posición del rotor en el arranque a partir de la ubicación de los polos del rotor, si no se utiliza ningún sensor de posición.

En estos motores, la ausencia de devanados de rotor y el efecto de deslizamiento de velocidad inherente a los motores de inducción reducen sustancialmente las pérdidas, lo que resulta en un aumento de la eficiencia. Asimismo, el funcionamiento síncrono significa que se logra una excelente exactitud de velocidad incluso sin ningún sensor de

velocidad o posición. Por tanto, en la mayoría de los casos puede prescindirse de los sensores, excepto en aplicaciones que requieren un par distinto de cero con el motor parado durante periodos prolongados, tales como los cabrestantes y polipastos.

Normalmente, se montan imanes permanentes en la superficie exterior del rotor. Sin embargo, una variante del motor síncrono PM, el diseño de rotor PM interno (IPM), integra los imanes dentro de la estructura del rotor. El componente de par de reluctancia adicional generado en los motores síncronos IPM los hace atractivos para las aplicaciones muy exigentes. Además, los imanes integrados crean una saliencia muy pronunciada de los polos del rotor, lo que permite predecir la velocidad con exactitud y mejora el modo básico de funcionamiento sin sensores del DTC.

Gracias a la alta relación entre par y tamaño del motor, los motores síncronos PM permiten crear sistemas de tren de accionamiento más simples. Por ejemplo, un motor PM de baja velocidad con accionamiento directo puede eliminar la caja reductora de las máquinas de embalaje.

Entre las numerosas aplicaciones de los motores síncronos PM están las máquinas-herramienta, la propulsión naval, los aerogeneradores y los ventiladores de las torres de refrigeración de las plantas de generación eléctrica.

Una de las desventajas, en parte económicas, de los motores síncronos PM es su dependencia de los materiales magnéticos de «tierras raras» (TR) para lograr un rendimiento óptimo. El más utilizado de los materiales TR es el compuesto de neodimio-hierro-boro. Su precio en los últimos tiempos y los problemas de oferta mundial de los materiales TR suscitan entre los fabricantes de equipos serias dudas que van mucho más allá de los propios motores eléctricos (Ref. 4). Aquí es donde los motores síncronos de reluctancia ofrecen una alternativa.

ABB ha incluido en su gama de productos toda una línea de paquetes de motor SynRM y convertidor de frecuencia, en parte para adelantarse a posibles problemas de disponibilidad de los imanes de tierras raras (Ref. 5). Los motores síncronos de reluctancia presentan una estructura de estátor similar a la de los motores de inducción. Sin

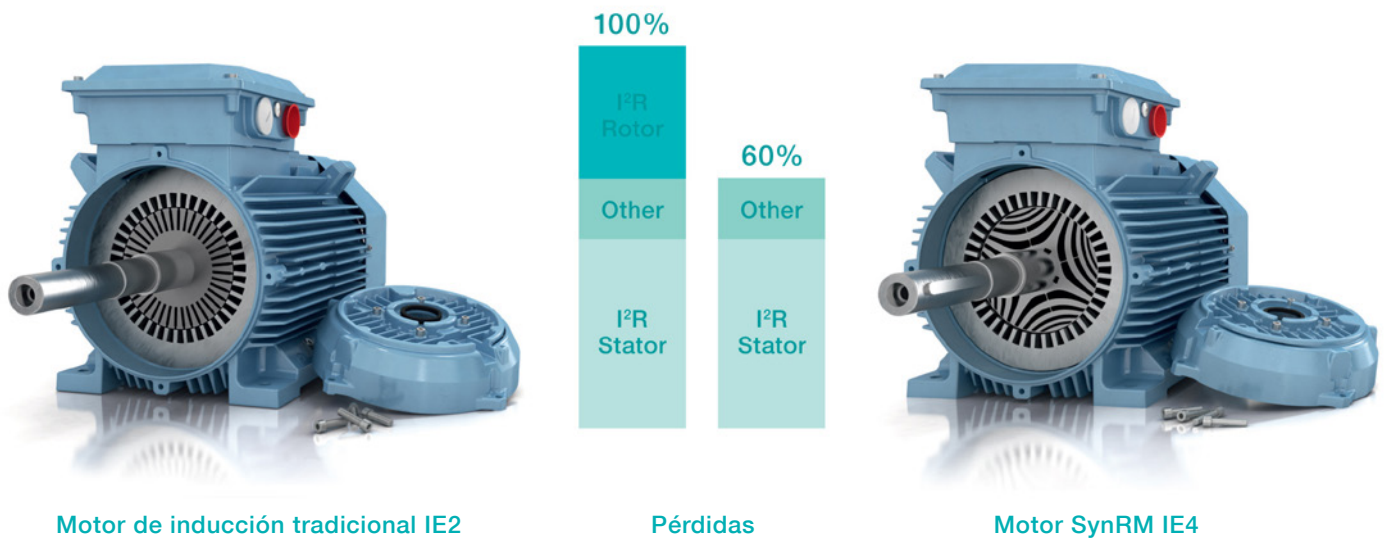


Figura 2: El nuevo motor síncrono de reluctancia utiliza un nuevo diseño de rotor y está optimizado para su uso con variadores. Esta tecnología recorta las pérdidas de rotor, aumenta la fiabilidad y permite diseños más pequeños y más ligeros (paquetes de alta potencia de motor SynRM y convertidor) o tremendamente eficientes (paquetes de motor SynRM IE4 y convertidor).

embargo, el rotor consta de laminados de acero apilados axialmente y conformados para crear una sección transversal de cuatro polos, alternando ejes altamente permeables (de hierro) y poco permeables (aire). Un hecho importante es que el rotor no requiere ningún imán.

Entre las aplicaciones típicas de los motores SynRM está el accionamiento de bombas y ventiladores, en el que existe una relación de par cuadrático (y, por tanto, de potencia cúbica) con la velocidad (véase más abajo).

ABB ha implementado versiones del DTC modificadas para los motores síncronos PM y SynRM. Un dato importante para los clientes es que los convertidores DTC más recientes de ABB permiten la actualización sencilla de la aplicación de motor de inducción existente para utilizar un motor síncrono PM o SynRM y beneficiarse de un rendimiento superior.

Además de un control altamente dinámico de los motores, los convertidores DTC –combinados con cualquiera de las tecnologías de motor eficiente mencionadas arriba– ofrecen un enorme potencial de ahorro energético en un gran número de aplicaciones de bomba y ventilador de velocidad variable. Esta ventaja se hace patente a partir de las así llamadas «leyes de afinidad», asociadas a las bombas y los ventiladores y que relacionan variables tales como el caudal, la velocidad de la bomba, la presión, la potencia, etc. Por ejemplo, la velocidad de la bomba y la potencia presentan una relación cúbica: si una secuencia de proceso permite mover la bomba a $\frac{1}{2}$ de su velocidad máxima, solo se requiere $\frac{1}{8}$ de la potencia máxima. Naturalmente, una eficiencia menor en el motor y el convertidor ante las cargas parciales reduciría la eficiencia del «sistema», pero consumiría menos energía globalmente.

Mediciones de rendimiento recientes

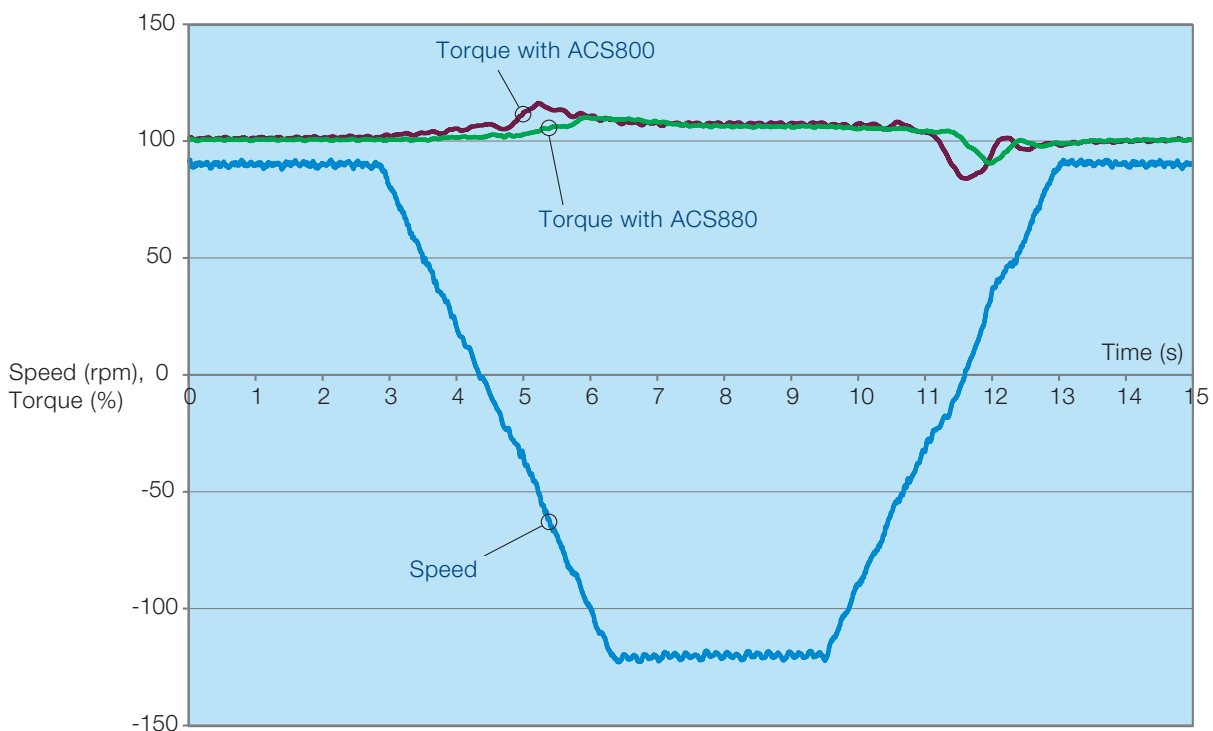
A mediados de 2012, ABB realizó una serie de mediciones para garantizar que la mejora continua de la tecnología DTC mantenga los convertidores de CA de ABB a su máximo rendimiento. Aquí se resumen los resultados más significativos de las mediciones de prueba.

Estabilidad de par a velocidad casi cero (convertidores ACS800 frente a ACS880)

La gráfica 1 compara la exactitud del control de par del ACS800 de ABB y de los nuevos convertidores industriales ACS880 en el modo de funcionamiento sin sensores (de bucle abierto). En las pruebas, los convertidores accionan un motor de inducción de 15 kW y cuatro polos, con su referencia de par nominal y con la máquina de carga controlada para hacer inversiones de velocidad lentas a velocidad casi cero. (Recuerde que 90 rpm supone cerca del 6 % de la velocidad nominal del motor).

Exactitud de par durante las rampas (motor de inducción frente a motor SynRM)

La gráfica 2 muestra la exactitud del control de par sin sensores del convertidor ACS880, comparada con los dos tipos de motores de 15 kW probados (a un 50 % de la velocidad nominal): un motor de inducción de cuatro polos y un motor síncrono de reluctancia.



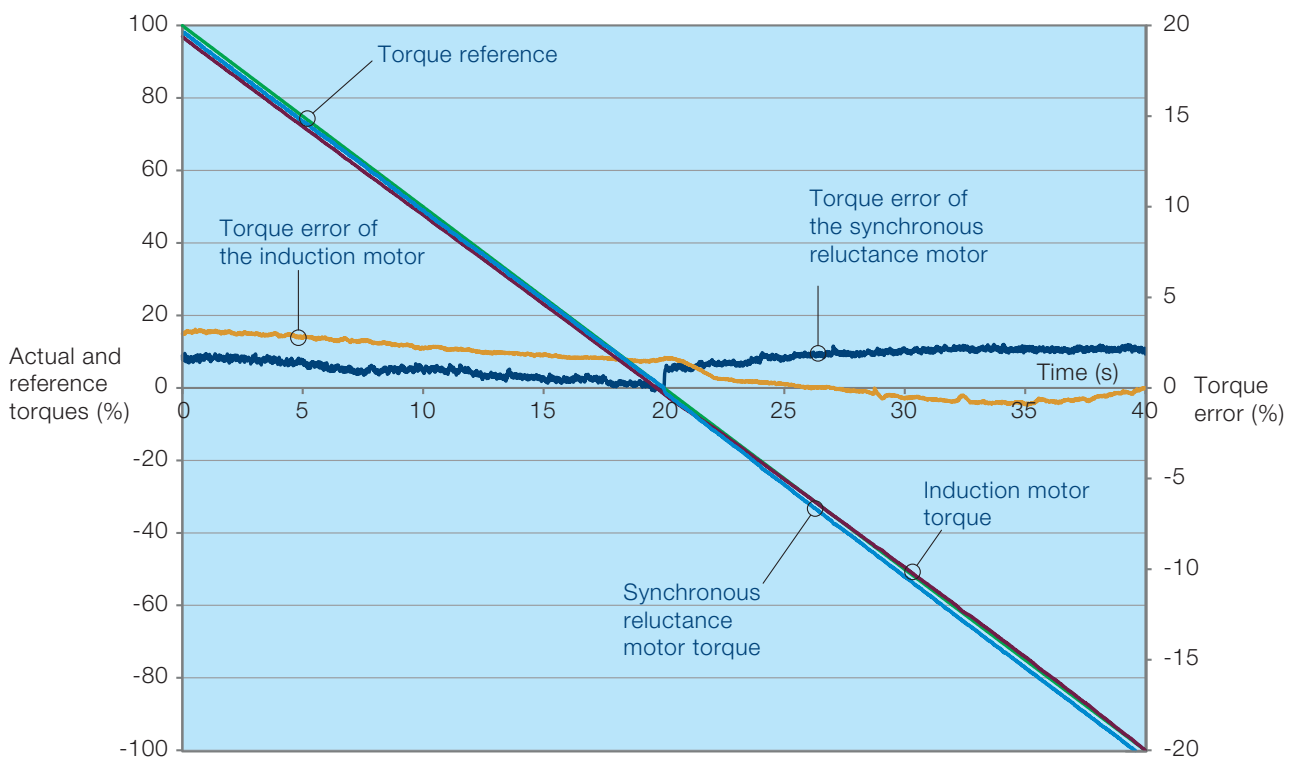
Gráfica 1. Ambos convertidores presentan una capacidad considerable de control sin sensores funcionando durante largos periodos en el intervalo de velocidades casi cero. Sin embargo, el nuevo ACS880 presenta una menor desviación respecto de la referencia de par y, por tanto, puede proporcionar un mejor rendimiento de control del motor que el ACS800.

Rendimiento dinámico con categoría de servo

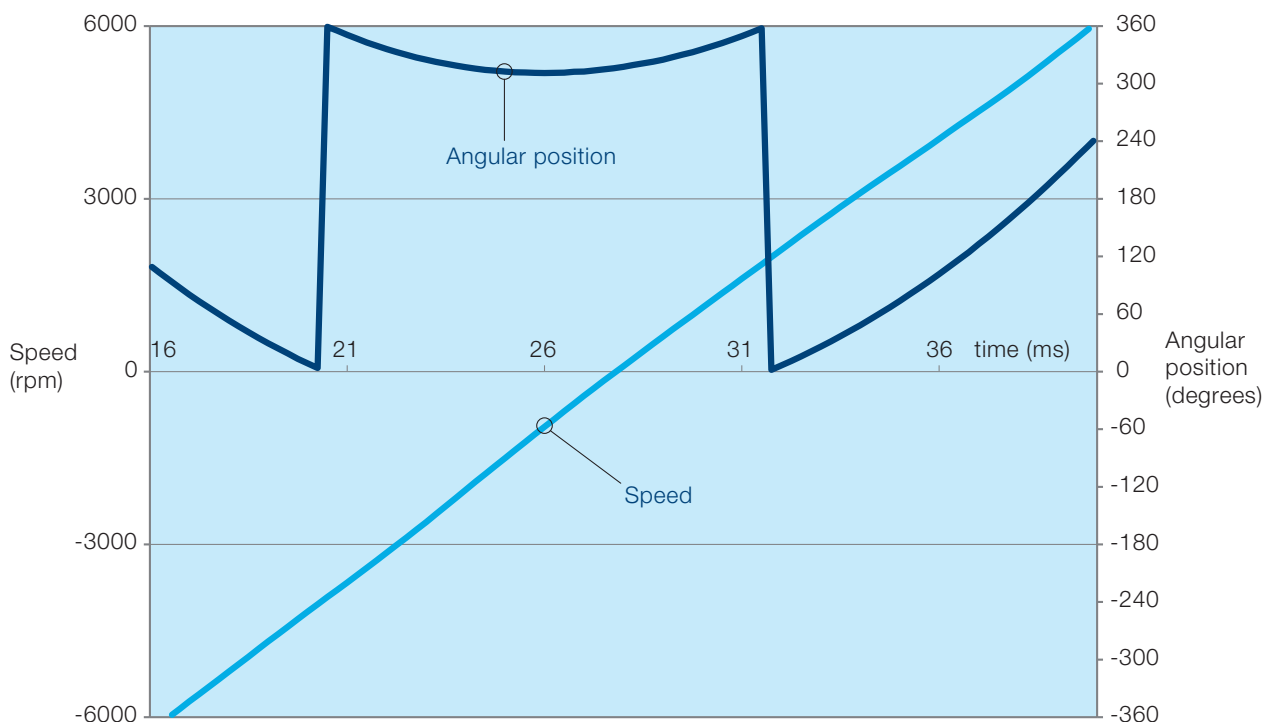
La gráfica 3 indica la velocidad y la posición angular medidas de un motor síncrono de imanes permanentes probado, de 1,5 Nm y a 6000 rpm (con una inercia de rotor de 0,57 kg cm²), durante una inversión rápida de la velocidad de -6000 rpm a +6000 rpm en menos de 25 milisegundos (ms). Se trata de un valor muy cercano al límite teórico que puede conseguirse con un límite de par establecido en el doble del par nominal. El límite teórico se refiere a la constante de tiempo mecánico del motor, de 24 ms, que es el tiempo necesario para acelerar el motor de la velocidad cero a la velocidad nominal con un par nominal.

Aplicaciones más amplias

Otro aspecto de la historia del DTC es su expansión a aplicaciones distintas de aquellas para las que se creó la tecnología. Las aplicaciones exigentes y altamente dinámicas se abordaron muy pronto, ya que hacían justificables los costosos desarrollos de software iniciales y los microprocesadores disponibles. La situación ha cambiado drásticamente. El software del sistema de control se ha amortizado gracias al aumento del volumen de ventas de los convertidores de CA y su implementación en los convertidores para más aplicaciones estándar está justificada económicamente. Los DSP de alto rendimiento también son más comunes y asequibles.



Gráfica 2. Con ambos tipos de motores, la desviación de par respecto de la referencia se mantiene dentro de un pequeño porcentaje del par nominal gracias al DTC, tanto en el modo de accionamiento como en el de frenado. El error de par máximo es levemente inferior con el motor síncrono de reluctancia probado que con el motor de inducción.



Gráfica 3. Aunque no se trata de un convertidor servo, el convertidor ACS880 con DTC es capaz de cambiar la velocidad del motor con gran rapidez y exactitud, tanto en el modo de control de motor de bucle cerrado como en el modo sin sensores. Una de las medidas de rendimiento es la exactitud del par durante una aceleración extremadamente rápida, que se determina comparando el tiempo de aceleración medido con la constante de tiempo mecánico del motor. Se midieron unos tiempos de aceleración de 24,4 ms (100 % de par) y 12,1 ms (200 % de par) en el modo de bucle abierto, en comparación con 24 ms y 12 ms, respectivamente, que corresponden a los tiempos de aceleración con una exactitud de par absoluta.

La capacidad para responder rápidamente a cambios en las variables de proceso, tales como presión, tensión o posición, con una excepcional dinámica de control de velocidad y par ha hecho al DTC atractivo para una mayor variedad de aplicaciones industriales y procesos.

El DTC es capaz de aportar funciones protectoras a las máquinas conectadas o al propio motor (más información en el Anexo 2). Un control exacto del par permite optimizar el ajuste del regulador de velocidad para amortiguar las vibraciones torsionales.

El DTC también se ha aplicado para reducir la distorsión armónica del convertidor, lo que mejora la calidad de la línea

eléctrica. Los armónicos de baja frecuencia de las corrientes de línea pueden mitigarse sustituyendo el rectificador de diodo de un convertidor de CA por una unidad rectificadora IGBT (ISU) controlada por DTC. El filtro LCL de la ISU elimina los armónicos de alta frecuencia y proporciona filtrado adicional para la red. En muchos casos, el uso de un convertidor con ISU permite reducir incluso la distorsión de tensión de la red. Es más, con una ISU es posible realimentar la energía de frenado a la red. De este modo, en las aplicaciones que requieren una energía de deceleración frecuente, es posible obtener ahorros en el coste de la energía

El DTC hoy y mañana

Asentado sobre firmes fundamentos teóricos, el control directo de par ha experimentado mejoras continuas de hardware y software durante sus más de 25 años de trayectoria. El DTC es una tecnología basada en DSP desde sus inicios y ha superado las limitaciones de los primeros procesadores en cuanto a la rapidez de cálculo de los algoritmos de control. Anteriormente, las limitaciones de los DSP también ponían coto a la frecuencia de conmutación máxima del convertidor y, con ello, a su frecuencia de salida. El DTC depende de la rápida conmutación de los transistores del convertidor para su óptimo rendimiento y la actualización ágil de los parámetros del modelo de motor. En la actualidad es fácil obtener procesadores potentes.

Hoy, los convertidores con DTC presentan una mayor frecuencia de salida y permiten mayores velocidades de motor. Se trata de una característica importante para ciertas aplicaciones, como los bancos de pruebas y las máquinas-herramienta. Los convertidores ABB que controlan motores de inducción de aplicaciones industriales proporcionan típicamente frecuencias de conmutación de 2-4 kHz para maximizar la eficiencia, mientras que los convertidores ABB para máquinas con motores síncronos de imanes permanentes aportan típicamente una conmutación de 5-8 kHz para controlar los motores con la mejor dinámica posible.

El software ha sido otro elemento clave para el éxito del DTC. Entre sus mejoras y actualizaciones están un código rediseñado y optimizado para todo el sistema de control (desde la interfaz del usuario hasta el eje del motor) para seguir mejorando el tiempo de respuesta del convertidor y su rendimiento.

Los modelos de motor también se actualizan regularmente. Los algoritmos de control se analizan periódicamente y las mejoras resultantes se someten a una verificación exhaustiva a través de ensayos de laboratorio con distintos motores. Este proceso puede abarcar el estudio de nuevas características o ideas de control con un motor existente o modificado, o quizá examinar requisitos especiales de la aplicación del cliente.

Una vez confirmada una mejora, puede incorporarse a la siguiente versión de software como parte del flujo de diseño normal. Es probable que cada nueva versión del software

introduzca nuevas características a un mejor rendimiento de control. Si la solución al problema de un cliente presenta suficiente atractivo general, también podría integrarse en una versión de software posterior.

También se ha incorporado al DTC un algoritmo más robusto de identificación del motor. Gracias a un microprocesador más potente en el convertidor, este software mejora la identificación del motor en reposo. Como se mencionaba anteriormente, el algoritmo de identificación determina automáticamente las propiedades correctas del motor accionado para un ajuste óptimo del control durante la puesta en servicio del convertidor, incluso si se desconocen los valores de la placa de características o si estos son inexactos.

ABB ha concentrado toda su reconocida trayectoria en ingeniería de convertidores de frecuencia y ha destinado recursos considerables al desarrollo del control directo de par. En la actualidad, el DTC es una tecnología viva que ha acumulado una serie continua de avances sobre unos fundamentos sólidos. Fruto de esta evolución, el DTC se ha convertido en una propuesta de marca que va mucho más allá del mero control del par: incorpora interfaces de usuario inteligentes, características de mantenimiento y diagnóstico del convertidor y funciones de software de nivel superior, entre otras ventajas.

De cara al futuro, ABB prevé seguir este mismo camino con su duradera tecnología DTC. Los usuarios de convertidores ABB pueden tener la seguridad de que los beneficios del control directo de par en el que invierten en la actualidad se mantendrán a largo plazo.

¹ Kazmierkowski, M.P., et al, «High-Performance Motor Drives», IEEE Industrial Electronics Magazine, septiembre de 2011, vol. 5, n.º 3 (p. 6-26).

² Direct Torque Control Comes to AC Drives», Control Engineering, marzo de 1995, vol. 42, n.º 3 (p. 9).

³ Norma IEC 60034-30, 2.ª edición: Máquinas eléctricas rotativas. Parte 30: Clases de rendimiento (código IE), Comisión Electrotécnica Internacional. www.iec.ch

⁴ Rare-earth magnet supply and cost issues», Control Engineering, agosto de 2011

[http://www.controleng.com/index.php?id=483&cHash=081010&tx_ttnews\[tt_news\]=55091](http://www.controleng.com/index.php?id=483&cHash=081010&tx_ttnews[tt_news]=55091)

⁵ Super premium efficiency synchronous motor and drive package: Taking energy efficiency to a new level», folleto de motores de CA y convertidores de baja tensión de ABB (2011).

En el artículo principal se resumía el modo de funcionamiento del bucle de control de par del DTC. Aquí le ofrecemos una breve descripción del bucle de control de velocidad asociado. Estos dos bucles están integrados y funcionan como una unidad holística. Las descripciones separadas que se ofrecen solo tienen como fin facilitar la comprensión del esquema de bloques. Continuemos por tanto con esta breve «visita guiada».

El bucle de control de velocidad consta de tres elementos principales: el propio bloque del regulador de velocidad y controladores separados para la referencia de par y la referencia de flujo. El regulador de velocidad contiene un controlador PID (proporcional integral derivativo) y un compensador de aceleración. La entrada del regulador de velocidad es el error detectado al comparar una señal de referencia de velocidad externa y la señal de velocidad real del modelo de motor adaptativo, que forma parte del bucle de control de par y flujo (véase el artículo principal). Esta señal de error, calculada a partir del cambio de referencia de velocidad y el término derivado, se utiliza tanto en la unidad PID como en el compensador de aceleración. Sus salidas combinadas se convierten en la salida del regulador de velocidad.

La salida se envía al controlador de referencia de par, donde se regula la salida de control de velocidad partiendo de valores preestablecidos de límite de par y tensión de bus de CC. La señal de referencia de par externa (o del usuario) también puede usarse en lugar del control de velocidad como una entrada para este bloque. La salida del controlador de referencia de par es la así llamada «referencia de par interna» que se envía al bloque comparador de par del bucle de control de par y flujo.

De modo similar, el controlador de referencia de flujo proporciona una «referencia de flujo interna» al bloque comparador de flujo (parte del bucle de control de par y flujo). Esta señal es un valor absoluto de flujo de estátor, que el DTC puede regular adecuadamente y modificar para obtener funciones de inversor útiles. Entre sus posibles ejemplos están la optimización de la energía –que minimiza las pérdidas del motor y recorta su nivel de ruido– y el frenado por flujo, que permite un frenado más rápido del motor mediante el aumento temporal de las pérdidas de motor, si no se utiliza ninguna resistencia de frenado en especial.

Anexo 2: ventajas del DTC para el cliente

Los convertidores de CA con control directo de par (DTC) ofrecen distintas características que benefician a aplicaciones específicas del usuario. En sectores tales como la fabricación de papel, la producción de materiales en bobinas y las máquinas extrusoras de materiales de película, la rápida respuesta de par y el control exacto del par mediante el DTC pueden aportar a los clientes mayores niveles de calidad del producto y productividad. La linealidad del par se convierte en una ventaja más para el bobinado con tensión constante de las bobinas, uno de los requisitos de estas aplicaciones.

La reducción de costes de los transportadores y líneas de transferencia, así como de las máquinas de embalaje, se consigue gracias a que muchas aplicaciones no requieren encoders ni otros dispositivos de realimentación de velocidad o posición de los motores. Dejando a un lado su coste inicial, los encoders requieren mantenimiento y verificaciones periódicas de su exactitud.

Además, los fabricantes de máquinas de embalaje pueden eliminar el freno mecánico de una sección de la máquina, gracias al control de par incluso a velocidad cero que proporciona el DTC, además de la posibilidad de retener el 100 % de par a velocidad cero. Sin embargo, recuerde que se requiere un sensor de velocidad o posición si se requiere par de frenado (generación) a una velocidad cercana a cero durante más de unos pocos segundos. También se necesita una resistencia de frenado o una unidad rectificadora IGBT en el convertidor si se requiere una alta deceleración.

La capacidad para monitorizar con exactitud el estado del motor puede seguir siendo beneficiosa en otras aplicaciones de cliente. La minimización de las sobrecargas y de las cargas de impacto es posible a través de la detección rápida de cualquier cambio en los parámetros del sistema conectado y la rápida respuesta de control del DTC. El concepto puede extenderse a la detección de averías del sistema accionado. Por ejemplo, una pérdida repentina de par puede indicar la rotura de una cinta transportadora –o un par excesivo para lograr una producción normal puede indicar adhesiones o un desgaste anormal en la máquina–, lo que exige una respuesta adecuada del usuario para prevenir daños mayores.

Como se menciona en el artículo principal, los convertidores pueden usarse como parte de un diagnóstico del proceso, lo que resulta beneficioso para los clientes que usan aplicaciones de control de proceso, ya que cualquier cambio de las variables del sistema accionado (presión, tensión o posición) pueden correlacionarse con las características de par y velocidad del motor. Cualquier alteración de las características del motor puede servir de alarma temprana sobre cambios no deseados en el proceso.

Contacte con nosotros

La seguridad funcional basada en convertidores ofrece todo un mundo de posibilidades a los fabricantes de máquinas, diseñadores y expertos en seguridad.

Para más información, visite www.abb.es/drives

O contáctenos al teléfono 902 535 500 o al email drives.info@es.abb.com

3AUA0000195480 21.04.2016