

## Capítulo 1

### Estado del arte

#### 1.1 Introducción

En este capítulo se desarrollará el estado del arte en tres temas que están relacionados directamente con los trabajos de la tesis. Los temas son:

- 1- Estado del arte relacionado con las topologías del inversor de componentes minimizados y sus estrategias de control.
- 2- Estado del arte relacionado con los tipos de inversor resonante y cuasi-resonante.
- 3- Estado del arte del control directo del par.

#### 1.2 Inversor de componentes minimizados

Algunas investigaciones científicas en el campo de la electrónica de potencia están orientadas al desarrollo de topologías de inversor de bajo coste. Los resultados obtenidos en [1] y [2] probaron que es posible realizar un inversor trifásico con solo cuatro interruptores. Unos años después, los autores de la referencia [3] propusieron varias topologías de inversor de componentes minimizados para obtener tensiones trifásicas de una fuente monofásica. Pero las áreas de aplicaciones eran limitadas a los accionamientos de velocidad fija o con un rango limitado como en ventiladores y bombas.

Recientemente, las estrategias de modulación del inversor trifásico de cuatro transistores (B4) “Four Switch Three-Phase Inverter” han recibido una gran atención. Los primeros métodos eran sencillos y estaban basados en método escalar tal como se planteó en la referencia [4].

Otros [5]-[7] presentaron estrategias de modulación basadas en el concepto de modulación del vector espacial “Space Vector Modulation”, es decir, tomaron el concepto de vector espacial que se había utilizado con el inversor clásico (B6) y adaptaron el método para que sea aplicable con el FSTPI. El logro alcanzado por estos métodos más avanzados es la posibilidad de estudiar los efectos de varios tipos de PWM con formulas analíticas sencillas

que ya se habían utilizado para explicar el funcionamiento del FSTPI. Sin embargo, solo se habían realizado las versiones escalares de estas técnicas, por lo que solo eran adecuadas para los accionamientos de velocidad fija, o sea, que el comportamiento estático puede ser bueno bajo la condición de frecuencia de conmutación elevada, pero nunca fueron capaces de ofrecer un comportamiento dinámico alto. Por tanto, el área de aplicación del FSTPI era limitada.

Últimamente, en las referencias [8] y [9] se presenta una estrategia de modulación para el inversor FSTPI basado en el vector espacial del flujo que mejoró la utilización de la fuente de alimentación del bus de CC, pero el tiempo necesario de cálculo de los algoritmos es relativamente alto, lo que limita la frecuencia de conmutación a valores inferiores de 1 kHz, con lo que el comportamiento estático del sistema se ve evidentemente afectado. Además, el método no propone soluciones para mejorar la respuesta dinámica del sistema, ni para limitar directamente las ondulaciones del par electromagnético del motor. Esto significa que los métodos más modernos no son capaces de ofrecer un accionamiento de comportamiento dinámico alto y de bajo precio.

En esta tesis se propone y se plantea una nueva técnica de control para el inversor FSTPI que ofrece una buena respuesta dinámica y un excelente comportamiento estático. Por consiguiente, se puede decir que se ha abierto un nuevo campo de aplicación para el inversor FSTPI lográndose accionamientos de CA de bajo coste con un buen comportamiento dinámico [10], [109].

A continuación, para disminuir el coste del accionamiento basado en el FSTPI, en la referencia [11] se plantea y se aplica un método para calcular las corrientes del motor con un solo sensor de corriente de efecto Hall puesto en el bus CC. También se propusieron varios esquemas basado en solo un sensor de corriente que sirven para detectar y proteger el inversor contra varios tipos de fallos.

Últimamente, en las referencias [12]-[14] se plantean e se investigan las estrategias de control para el conjunto AC/DC/AC convertidor con rectificación controlada en lugar de los diodos para aumentar y mejorar el factor de potencia y la utilización de la red utilizando un número

reducido de transistores. Además, en la referencia [15] se introduce una estrategia de (SVM) para compensar las ondulaciones de la tensión del bus de corriente continua (CC), con la ventaja adicional de disminuir el tamaño del condensador del filtro utilizado.

Los autores de [122] y [123] proponen un nuevo algoritmo basado en el vector espacial para el inversor B4 que alimenta un motor de inducción. La técnica propuesta permite compensar las ondulaciones de la tensión del bus de CC y ofrece un buen comportamiento y una disminución del coste del accionamiento.

Últimamente, los autores de [124] proponen una estructura nueva surgida de la utilización de dos inversores B4 que comparten los mismos condensadores y que alimentan dos motores de inducción que actualmente trabajan bajo la misma frecuencia fundamental. El accionamiento propuesto se ha aplicado a un vehículo eléctrico para reducir una parte del coste del sistema.

### **1.3 Otras topologías de Inversores**

Aunque la topología anterior de cuatro interruptores se ha planteado como esquema alternativo al inversor clásico en el rango de baja potencia, cuando la potencia del motor aumenta, por ejemplo a partir de 10 kW este esquema no es el óptimo debido a ciertos inconvenientes, como el rizado de la tensión a través de los condensadores, el aumento del precio de los condensadores, y el aumento de las pérdidas de conmutación a través los interruptores de potencia por lo cual no se obtiene un ahorro efectivo en el coste del inversor.

En la bibliografía se encuentran varios esquemas de inversores que son adecuados en el rango de potencia media (10 kW-100 kW). Uno de estos esquemas se propone en la referencia [16] donde los autores desarrollaron un inversor PWM basado en una conexión en paralelo de los transistores con las inductancias.

Últimamente, en las referencias [17]-[18] aparece una nueva topología de inversor de PWM adecuada para los accionamientos de media tensión (2300 V / 4160 V) formado por tres inversores estándar y un transformador. Con este sistema se consiguen unas tensiones de salida de alta calidad y bajo  $dv/dt$ .

Recientemente, se ha propuesto otra topología para los accionamientos de potencias elevadas y altas prestaciones [19]-[21]. El sistema está formado por un inversor grande en fuente de corriente y un inversor pequeño en fuente de tensión. El conjunto combina técnicamente las ventajas de los dos tipos de inversores, sin embargo, tiene el inconveniente de un coste elevado debido al elevado número de interruptores y a la complejidad del control.

Asimismo en la referencia [22] se ha propuesto un nuevo método de control para la topología convertidor matriz “Matrix Converter” que ofrece ventajas en el campo de grandes potencias. La matriz está formada por 18 interruptores. El coste de estos convertidores es muy elevado y su control complicado. Además, estos convertidores presentan un elevado riesgo de que se generen fallos en los mismos.

#### **1.4 Inversor cuasi-resonante**

Durante los últimos diez años se han estudiado varias topologías de inversores de conmutación suave [23]-[27] para resolver los problemas del PWM de conmutación dura. La eliminación de las pérdidas de conmutación en un inversor de conmutación suave permite mejor utilización de los interruptores. Por consiguiente, los inversores pueden funcionar a frecuencias de conmutación muy elevada con altos rendimientos, con la consiguiente reducción del tamaño de los radiadores de calor. Además, ya no son necesarios los circuitos “snubber”, y las EMI también se reducen significativamente [28]-[29].

Por los motivos antes expuestos, el concepto de circuito de resonancia “resonant dc link” resulta práctico y fiable, especialmente en las aplicaciones de potencia media [30]. Sin embargo, en los inversores resonantes, los interruptores se someten a una tensión de valor elevado (alrededor de 2.5 veces del valor de la tensión de la fuente  $V_{dc}$ ) lo que obliga al empleo de elementos de altas prestaciones.

Para resolver los inconvenientes del inversor resonante, se desarrollaron varios esquemas. Uno de los primeros trabajos en este sentido fue presentado por los autores de [31] que propusieron una nueva topología del circuito de resonancia en paralelo “Parallel resonant dc link circuit” como un método alternativo para anular las pérdidas de conmutación, mientras el valor pico de la tensión a través los interruptores está limitado al valor de la fuente de

alimentación  $V_{dc}$ .

Posteriormente, se han propuesto diferentes circuitos de resonancia en paralelo que permitieron la aplicación de técnicas PWM y la modulación del vector espacial “space vector modulation” [32]-[34]. Recientemente, se han presentado nuevos esquemas de conmutación suave (QPRDCL) con un circuito paralelo cuasi-resonante “quasi-parallel resonant dc-link” [35]-[37]. De los resultados presentados se deduce que los esquemas propuestos mejoran el comportamiento del inversor cuando se aplican las estrategias de control PWM y del vector espacial. Paralelamente, otros autores proponen diferentes soluciones al problema de la elevada tensión a través los interruptores. En [38]-[39] se proponen algunos esquemas que pueden limitar la tensión hasta 1.3 del valor de  $V_{dc}$ .

En los últimos tres años, se ha producido un elevado incremento de las investigaciones sobre nuevos esquemas para mejorar el comportamiento de los inversores de conmutación suave y evitar sus desventajas. Fruto de ellas, son las publicaciones [40]-[46] en las que se han propuesto nuevos circuitos cuasi-resonantes caracterizados por unos buenos resultados. Mientras que en [47] se presenta otro esquema que no necesita ningún circuito de control, pero con los dos inconvenientes siguientes: los interruptores están sometidos a corrientes de valores elevados y el número de componentes pasivos utilizados es más grande. Se necesitan doce diodos adicionales. Últimamente, los autores de [126] han propuesto un nuevo esquema de un inversor resonante que combina y logra al mismo tiempo la conmutación bajo la condición de tensión cero (ZVS) y la conmutación bajo la condición de corriente cero (ZCS). Sin embargo, el punto más débil del sistema propuesto es su construcción (12 interruptores). Es decir, el número de los interruptores necesarios es el doble de los habituales. Además se produce un aumento enorme de los circuitos de control y de aislamiento y son necesarias potentes tarjetas de adquisición de datos para funcionar en tiempo real, lo que no solo sube el coste del sistema, sino que limita la área de aplicación.

### **1.5 Control directo del par (DTC)**

Los accionamientos de motores de inducción de altas prestaciones dinámicas requieren un control preciso e independiente tanto para el par como para el flujo. La mayoría de los esquemas modernos están basados en el método del campo orientado o control vectorial [48].

El control vectorial intenta controlar el motor de inducción como un motor de corriente continua de excitación separada [49]-[50]. La clave del éxito de esta estrategia es el conocimiento correcto de la posición de flujo del rotor que se estima en el esquema de control vectorial indirecto [51]. Debido a que el flujo del rotor se estima basado en la constante de tiempo del rotor, que varía con la temperatura y el nivel de la saturación de la máquina, en el caso de que no se disponga los valores reales de la constante de tiempo del rotor, el comportamiento dinámico y el régimen permanente se ven afectados de forma considerable con el cambio de los parámetros de la máquina. Por consiguiente, muchos algoritmos y esquemas se desarrollaron para estimar los parámetros de la máquina en línea [52]-[58].

Sin embargo, estos esquemas aumentan de forma considerable la complejidad y el coste del sistema, lo que los convierte en prohibitivos en muchos casos.

De otra parte, con el éxito logrado por el control vectorial en el campo de los accionamientos de altas prestaciones, aparecieron los estudios novedosos de Takahashi y Noguchi [59] y de Depenbrock [60] que se desvían y alejan de la idea de la transformación de coordenadas y de la analogía entre el control vectorial y el control del motor de CC. y proponen la técnica DTC para obtener una rápida y buena respuesta dinámica del par y del flujo estático [61].

Además, el DTC se considera como una estrategia de control alternativa al control vectorial por ofrecer algunas ventajas frente al campo orientado que se resumen en los puntos siguientes:

- 1- La estructura de control es mucho más sencilla, solo requiere dos comparadores de histéresis y un controlador de velocidad de tipo por ejemplo PI, mientras que el del campo orientado requiere cuatro PI y un modulador de PWM [62]. Esto hace que el DTC tenga un ancho de banda mucho mayor y por consiguiente una respuesta dinámica superior.
- 2- Además, el DTC necesita solo un modelo sencillo del motor de inducción.
- 3- Su comportamiento es robusto contra la variación de los parámetros. (solo necesita el valor de la resistencia del estator).
- 4- No hay que realizar transformación de coordenadas, solo se utilizan las variables reales de las corrientes y las tensiones en el sistema de referencia estacionario.
- 5- El DTC ofrece una respuesta dinámica muy alta, regulándose directamente tanto el par como el flujo de manera separada basándose en una tabla de conmutación óptima, en

donde se eligen los estados de conmutación que cumplen los requisitos de las consignas del par y del flujo sin la necesidad de la modulación PWM.

- 6- Su grado de complejidad frente del campo orientado es medio, y por consiguiente se puede aplicar todos los algoritmos del sistema con tarjetas de adquisición de datos económicas lo que reduce el coste total del accionamiento.

No obstante, una de las limitaciones del DTC es su dependencia de la resistencia del estator para estimar el flujo estático [63]. La variación de la resistencia debido al cambio de la temperatura empeora el comportamiento del accionamiento, particularmente a baja velocidad donde la caída de la tensión a través la resistencia constituye una parte importante de la tensión aplicada al motor. Por resolver el anterior inconveniente, se han realizado diversos trabajos en los que se proponen esquemas y algoritmos para estimar la resistencia del estator en línea [63]-[69],[71],[127],[128],[130] y [139].

En [72] se presenta un nuevo esquema de DTC que utiliza la tercera armónica de la tensión del estator para estimar el flujo y el par en lugar de utilizar la resistencia del estator, consiguiéndose una mejora en la operación del motor a baja velocidad.

A continuación, se mostrará en forma sucinta la evolución histórica y los avances logrados por los investigadores durante la última década para modificar y mejorar el comportamiento del DTC propuesto por [59]-[74].

En [75] se presenta un nuevo método del DTC basado en dos inversores utilizando tiristores (GTO). Según el esquema del inversor y la estrategia de control, la frecuencia de conmutación se reduce al 60 % de la correspondiente a un inversor clásico bajo las mismas condiciones de funcionamiento. Sus inconvenientes provienen de que hay que añadir otro inversor y un transformador de potencia, lo que aumenta el precio y el tamaño del sistema. Además, se incrementan las pérdidas.

En [76] se aplica el DTC utilizando un inversor de tres niveles para bajar la ondulación del par. el inconveniente de este esquema es el coste elevado. Pero estos esquemas son muy útiles especialmente en los accionamientos de gran potencia. A continuación, en [77] se propone la

aplicación del DTC utilizando un convertidor matricial “matrix converter” para obtener un accionamiento de altas prestaciones para potencias elevadas.

Volviendo al esquema estándar de inversor (B6), existen muchos trabajos para mejorar el comportamiento del DTC en el rango de baja potencia. En [78]-[80] se realizaron sistemas del DTC aplicando el control de lógica difusa para disminuir la ondulación del par con la estrategia propuesta “duty ratio control”.

A principios de los años noventa se propuso una nueva técnica de DTC basada en la estrategia de modulación del vector espacial en lugar de la óptima tabla de conmutación [81]-[84].

En [85] se propuso un algoritmo basado en la modulación del vector espacial para controlar el par electromagnético de la máquina de inducción. Esta técnica de DTC ofrece una frecuencia de conmutación fija, mejora la respuesta dinámica y el comportamiento estático.

En [86]-[89] se proponen nuevas técnicas de modulación basado en el vector espacial para realizar el DTC sin sensores de velocidad. Además en [90]-[91] se presentan nuevos métodos para la aplicación del DTC en forma discreta, con frecuencia de conmutación fija, obteniéndose unas formas de ondas del par y del flujo mejoradas.

Recientemente, en [92]-[93] se mejoran el comportamiento del DTC con la introducción de una señal portadora de alta frecuencia y de magnitud pequeña en los controladores del par y del flujo con lo que se consiguen buenos resultados. Además en [94]-[96] y [129] se presentan nuevas técnicas del DTC con frecuencia de conmutación fija. Los resultados obtenidos muestran las diferencias existentes entre el DTC convencional y con estas técnicas. En [94]-[95] se intentan fijar la frecuencia de conmutación con la variación de la banda de histéresis del controlador del par y del flujo. En [96] el error del par se anula por la utilización de dos controladores PI, cuyas salidas se comparan con señal portadora de frecuencia fija, que determina o limita el valor real de la frecuencia de conmutación del DTC.

También, se han desarrollados algoritmos de DTC predictivos [51],[97]-[103] y [121]. Estos algoritmos complejos generan los estados de conmutación del inversor como una función del par y del flujo de forma analítica y discreta, es decir entre dos muestreos no se aplica solo un



estado de conmutación, como ocurre en el DTC convencional, sino que se aplican varios vectores basado en los valores calculados del par, del flujo y sus pendientes designado como control vectorial del par “vectorial torque control”. Para aplicar estos algoritmos se requieren unos procesadores rápidos o procesadores digitales de señal “DSP” de alta velocidad. Además se requieren los valores reales de los parámetros de la máquina. Con estas técnicas se mejoran el comportamiento estático y dinámico del DTC frente al método tradicional.

En [104]-[105] y [140] se propone utilizar una estrategia de control deslizante “sliding mode control” para que el DTC sea robusto contra la variación de los parámetros de la máquina.

De la revisión bibliográfica hemos obtenido que existen dos tipos de inversores que todavía no se han utilizado para aplicar la estrategia DTC, y que ofrecen algunas ventajas bajo ciertas modos de operación.

Estos tipos de inversores son:

- (a) Inversor de componentes reducidos.
- (b) Inversor cuasi resonante.

Por estos motivos, los trabajos en esta tesis están orientados directamente a aplicar el DTC utilizando estas dos topologías de inversores, teniendo en cuenta todas las modificaciones necesarias, tanto de los algoritmos como de los circuitos de control para lograr el buen comportamiento dinámico y estático. Por consiguiente, se podrá extender la gama de aplicación de estas topologías de inversores al campo de los accionamientos de corriente alterna de altas prestaciones en regímenes estacionarios y dinámicos.