



DISEÑO DE UN SISTEMA DE CONTROL PREDICTIVO PARA EL ACCIONAMIENTO DE LA MÁQUINA DE RELUCTANCIA CONMUTADA DE UN SISTEMA DE ALMACENAMIENTO CINÉTICO PARA LA MEJORA DE LA EFICIENCIA EN LA EDIFICACIÓN

Autor: JAVIER VILLEGAS NÚÑEZ

Tutor: SERGIO VÁZQUEZ PÉREZ

CAPÍTULO 4. MÁQUINAS DE RELUCTANCIA CONMUTADA (MRC)

	DISEÑO DE UN SISTEMA DE CONTROL PREDICTIVO PARA EL ACCIONAMIENTO DE LA MÁQUINA DE RELUCTANCIA CONMUTADA DE UN SISTEMA DE ALMACENAMIENTO CINÉTICO PARA LA MEJORA DE LA EFICIENCIA EN LA EDIFICACIÓN
	Autor: JAVIER VILLEGAS NÚÑEZ
	Tutor: SERGIO VÁZQUEZ PÉREZ

1. ORIGEN Y EVOLUCIÓN HISTÓRICA

El primer motor de reluctancia del que se tienen referencias fue diseñado por Robert Davidson, en 1838, el cual fue utilizado para impulsar una locomotora en la línea férrea que unía Glasgow y Edimburgo. Las limitadas prestaciones de estos motores, fundamentalmente debidas a que la conmutación de las bobinas que constituían las fases del motor se realizaba de forma manual y el rápido desarrollo, en la segunda mitad del siglo XIX, de los motores de corriente continua hicieron que este tipo de motores se perdiera pronto en el olvido [29].

Aunque la denominación Switched Reluctance Motor (SRM en sus siglas en Inglés, y Máquina de Reluctancia Conmutada, MRC en sus siglas en español) fue utilizada por vez primera por Nasar en 1969 y las primeras patentes sobre motores de reluctancia autoconmutados fueron registradas, por Bedford & Hoft, en 1971 y 1972. No es hasta finales de la década de los años 70 del siglo pasado cuando a partir de los trabajos de investigación sobre vehículos eléctricos alimentados desde baterías, realizados en las Universidades de Leeds [30] y Nottingham [31] y esponsorizados por Chloride Technical Ltd., que puede decirse que comienza la era moderna del motor de reluctancia autoconmutado.

Este renacimiento del motor de reluctancia autoconmutado fue gracias a la utilización de los interruptores de estado sólido (en aquel tiempo el tiristor, posteriormente, PowerMosfets e IGBTs) que solucionaron el problema de la conmutación de las fases, a las mejoras de los materiales ferromagnéticos y al desarrollo de la electrónica de regulación y control. Desde entonces ha despertado gran interés en la comunidad universitaria y ha creado grandes expectativas en el mundo industrial.

Todo ello parece indicar que los esfuerzos dirigidos al estudio y la mejora de las MRCs se mantendrán con fuerza en años venideros, lo que sin duda incrementará

	DISEÑO DE UN SISTEMA DE CONTROL PREDICTIVO PARA EL ACCIONAMIENTO DE LA MÁQUINA DE RELUCTANCIA CONMUTADA DE UN SISTEMA DE ALMACENAMIENTO CINÉTICO PARA LA MEJORA DE LA EFICIENCIA EN LA EDIFICACIÓN
	Autor: JAVIER VILLEGAS NÚÑEZ
	Tutor: SERGIO VÁZQUEZ PÉREZ

las aplicaciones que incorporen este tipo de máquinas y la harán más competitiva frente a otras soluciones.

2. VENTAJAS E INCONVENIENTES

Algunas de las ventajas principales que presenta la máquina de reluctancia autoconmutada se basan en su construcción simple y robusta, y en los bajos costes de fabricación. Esto se debe principalmente por prescindir estructuralmente de imanes permanentes, escobillas y conmutadores, consistiendo el estator sencillamente en una serie de laminaciones de acero apiladas formando una estructura de polos salientes. Las bobinas eléctricas envuelven dichos polos y se conectan de forma independiente entre pares diametralmente opuestos formando las fases de la máquina. El rotor, que no contiene conductores, es básicamente otra pieza de acero laminado que forma también una estructura de polos salientes.

Otra de las ventajas es su elevado rendimiento, además, presenta la ventaja de poder escoger entre diversas topologías de convertidor estático, prácticamente todas tolerantes a fallos, lo que le da una gran robustez y fiabilidad al sistema.

La tecnología de MRC ofrece múltiples beneficios en comparación con otro tipo de motores:

Eficiencia: las MRCs ofrecen alta densidad de potencia, e igual o mejor eficiencia que los motores AC convencionales [35]-[39], y permite un mayor par a bajas velocidades que otro tipo de motores.

Par máximo: la MRC tiene capacidad para producir mayor par máximo que los motores de inducción, particularmente a bajas velocidades [38]. Los valores

	DISEÑO DE UN SISTEMA DE CONTROL PREDICTIVO PARA EL ACCIONAMIENTO DE LA MÁQUINA DE RELUCTANCIA CONMUTADA DE UN SISTEMA DE ALMACENAMIENTO CINÉTICO PARA LA MEJORA DE LA EFICIENCIA EN LA EDIFICACIÓN
	Autor: JAVIER VILLEGAS NÚÑEZ
	Tutor: SERGIO VÁZQUEZ PÉREZ

obtenidos, sin embargo, siguen siendo más bajos que los alcanzados con una máquina equivalente de imanes permanentes.

Robustez y fiabilidad: gracias a su sencillez mecánica la MRC es tan robusta como un motor convencional, lo que hace adecuada para trabajar en entornos agresivos con altas temperaturas o vibración. Por otro lado, debido a la independencia de los circuitos de cada fase y la inexistencia de imanes permanentes, en caso de cortocircuito este tipo de máquina está mejor protegida que cualquier otra [37][38][41]. Además, la MRC podrá seguir funcionando con un rendimiento menor, si una o incluso dos de las fases fallan.

Velocidad: la MRC puede operar en un rango de velocidades muy amplio [38]. La curva par-velocidad asociada a estos motores es similar a un motor AC controlado vectorialmente, en la que el par máximo es constante a bajas velocidades, y para velocidades altas es la potencia la que se mantiene constante. Pueden obtenerse velocidades de hasta 100.000rpm [42] sin necesidad de ninguna modificación mecánica. Al mismo tiempo, la máquina puede operarse a bajas velocidades proporcionando un par máximo hasta velocidad cero.

Momento de inercia: el motor de reluctancia conmutado posee un momento de inercia muy pequeño, debido a la ausencia de masa en los huecos entre los dientes del rotor, ya que no tiene ni bobinados ni imán permanente alguno. El rotor está compuesto únicamente por el eje y el conjunto de chapas.

Razón Potencia/Peso: para la misma potencia de salida, una MRC puede resultar hasta un 40% más pequeña y más ligera que un motor AC convencional [37]. Además, el uso de las MRCs no está restringido a un rango de potencias determinado. Se han diseñado así MRCs con potencias de salida desde 50W hasta 2MW.

Refrigeración: en la MRC las pérdidas son mucho menores que en las máquinas con corrientes inducidas en el rotor y además la mayor parte del calor se genera en el

	DISEÑO DE UN SISTEMA DE CONTROL PREDICTIVO PARA EL ACCIONAMIENTO DE LA MÁQUINA DE RELUCTANCIA CONMUTADA DE UN SISTEMA DE ALMACENAMIENTO CINÉTICO PARA LA MEJORA DE LA EFICIENCIA EN LA EDIFICACIÓN
	Autor: JAVIER VILLEGAS NÚÑEZ
	Tutor: SERGIO VÁZQUEZ PÉREZ

estator, que al ser estacionario es relativamente fácil de refrigerar, por lo que estas máquinas pueden operar a mayores temperaturas. Por otra parte, las MRCs no necesitan un campo de excitación continuo como en el caso de las máquinas de imanes permanentes, puesto que las fases se energizan exclusivamente cuando es necesario. En este sentido, las pérdidas en ausencia de par son despreciables.

Coste: para la misma potencia de salida y siendo producidas en grandes tiradas, las MRCs junto con su accionamiento de potencia y su control, son más baratas que los motores AC o las máquinas de imanes permanentes [35][43].

Sin embargo, no todo son ventajas, existen también algunos inconvenientes asociados con la tecnología de reluctancia conmutada:

Posición del rotor: la operación de la MRC exige el conocimiento de la posición del rotor para la sincronización de ésta con la energización de las distintas fases. Para ello usualmente se utilizan sensores que pueden incrementar el coste y la complejidad del sistema, reduciendo su fiabilidad.

Rizado de par y ruido acústico: en el caso de las MRCs, el rizado del par es mayor que para otro tipo de motores. Esto da lugar a niveles de vibración y ruido acústico que pueden no ser admisibles para cierto tipo de aplicaciones, requiriendo de una mecánica y un control optimizados para reducir ambos en dichos casos [39][44]. Las vibraciones de las bobinas o la deflexión del estator por la componente radial de las fuerzas entre los polos del rotor y el estator también pueden producir ruido audible, el cual pueden amortiguarse, si la aplicación lo requiere, mediante el diseño de una estructura mecánica más rígida.

No linealidad: la estructura de polos doblemente saliente que la MRC precisa para producir par reluctante y el régimen de saturación en el que suelen operar estas máquinas producen características magnéticas altamente no lineales, lo que complica el análisis y el accionamiento de este tipo de motores. La inversión

	DISEÑO DE UN SISTEMA DE CONTROL PREDICTIVO PARA EL ACCIONAMIENTO DE LA MÁQUINA DE RELUCTANCIA CONMUTADA DE UN SISTEMA DE ALMACENAMIENTO CINÉTICO PARA LA MEJORA DE LA EFICIENCIA EN LA EDIFICACIÓN
	Autor: JAVIER VILLEGAS NÚÑEZ
	Tutor: SERGIO VÁZQUEZ PÉREZ

económica en fase de investigación puede entonces resultar mayor debido a que las estrategias de control son más complejas y no están ampliamente estudiadas como en el caso de los motores convencionales.

Estas dificultades, junto con la falta de electrónica comercial desarrollada específicamente para operar este tipo de tecnología y, sobre todo, el profundo arraigo que los motores convencionales AC y DC tienen en el mercado, están suponiendo que la penetración industrial de las máquinas de reluctancia conmutada esté siendo relativamente lenta. Aún así, a medida que la electrónica de potencia y las técnicas de control han ido desarrollándose, las MRCs se han ido incorporando a un amplio rango de aplicaciones comerciales.

3. APLICACIONES

En la actualidad, las MRCs se están utilizando para aplicaciones de media y gran potencia alimentadas desde la red, donde se presenta como una alternativa atractiva para las aplicaciones que requieren un elevado par de arranque, elevado rendimiento, alta fiabilidad y que no sean sensibles al ruido. Estos motores son adecuados para multitud de aplicaciones, lo que está originando el uso de este motor en muchas aplicaciones comerciales:

- accionamientos industriales de propósito general.
- accionamientos específicos en compresores, ventiladores, bombas, centrifugadoras...
- accionamientos domésticos de lavadoras, aspiradoras, procesadoras de comida...

	DISEÑO DE UN SISTEMA DE CONTROL PREDICTIVO PARA EL ACCIONAMIENTO DE LA MÁQUINA DE RELUCTANCIA CONMUTADA DE UN SISTEMA DE ALMACENAMIENTO CINÉTICO PARA LA MEJORA DE LA EFICIENCIA EN LA EDIFICACIÓN
	Autor: JAVIER VILLEGAS NÚÑEZ
	Tutor: SERGIO VÁZQUEZ PÉREZ

- aplicaciones de tracción y vehículos eléctricos.
- motores y generadores para el sector aeronáutico.

Otros sectores donde los MRC podrían acceder en un futuro son los correspondientes a las máquinas herramienta, la robótica y la industria aeroespacial, a causa de la adaptabilidad que estos accionamientos permiten ante diferentes tipos de carga, y porque pueden funcionar a par constante o a potencia constante a través de un control adecuado.

4. MRC EN SISTEMAS DE ALMACENAMIENTOS CINÉTICO DE ENERGÍA

En el capítulo 3 del presente proyecto se realizó una introducción a los almacenadores cinéticos de energía basados en volantes de inercia. Una de las partes fundamentales de estos es la máquina que acciona el volante de inercia, la cual tiene que funcionar como motor y generador, y tenía de cumplir una serie de características:

- Tener capacidad para producir alta potencia de salida
- Responder rápidamente frente a cambios en la demanda de potencia
- Ser capaz de soportar altas velocidades de rotación
- Alta fiabilidad
- Alta eficiencia

Estas características necesarias reducen el abanico de posibilidades a dos tipos de motores: las máquinas de reluctancia y las de imanes permanentes. Sin embargo, estas características son las que tienen las MRCs por naturaleza [40][45], siendo

	DISEÑO DE UN SISTEMA DE CONTROL PREDICTIVO PARA EL ACCIONAMIENTO DE LA MÁQUINA DE RELUCTANCIA CONMUTADA DE UN SISTEMA DE ALMACENAMIENTO CINÉTICO PARA LA MEJORA DE LA EFICIENCIA EN LA EDIFICACIÓN
	Autor: JAVIER VILLEGAS NÚÑEZ
	Tutor: SERGIO VÁZQUEZ PÉREZ

este tipo de máquina la que mejor se adapta a estas aplicaciones de almacenamiento cinético de energía, proporcionando una solución compacta, robusta y barata. Las desventajas que el empleo de la MRC pueda acarrear ruido y vibración, pero estos no suponen un conflicto grave para estas aplicaciones, además.

Todo lo anterior se evidencia, observando el sistema de almacenamiento *Dynastore* de la empresa alemana *RWE Piller*, única compañía que ha apostado recientemente por incorporar la tecnología de reluctancia conmutada a sus almacenadores cinéticos [46].

5. CONSTITUCIÓN Y PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO

5.1. Constitución

La estructura de la máquina de reluctancia conmutada es un accionamiento electromagnético, sin colector de delgas, sin escobillas, sin devanado eléctrico en el rotor y sin imanes permanentes que esta constituido por una estructura reluctante con polos salientes tanto en el estator como en el rotor. En los polos estáticos se ubican las bobinas concentradas que conectadas entre sí en serie a pares diametralmente opuestos forman las fases del motor. Las configuraciones más habituales son 6/4 (6 polos estáticos y 4 polos rotóricos) y 12/8 para los accionamientos trifásicos, 8/6 y 16/12 para los tetrafásicos y 10/8 para los pentafásicos [47][48].

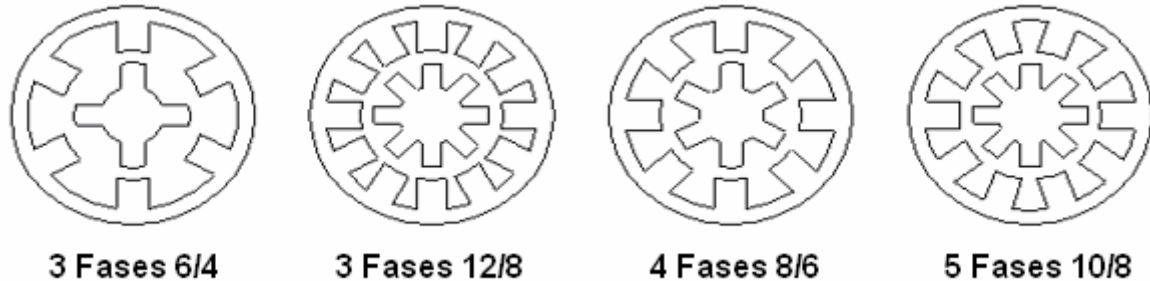


Figura 4.1. Estructuras electromagnéticas del SRM.

El número de polos del rotor tiene que ser tal que impida, para cualquier posición, la alineación completa con todos los polos estáticos, ya que siempre ha de existir algún polo rotórico que pueda alcanzar el alineamiento. Por lo tanto han de cumplirse las condiciones siguientes:

$$N_s = 2 \cdot k \cdot m$$

$$N_r = 2 \cdot k \cdot (m \pm 1)$$

Siendo:

N_s = Número de polos del estator.

N_r = Número de polos del rotor.

k = Número entero (denominado multiplicidad).

$2k$ = Número de polos por fase

m = Número de fases de la máquina.

La frecuencia de conmutación de una fase viene dada por la siguiente expresión:

$$f = \frac{N \cdot N_r}{60}$$

Donde la frecuencia viene dada en Hz, y ' N ' es la velocidad de rotación del motor en rpm.

	DISEÑO DE UN SISTEMA DE CONTROL PREDICTIVO PARA EL ACCIONAMIENTO DE LA MÁQUINA DE RELUCTANCIA CONMUTADA DE UN SISTEMA DE ALMACENAMIENTO CINÉTICO PARA LA MEJORA DE LA EFICIENCIA EN LA EDIFICACIÓN
	Autor: JAVIER VILLEGAS NÚÑEZ
	Tutor: SERGIO VÁZQUEZ PÉREZ

El ángulo de paso o de conmutación viene dado por la siguiente ecuación:

$$\varepsilon = \frac{360}{m \cdot Nr}$$

Al número de conmutaciones necesarias para hacer una revolución completa se le conoce como resolución, s , y es igual a:

$$s = m \cdot Nr$$

5.2. Principio de funcionamiento

En las MRCs, la producción del par y el consecuente movimiento se produce como consecuencia de la existencia de una reluctancia variable en el entrehierro existente entre el rotor y el estator de la máquina. Cuando una fase del estator se energiza, se genera un único campo magnético y aparece un par reluctante como consecuencia de la tendencia del rotor a desplazarse hacia la posición de mínima reluctancia. Este fenómeno es análogo, a la fuerza que atrae el hierro o el acero hacia un electroimán o un imán permanente. Estas máquinas se diferencian de las máquinas de inducción y los motores DC, en las que el movimiento se produce por la interacción de dos campos magnéticos, uno generado en el estator y otro generado en el rotor.

Para estudiar el principio del funcionamiento del SRM utilizaremos un motor de tres fases, $m = 3$, una estructura electromagnética 6/4 ($N_s = 6$ y $N_r = 4$) y una topología de convertidor estático tipo asimétrica o clásica, Figura 4.2.

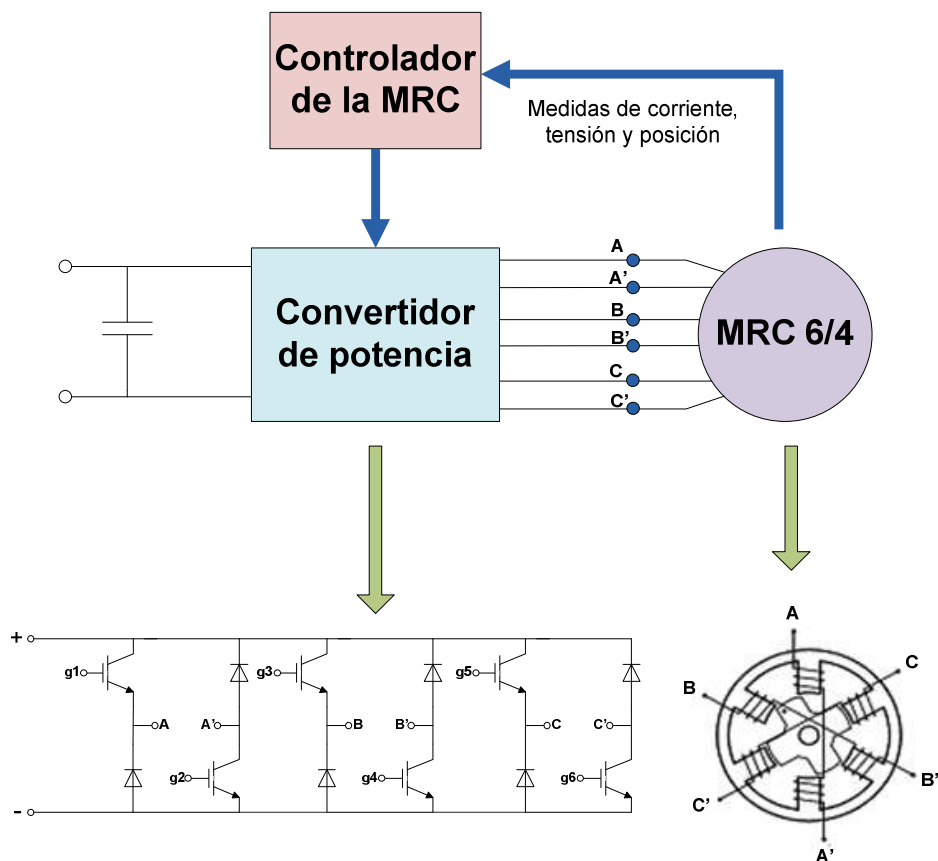


Figura 4.2. Situación en estudio

La conmutación de las corrientes en las fases se realiza mediante un convertidor estático de potencia, en el que la secuencia de conmutación de los interruptores de estado sólido que lo componen está controlada por la posición del rotor a través de sensores ópticos o magnéticos. El par se produce exclusivamente por la tendencia del circuito magnético a adoptar en todo instante la posición de mínima reluctancia y es independiente del sentido de la corriente [49].

En la Figura 4.3 se muestra la conmutación de un ciclo eléctrico. Las fases en conducción se han representado en trazo continuo mientras que las que no lo están se han dibujado en trazo discontinuo.

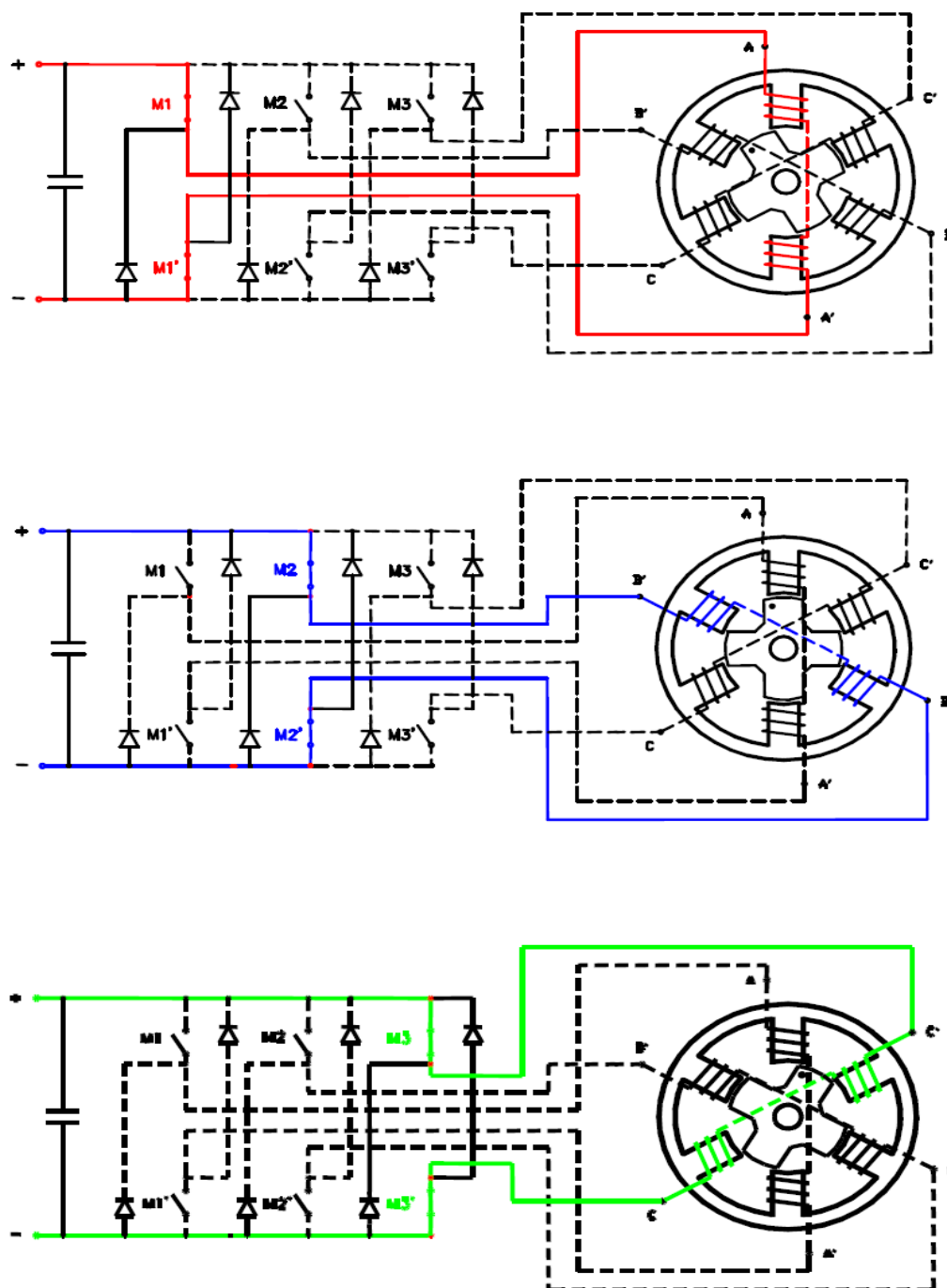


Figura 4.3. Conmutación de las fases del motor en función de la posición del rotor [33]

Suponiendo que el rotor gira en el sentido de las agujas del reloj, en el instante en que el polo rotórico inicia el recubrimiento del polo estatórico, se genera una señal a través de los sensores de posición que produce el cierre de los interruptores M1 y M1', quedando excitada la fase AA'. La conducción se prolonga aproximadamente a lo largo de un ángulo de paso (ε , en nuestro ejemplo 30°). El ángulo de paso recorrido viene dado por la expresión siguiente:

$$\varepsilon = \frac{360}{m \cdot Nr} = \frac{360}{3 \cdot 4} = 30^\circ$$

Llegado este momento los interruptores se abren, pasando a conducir los diodos, quedando aplicada una tensión negativa en bornes de la fase AA', que fuerza a la corriente a anularse, y se excita la fase BB'. Durante los siguientes 30° la corriente circula por esta fase, al cabo de los cuales la corriente se hace cero circulando por los diodos. A continuación se repetirá el proceso ahora a través de la fase CC' y completando un paso polar rotórico (en nuestro caso 90°).

El ciclo anterior se va repitiendo excitando correlativamente las fases A, B, y C con los intervalos comentados. La frecuencia de conmutación de las fases ' f ' (Hz), para que el rotor gire a una determinada velocidad N (min-1), será de:

$$f = \frac{N \cdot Nr}{60}$$

Evolución de la inductancia de fase

En las MRCs el par se origina como consecuencia de la tendencia del rotor a desplazarse hacia la posición de mínima reluctancia. En la Figura 4.4 se representa la evolución de las inductancias en las tres fases del motor, aproximadas por tramos lineales, en función de la posición del rotor, $L(\theta)$. También se muestra la secuencia de conmutación de los interruptores del convertidor estático y la distribución ideal de las corrientes por las fases del motor, $i(\theta)$. Las inductancias de cada fase del motor evolucionan desde un valor máximo L_d que corresponde a la posición de

alineamiento entre polos del estator y rotor, hasta alcanzar un valor mínimo L_q que corresponde a la posición de máximo desalineamiento entre estos polos. La excitación de cada fase coincide habitualmente con la posición de inductancia mínima.

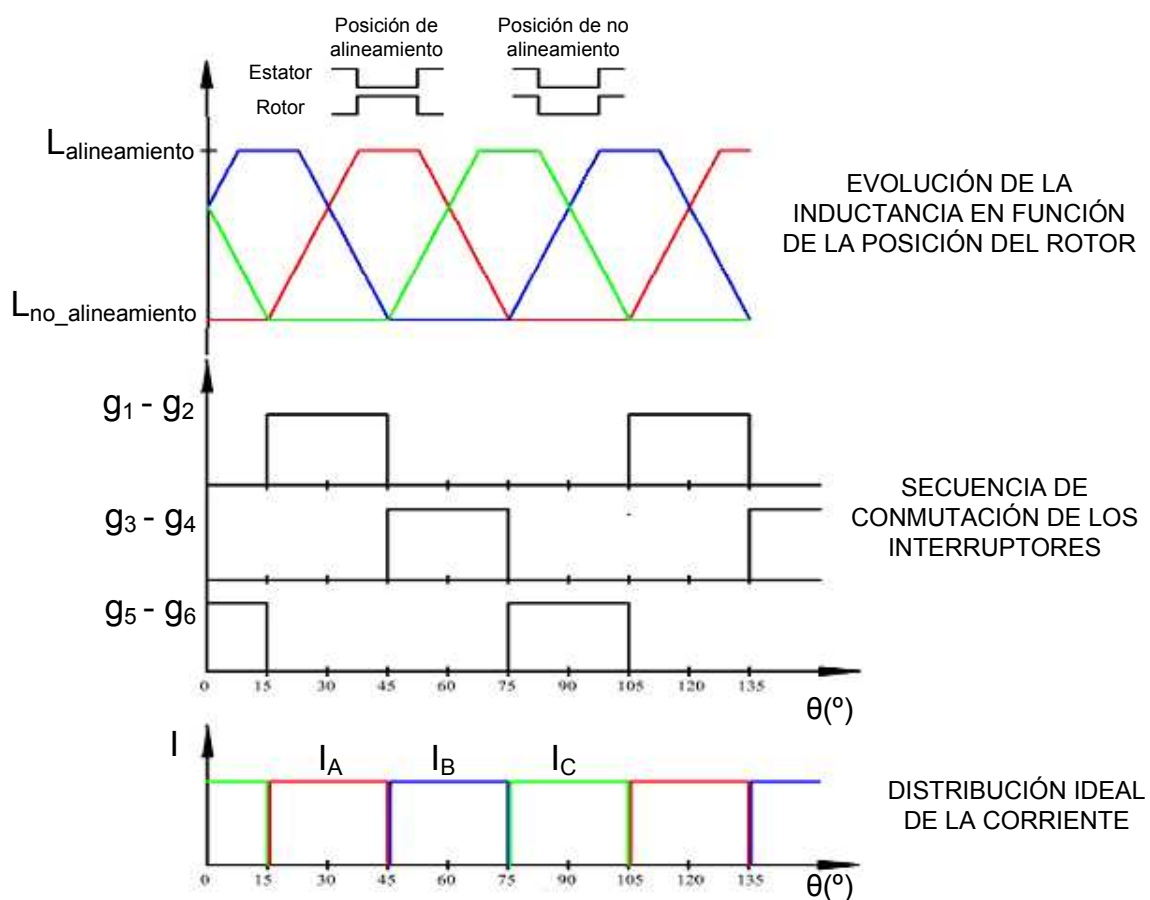


Figura 4.4. Evolución de las inductancias, de la secuencia de conmutación y de las corrientes de fase idealizadas.

En realidad la corriente se aleja de la forma rectangular ya que ésta no puede establecerse ni anularse instantáneamente. Su evolución con la posición está condicionada por el avance o retraso del inicio de la conmutación con respecto al momento en que empieza el crecimiento de la inductancia y por la frecuencia y la

duración del período de conducción. En la Figura 4.5 puede observarse la forma de onda real de la corriente de fase.

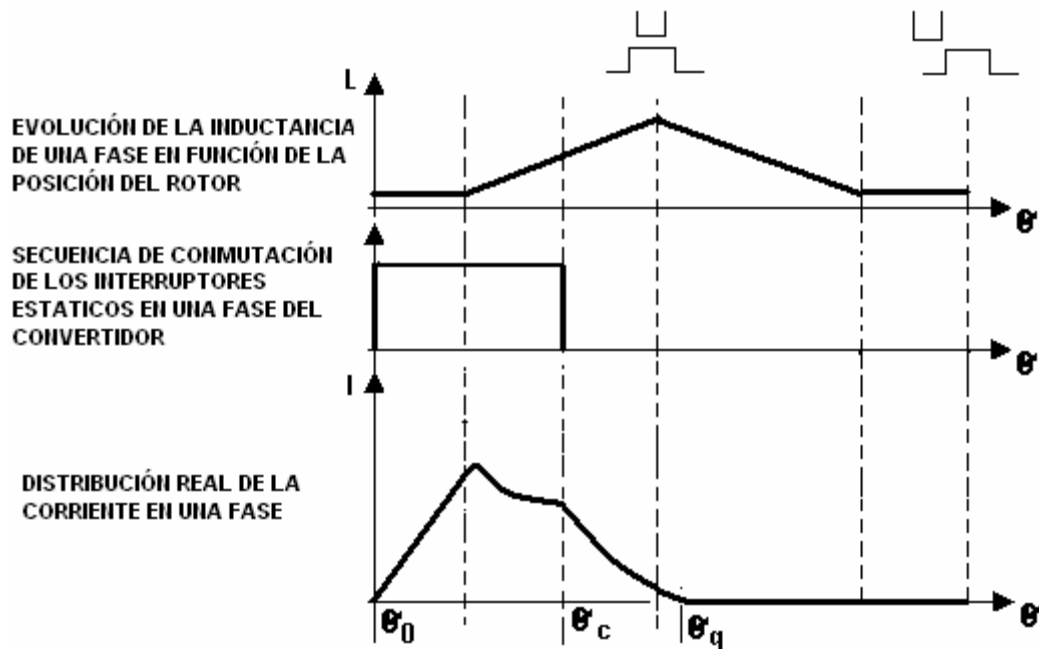


Figura 4.5. Evolución de las inductancia, de la secuencia de conmutación y de la corriente de fase real.

5.3. Producción del par

El par en una MRC viene dado, suponiendo un régimen de no saturación, por la ecuación:

$$T = \frac{1}{2} \frac{dL}{d\theta} \cdot i^2$$

De la ecuación anterior se desprende que el par (positivo o negativo) no depende del signo de la corriente en las fases, y es por ello que normalmente se trabaja con

accionamientos eléctricos unidireccionales con estas máquinas. Por otro lado se observa que en la zona de crecimiento de la inductancia se produce un par motor o par positivo, mientras que el funcionamiento en la zona de decrecimiento se produce un par generador o par negativo. Podemos ver este comportamiento en la Figura 4.6.

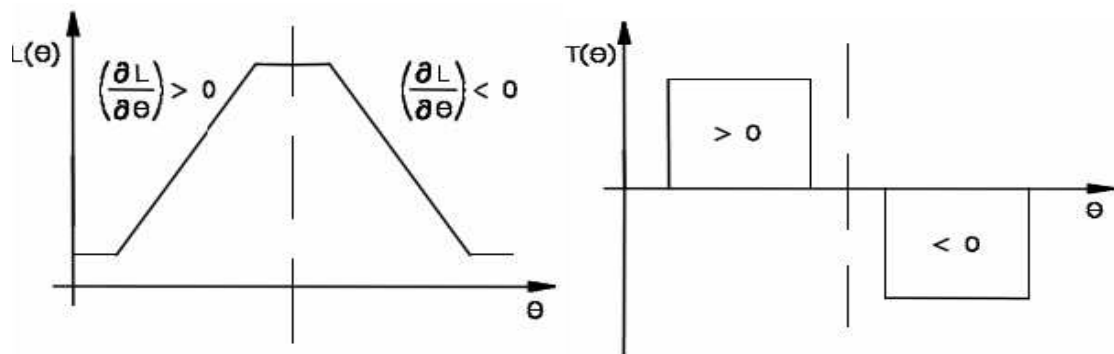


Figura 4.6. Par motor y par generador.

En las MRCs siempre debe de haber un par que garantice la continuidad del giro del rotor, de manera que antes de que el par debido a una fase se anule debido a su alineamiento, se tiene que activar la fase correlativa que origine un par en el mismo sentido.

Esto origina que el par en las MRCs sea por naturaleza pulsante, con un rizado importante.

6. CARACTERÍSTICA PAR-VELOCIDAD

La característica par-velocidad típica de una MRC

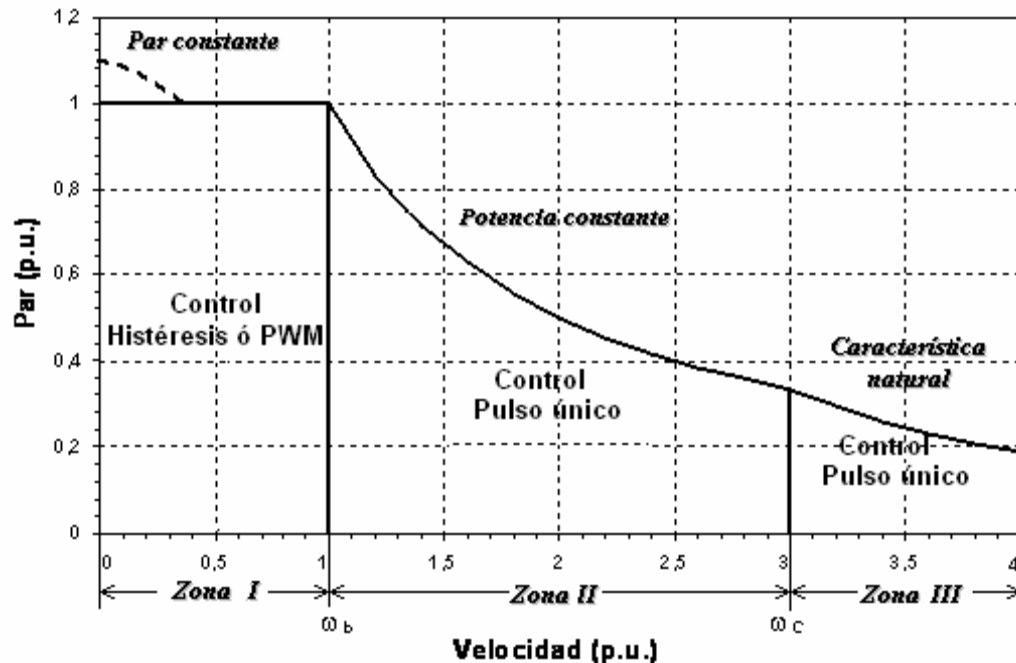


Figura 4.7. Característica par-velocidad de una MRC

Esta característica se puede dividir en tres zonas de funcionamiento que pueden darse por separado o bien combinadas en un mismo accionamiento. Dentro de la zona delimitada por la característica par-velocidad podrá situarse el punto de trabajo de la máquina actuando sobre el control de la máquina.

Zona I: Donde la MRC trabaja a potencia constante. $T_{av} = cte$.

Zona II: El par es inversamente proporcional a la velocidad. $T_{av} = K / \omega$

Zona III: Es la zona natural de una MRC, donde el par es inversamente proporcional al cuadrado de la velocidad. $T_{av} = K / \omega^2$

En la característica par-velocidad se diferencian 2 velocidades críticas:

ω_b : velocidad base $\rightarrow$ velocidad más elevada a la cual con la tensión máxima podemos obtener el par nominal. Hasta esta velocidad el funcionamiento es a par constante. A muy bajas velocidades puede obtenerse un incremento de par,

	DISEÑO DE UN SISTEMA DE CONTROL PREDICTIVO PARA EL ACCIONAMIENTO DE LA MÁQUINA DE RELUCTANCIA CONMUTADA DE UN SISTEMA DE ALMACENAMIENTO CINÉTICO PARA LA MEJORA DE LA EFICIENCIA EN LA EDIFICACIÓN
	Autor: JAVIER VILLEGAS NÚÑEZ
	Tutor: SERGIO VÁZQUEZ PÉREZ

manteniendo la tensión constante, incrementando la corriente como consecuencia del bajo valor de las pérdidas en el hierro, línea de trazo discontinuo en la Figura 4.7.

$\omega_c \rightarrow$ velocidad en la que el motor deja de funcionar a potencia constante para pasar a funcionar en la característica natural.

7. ACCIONAMIENTO DE LAS MRC

7.1. Convertidores estáticos para MRC.

Los convertidores electrónicos de potencia constituyen el accionamiento eléctrico de la máquina. Se trata de un equipo de regulación que gestiona el flujo de energía con el exterior. En aplicaciones en las que la máquina puede funcionar tanto en modo motor como en modo generador, como es el caso de los almacenadores cinéticos, el accionamiento eléctrico debe ser, en principio, capaz de trabajar en los cuatro cuadrantes (giro horario/antihorario, par positivo/negativo).

Su finalidad será extraer potencia de la entrada para acelerar el volante durante la carga, e inyectar la potencia producida como consecuencia de la desaceleración del conjunto MRC más volante durante la descarga. Para ello, el convertidor de potencia deberá tener un adecuado sistema de control que se encargue de conmutar a los semiconductores de potencia de su estado de no conducción a conducción y de conducción a no conducción siguiendo un determinado patrón que vendrá determinado por el modo de funcionamiento, la estrategia de conmutación elegida, la situación global del sistema y el estado de las distintas variables muestreadas (tensiones, intensidades, posición del rotor, etc.). Por tanto, las funciones principales del accionamiento son:

	DISEÑO DE UN SISTEMA DE CONTROL PREDICTIVO PARA EL ACCIONAMIENTO DE LA MÁQUINA DE RELUCTANCIA CONMUTADA DE UN SISTEMA DE ALMACENAMIENTO CINÉTICO PARA LA MEJORA DE LA EFICIENCIA EN LA EDIFICACIÓN
	Autor: JAVIER VILLEGAS NÚÑEZ
	Tutor: SERGIO VÁZQUEZ PÉREZ

- Efectuar la conmutación de las fases en el orden establecido por el control según la posición rotórica, cerrando y abriendo los interruptores de estado sólido que lo componen. Estos interruptores podrán ser IGBT's o MOSFET's en función de las tensiones y corrientes con las que se trabajen.

- Garantizar la rápida desmagnetización de las fases del SRM. La corriente de fase en un SRM es unipolar por lo que en principio basta con un solo interruptor por fase para realizar la conmutación. La desmagnetización de la fase, una vez abierto el interruptor, se realiza a través de un diodo de libre circulación con una resistencia en serie para aplicar una tensión inversa en bornes de la fase y de esta manera forzar a la corriente a anularse.

Una de las características de las MRCs es que el par (positivo o negativo) no depende del signo de la corriente en la fase, por lo que tradicionalmente se utilizan convertidores para corrientes unidireccionales. Existen diferentes topologías para el convertidor estático de una MRC, aunque la más popular es el convertidor asimétrico o convertidor clásico. Otras tipologías bastante utilizadas son el convertidor unipolar y el convertidor Miller. A continuación, se estudiarán las principales características de los tres convertidores citados.

CONVERTIDOR CLÁSICO

Este convertidor está constituido por tantas ramas como fases. En cada rama hay dos interruptores de estado sólido y dos diodos, quedando conectadas las correspondientes fases del motor tal como se muestra en la Figura 4.8.

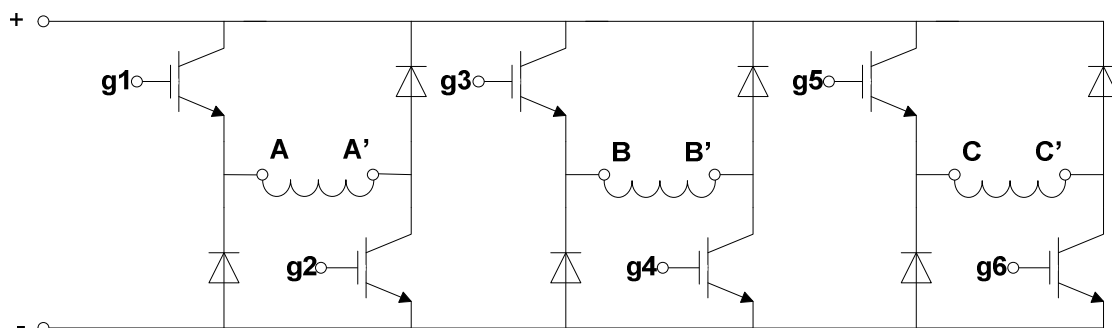


Figura 4.8. Convertidor en puente asimétrico para tres fases

En este convertidor pueden diferenciarse claramente hasta cinco estados de funcionamiento:

1. Cuando los dos transistores y los dos diodos están abiertos. En este caso, la tensión en la fase es de 0 V.
2. Los dos transistores están cerrados, por lo que se permite la transferencia de energía, siendo la tensión aplicada a la fase de +Vdc.
3. Un transistor y el diodo que hace que la fase del motor quede cortocircuitada están cerrados. La corriente en la fase tiene la misma dirección que en el estado 2. La energía almacenada en la bobina se disipa en forma de calor por lo que a este estado de funcionamiento se le conoce como fase de libre circulación. El valor de la tensión de fase será de 0V.
4. Es análogo al anterior. La única diferencia es que el interruptor de estado sólido y el diodo que conducen son los complementarios a los del tercer estado de funcionamiento.
5. Los diodos conducen y los transistores están abiertos. En este estado la corriente sigue manteniendo la misma dirección que en el estado 2 y la energía almacenada en la bobina se devuelve al DC-link, por lo que la tensión en la fase del motor será de -Vdc.

Este convertidor se puede alimentar en continua o en corriente alterna intercalando un rectificador trifásico no controlado y un filtro. Presenta independencia entre fases y un elevado número de posibilidades de control. Estos son algunos de los motivos por lo que es de los más utilizados. Como punto negativo cabe indicar que necesita de un elevado número de interruptores de estado sólido.

CONVERTIDOR MILLER

En esta nueva configuración las fases comparten ramas del convertidor como se observa en la Figura 4.9.

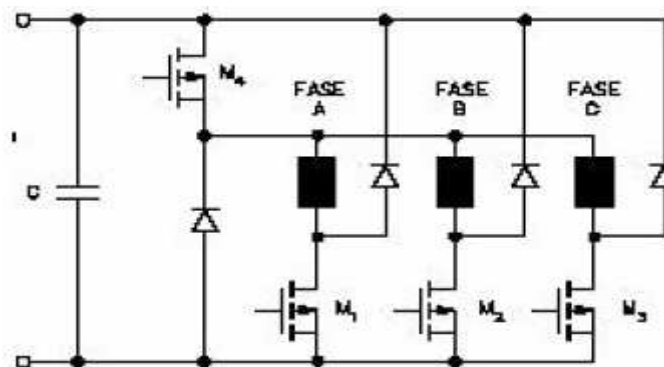


Figura 4.9. Convertidor Miller

Este convertidor es aconsejable para aplicaciones con un número elevado de fases (>4), ya que los interruptores de estado sólido y los diodos se comparten para más de una fase. Este punto repercute positivamente en la reducción del coste del convertidor. Como en el caso del convertidor clásico también soporta tensiones positivas, negativas y nulas. Tiene el inconveniente de no disponer de independencia para todas las fases, por lo que se reducen las posibilidades de control.

CONVERTIDOR UNIPOLAR

Este convertidor dispone de un interruptor controlado por fase. En este convertidor la operación de magnetización de cada una de las fases se realiza cerrando los interruptores controlados dispuestos en serie con cada una de las fases que constituyen el motor. En el instante en que estos interruptores controlados dejan de conducir se produce la desmagnetización de las fases que se realiza a través de un diodo de libre circulación con una resistencia en serie. El tiempo de desmagnetización depende del valor de la resistencia y la energía almacenada en la bobina se transforma en calor.

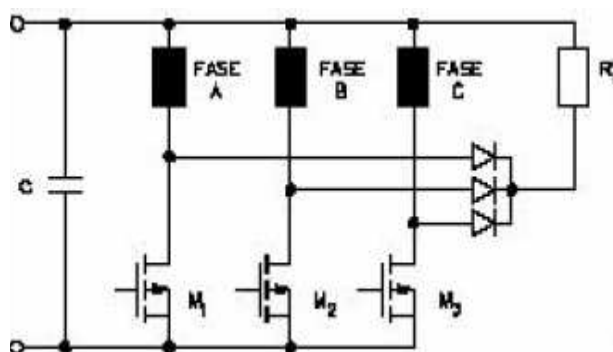


Figura 4.10. Convertidor unipolar

Este tipo de convertidor se utiliza en aplicaciones donde los motores trabajan con tensiones y potencias reducidas, ya que eleva las pérdidas por la resistencia en serie R_d . Una ventaja de este tipo de convertidores es que el circuito de control del interruptor controlado no tiene que estar aislado del resto de los interruptores ya que todos los interruptores controlados tienen la misma referencia.

7.2. Medida de la posición

En la MRC es imprescindible saber en todo momento la posición del rotor, ya que se requiere para la sincronización de la energización de las distintas fases. Para ello

usualmente se utilizan sensores que pueden incrementar el coste y la complejidad del sistema, reduciendo su fiabilidad.

En las aplicaciones que requieran un conocimiento preciso de la posición deberá recurrirse a la utilización de encóders. En muchos casos no se requiere una gran resolución y la detección de la posición rotórica puede realizarse utilizando tres optointerruptores fijos en la carcasa del estator asociados a un disco ranurado acoplado al eje del motor como muestra la Figura 4.11.

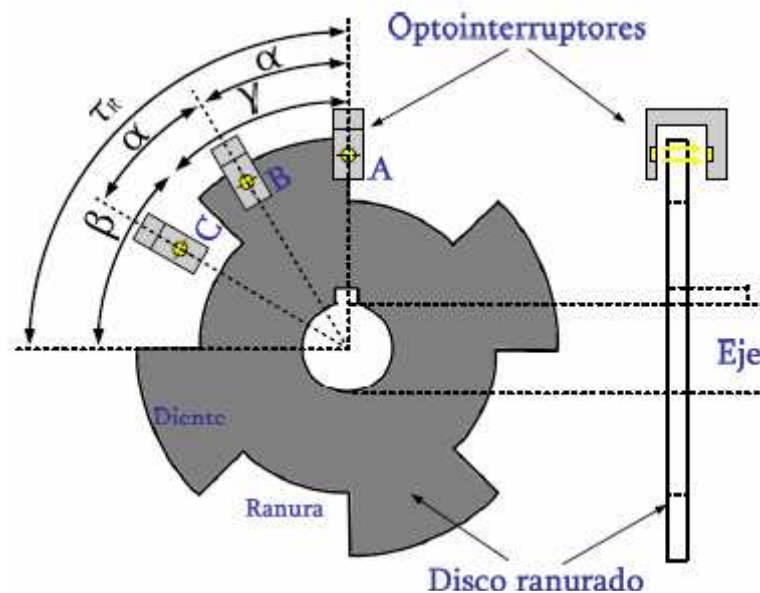


Figura 4.11. Disposición de los optointerruptores respecto del disco ranurado acoplado al motor