
Convertidor Matricial



2.1 Introducción

El Convertidor Matricial (CM) es un convertidor CA-CA trifásico ($3\Phi-3\Phi$) que consiste en un arreglo de interruptores bi-direccionales que conectan una carga trifásica directamente a la línea de alimentación trifásica.

El elemento clave en el CM es el control de los interruptores bi-direccionales que operan a alta frecuencia. Estos son controlados de tal manera que el CM puede suministrar a la carga un voltaje de amplitud y frecuencia variables.

Los interruptores están dispuestos de tal manera que cualquiera de las líneas de salida puede ser conectada a cualquiera de las líneas de entrada. La Fig.1.1 muestra el CM trifásico, con nueve interruptores bi-direccionales. La Fig.1.2 muestra el voltaje de salida v_u y la corriente de entrada i_a típicos en un CM mostrado en Fig. 2.1.

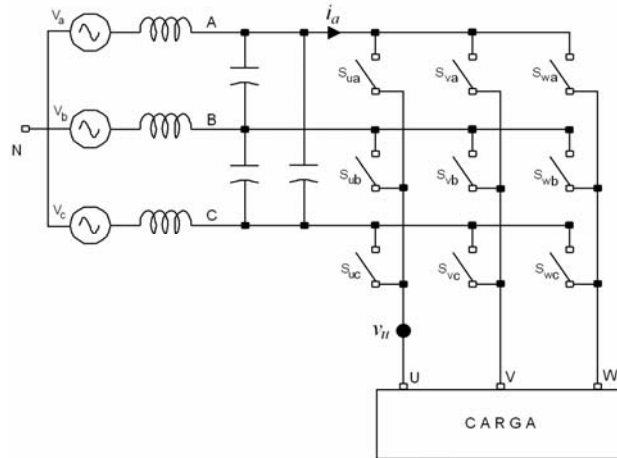


Figura 2.1 Topología del Convertidor Matricial.

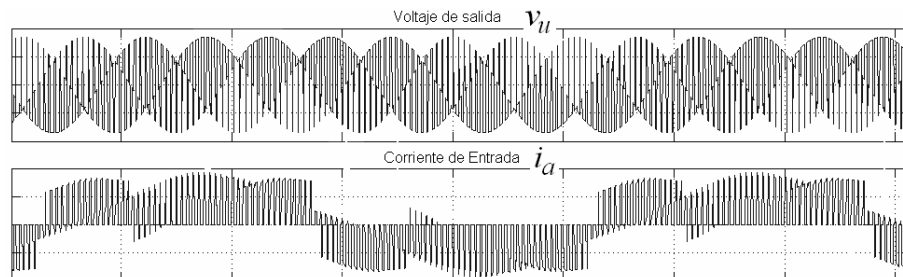


Figura 2.2 Voltaje de Salida y Corriente de Entrada Típicos de un CM.

Los voltajes de salida son generados a través de patrones de modulación PWM (Pulse Width Modulation, Modulación por Ancho de Pulso), similares a los utilizados en los inversores convencionales, excepto por que la entrada es una fuente de alimentación trifásica en lugar de un voltaje constante de DC.

El CM no utiliza un bus de CD como etapa intermedia en la conversión CA-CA, por lo que no necesita de elementos reactivos para almacenar energía, que limitan en tamaño y duración la vida útil de un convertidor, como es común en otros convertidores de potencia. Este convertidor tiene algunas características que los hacen más eficiente frente a otros convertidores de CA-CA:

- Circuito de potencia simple y compacto.
- Voltaje de salida trifásico con frecuencia y amplitud variables.
- Corrientes de entrada y salida senoidales.
- Factor de potencia ajustable a la unidad para cualquier tipo de carga.
- Operación completamente regenerativa.

Estas características son las razones del enorme interés en esta topología, que ha sido estudiada desde hace 20 años, pero que hasta ahora se ha logrado desarrollar con mayor eficacia gracias a los avances tecnológicos en dispositivos semiconductores [4].

Sin embargo, a pesar de los beneficios que ofrece esta tecnología, existen importantes desventajas que han evitado que este tipo de convertidor tenga una mayor apertura a nivel industrial.

Una de ellas es que el interruptor bi-direccional no es aún muy comercial, por lo que este tiene que ser implementado con diodos y transistores, u otros dispositivos de potencia uni-direccionales, ocasionando que el CM requiera de un elevado número de dispositivos semiconductores así como un aumento en el costo del mismo.

A pesar de que existen varias investigaciones dedicadas al desarrollo de estos interruptores, y en especial de este convertidor, su desarrollo en la industria aún es muy limitado.

Existen trabajos sobre el empaquetamiento de interruptores en módulos para el CM que se han expuesto por C. Klumpner, *et.al.* en [5], [6], P. W. Wheeler, *et.al.* en [7], o por Olaf Simon en [8] donde expone un modulo de potencia, ECONOMAC que se muestra en la Figura 1.3, con un rango de potencia de hasta 7.5 kW realizado por Eupec¹ en colaboración con Siemens que contiene los 18 IGBTs y diodos necesarios para el CM.

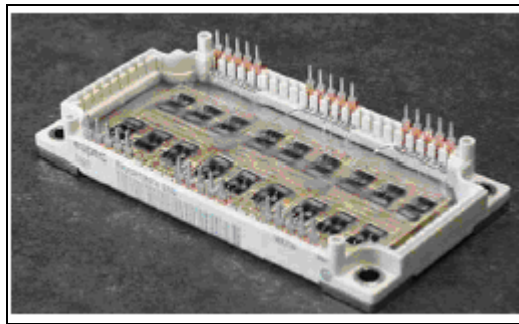


Figura 2.3 ECONOMAC, Módulo de IGBTs para Convertidores Matriciales [9]

Un punto importante a considerar es la protección que ofrece el CM, al estar conectando directamente la carga a la fuente de alimentación trifásica, este debe ofrecer seguridad al operar, por lo que se han desarrollado métodos modernos de conmutación y circuitos de protección que permitan al CM funcionar correctamente ante diversas condiciones [10], punto que se detallará posteriormente.

La relación de voltaje entrada-salida es también otro de los obstáculos que han frenado el desarrollo de este convertidor, dado que ésta es de máximo 0.86.

Los principios del CM fueron publicados inicialmente en 1976 [11]. El circuito era considerado como un ciclo-convertidor donde los dispositivos utilizados eran de conmutación forzada, por lo que el CM es en algunas ocasiones nombrado como ciclo-convertidor de conmutación forzada. Los primeros diseños de este convertidor utilizaban tiristores con circuitos externos de conmutación para implementar el interruptor bi-direccional controlable. Con esta solución, el circuito de potencia era de gran tamaño y su desempeño era pobre.

La introducción de los transistores de potencia hizo que el CM fuera una topología más atractiva. Sin embargo, el verdadero desarrollo comenzó con el trabajo de Venturini y Alesina publicado en 1980 [11], [12]. Ellos presentaron el circuito de potencia como un arreglo matricial de interruptores bi-direccionales e introdujeron el nombre de “convertidor matricial”. Pero su verdadera contribución radica en el análisis de los algoritmos de control bajo una fuerte base matemática que describe el funcionamiento del convertidor.

El método propuesto por Venturini y Alesina, también conocido como aproximación por “función de transferencia directa”, los voltajes de salida se obtiene mediante la multiplicación de la modulación matricial (función de transferencia) con los voltajes de entrada. En 1983, J.Rodríguez introdujo una técnica de modulación basada en el concepto de “fictitious DC Link” [4], que consiste en obtener los ciclos de trabajo mediante dos etapas, una rectificadora y una inversora. La función de transferencia se obtiene haciendo la multiplicación de las dos matrices de modulación correspondientes a cada etapa.

En el método anterior, las conmutaciones son dispuestas de tal manera que el voltaje de salida se genera conmutando entre los voltajes más positivo y los más negativos de las líneas de entrada, utilizando modulación PWM como en los inversores convencionales. Este método también es conocido como aproximación por “función de transferencia indirecta”.

A partir de 1989 L. Hurber [13] publicó los primeros trabajos en los que se aplicaba los principios de la modulación vectorial (SVM) en la modulación del CM. Sin embargo, las numerosas conmutaciones simultáneas de los interruptores bi-direccionales usados en el convertidor eran difíciles de conseguir sin generar picos de sobre-corriente o sobrevoltaje que pudieran destruir a los dispositivos semiconductores. Debido a este tipo de problemas, así como también el número de dispositivos necesarios y la aparente complejidad de los algoritmos de control, el interés del CM para aplicaciones industriales era muy limitado.

Hoy en día, los métodos basados en SVM son los más recomendables, dado que presentan resultados muy eficientes, además de que la teoría del método ha sido bien estudiada [13].

Actualmente existen diferentes estrategias de conmutación en los interruptores para evitar este tipo de problemas permitiendo operarlos de una manera más segura. En 2002 se publica una serie de artículos dedicados a los convertidores matriciales en una sección especial de la IEEE Transactions on Industrial Electronics [4] con el propósito de direccionar las investigaciones más recientes en ese campo, recopilando referencias de 14 países en la contribución del desarrollo del CM. P. Wheeler publica diferentes artículos que muestran los alcances que ha logrado esta tecnología, y que cada vez está más cerca de ser aplicada en la industria.

En 2004, D.Casedi [14] propone una nueva estrategia de modulación que permite reducir las conmutaciones simultaneas, aunque para ello requiere el uso de sensores en la corriente de salida, lo que no es deseable debido a los problemas de medición en este tipo de sensores, que puede producir resultados inciertos. Hoy en día las investigaciones se han centrado en diferentes aspectos que permitan dar un mayor impulso al uso de este convertidor en aplicaciones industriales.

Importantes compañías especializadas en el desarrollo de variadores de velocidad para motores han puesto considerable interés para comercializar productos utilizando la tecnología del CM. Yaskawa a desarrollado variadores de velocidad utilizando la tecnología del CM [3] [15], estos utilizan IGBT's en anti-paralelo para implementar los 9 interruptores así como los diodos asociados a cada uno. Pero estos componentes son caros, y a pesar de que el costo de los dispositivos semiconductores va en descenso, las variadores de velocidad con CM resultan ser más costosos que los variadores de velocidad estándar de las mismas especificaciones en potencia [3] [10] [15].

Por otro lado, aunque existen teorías de modulación bien establecidas, el estudio de nuevas estrategias de modulación para convertidores matriciales esta aun en progreso. Actualmente existen grupos de investigación en diferentes universidades dedicados especialmente a este tipo de convertidores.

2.2 Topología

Como ya se ha mencionado, el Convertidor Matricial consiste en nueve interruptores bi-direccionales, que hacen posible la conversión directa de corriente alterna CA-CA trifásica. La Fig. 1.4 muestra la estructura básica del CM. Los interruptores se encuentran arreglados de tal manera que es posible conectar cualquier fase de entrada (A,B,C) a cualquier fase de salida (U,V,W) en cualquier instante.

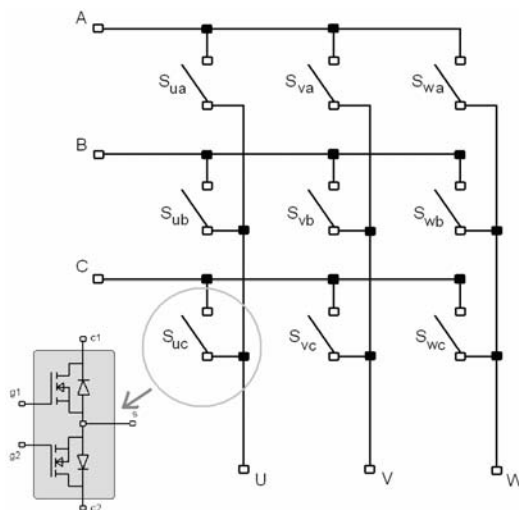


Figura 2.4 Estructura Básica del CM.

El símbolo gráfico que usualmente representa al CM, se muestra en la Fig. 1.5, donde el círculo sombreado representa un interruptor bi-direccional cerrado.

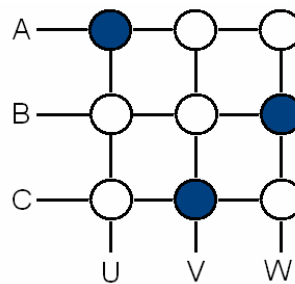


Figura 2.5 Símbolo del CM.

A manera de ejemplo, para el símbolo mostrado, las fases de salida U, V y W están conectadas a las fase de entrada A, C y B respectivamente, en términos de los voltajes, para este estado se tiene

$$\begin{aligned} v_u &= v_a \\ v_v &= v_c \\ v_w &= v_b \end{aligned}$$

Los nueve interruptores dan 512 diferentes combinaciones de estados de conmutación, las cuales se reducen a 27 (Fig. 1.6) tomando en cuenta dos reglas básicas necesarias para operar este convertidor.

- NO conectar dos fases de entrada a la misma fase de salida (cortocircuito en la entrada = sobre-corrientes).
- NO desconectar el circuito en la fase de salida (desconectar carga inductiva = sobre-voltajes).

Las combinaciones pueden ser clasificadas en tres grupos. El primer grupo esta formado por seis combinaciones donde cada fase de salida esta conectada a una diferente fase de entrada.

El segundo grupo contiene 18 combinaciones donde dos de las fases de salida se encuentran conectadas generando un voltaje nulo entre ambas fases.

El tercer grupo incluye tres combinaciones donde las tres fases de salida se encuentran conectadas a una sola fase de entrada generando una tensión nula entre las fases de salida.

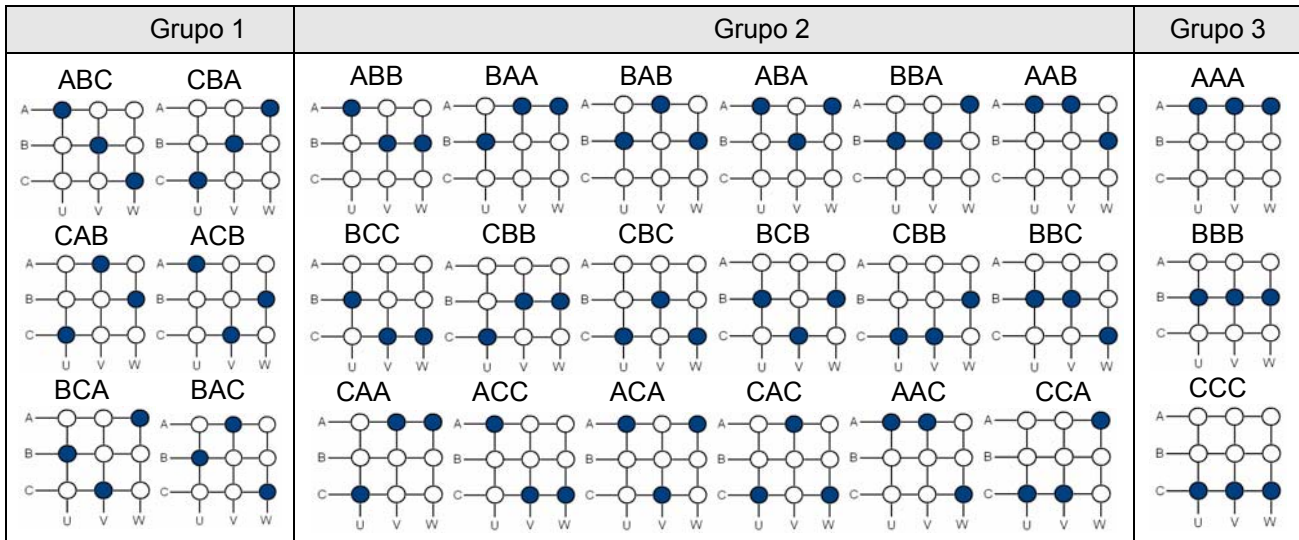


Figura 2.6 Combinaciones permitidas en el CM.

Este convertidor, a diferencia del tradicional Rectificador-Inversor, su operación es completamente en los cuatro cuadrantes, esto le permite trabajar de manera bi-direccional, el factor de potencia en la entrada puede ser controlado independientemente de la carga generando corrientes de entrada casi senoidales, no requiere de un bus de CD, y no almacena energía internamente. Sin embargo, como no almacena energía, la potencia a la entrada puede verse directamente a la salida, lo que provoca que cualquier alteración en las líneas de entrada afecten inmediatamente a las fases de salida, por lo que es importante considerar una estrategia apropiada de protección.

Un circuito de protección debe proteger contra sobre-voltajes en la alimentación y sobre-corrientes en el lado de la carga, que generalmente se trata de un motor de inducción. Estas consideraciones se detallaran mas adelante.

2.3 Interruptor Bi-direccional

Los interruptores del CM son interruptores de cuatro cuadrantes, es decir, tienen la capacidad de bloquear voltajes positivos o negativos y conducir corrientes en cualquier dirección. Dado que estos interruptores son fabricados para aplicaciones muy específicas, su costo es aún muy elevado, y tienen que ser implementados mediante arreglos de dispositivos semiconductores de dos cuadrantes como el MOSFET o el IGBT.

En general, el interruptor bi-direccional puede implementarse de tres maneras, colocando un interruptor uni-direccional al centro de un puente de diodos (PD) Fig. 1.7a, o colocando el interruptor en anti-paralelo, ya sea con el emisor en común (EC), Fig. 1.7b, ó con el colector en común (CC), Fig. 1.7c.

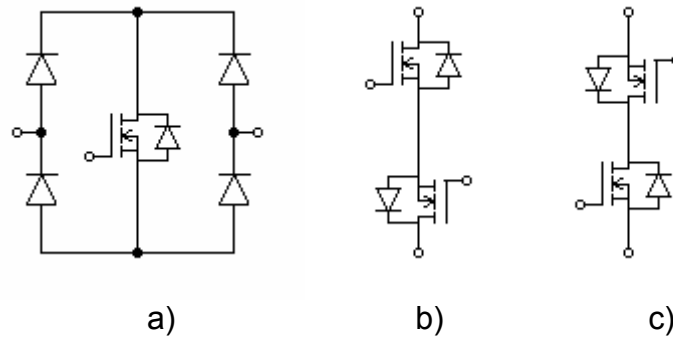


Figura 2.7 Configuraciones para el interruptor bi-direccional, a) Interruptor PD, b) interruptor EC, c) interruptor CC.

2.3.1 MOSFET con puente de diodos (PD)

Este se construye colocando un MOSFET al centro de un puente de diodos sencillo. La principal ventaja de este arreglo es que la corriente puede fluir en ambas direcciones por el mismo semiconductor, por lo que solo se requiere un solo driver para disparar al interruptor o celda de conmutación. Las pérdidas por conducción son relativamente más altas debido a que la trayectoria de conducción se establece por tres dispositivos. La dirección de la corriente en el interruptor no puede ser controlada, esto representa la mayor desventaja al tratar de implementar métodos de conmutación más eficientes.

2.3.2 MOSFET en emisor común (EC).

El arreglo del interruptor bi-direccional emisor común consiste en dos MOSFET conectados en anti-paralelo como se muestra en la Fig. 1.8. Las pérdidas por conducción son menores debido a que la corriente es ahora conducida por sólo dos dispositivos. Este arreglo permite controlar independientemente la dirección de la corriente en el interruptor bi-direccional. Una desventaja es que para cada celda de conmutación se requiere una fuente aislada para los drivers de disparo (Fig. 1.8), dando un total de nueve fuentes para controlar el CM.

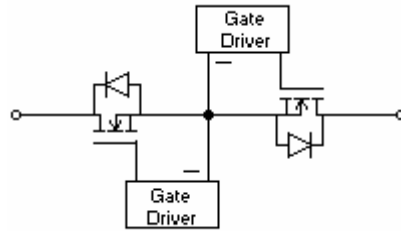


Figura 2.8 MOSFET en emisor común (EC).

2.3.3 MOSFET en colector común (CC).

En el interruptor bi-direccional colector común, Fig. 1.9, las pérdidas de conducción son las mismas que para el emisor común, la diferencia es que al utilizar este arreglo sólo es necesario el uso de seis fuentes aisladas para el CM debido a que la tierra de cada driver se comparte en cada fase de entrada y salida (Fig. 1.9). Sin embargo, este arreglo no es apropiado en sistemas de alta potencia debido a las inductancias entre cada celda de conmutación que puede causar problemas. La configuración EC es la mas utilizada para la implementación del CM [10].

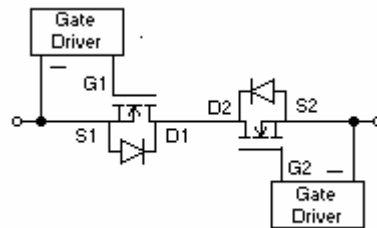


Figura 2.9 MOSFET en colector común (CC).

Comparando estas tres configuraciones en el CM con respecto a los MOSFET's, diodos de respuesta rápida, y fuentes de alimentación aisladas para los drivers de disparo, se muestra la Tabla 1.1 con el número total de elementos para cada configuración.

Interruptor bidireccional	Semiconductores controlados	Diodos de recuperación rápida	Fuentes Aisladas
Arreglo PD	9	36	9
Arreglo EC	18	8 *	9
Arreglo CC	18	8 *	6

*Estos diodos pueden estar incluidos en algunos dispositivos de conmutación como el MOSFET.

Tabla 2.1. Tabla comparativa de semiconducotores en el CM

Para los interruptores bidireccionales anteriores hemos asumido que el dispositivo de conmutación es un MOSFET, aunque es posible utilizar algún otro como el IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor), el MCT (MOS Control Thyristor) o el IGCT (Integrated Gate Commutated Thyristor). Si el dispositivo de conmutación utilizado incluye el diodo de bloqueo inverso, como es el caso del MOSFET utilizado, el convertidor podrá ser mas compacto mejorando considerablemente la eficiencia.

Compañías como DYNEX¹ fabrica desde 2002 módulos de interruptores bi-direccionales con IGBTs para su uso específico en Convertidores Matriciales [16] [17]. La Fig. 1.10 muestra el modulo DIM200MBS12 que es un interruptor bi-direccional que maneja hasta 200 A y 1200 V.

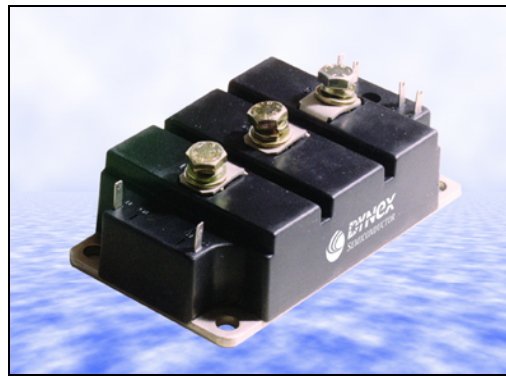


Figura 2.10 Interruptor Bi-Direccional [16]

2.4 Conmutación

Al considerar la estrategia de conmutación en las celdas de conmutación, es necesario considerar dos reglas básicas, estas pueden apreciarse mejor considerando dos interruptores que conectan a una fase de salida del CM,

a) No deben encenderse dos interruptores bi-direccionales al mismo tiempo, como se ve en la Fig. 1.11a esto produciría un corto circuito en las fases de entrada dañando al CM debido a la excesiva corriente que conduciría.

b) Los interruptores no deben apagarse simultáneamente en ningún momento, Fig. 1.11b, esto ocasionaría que la trayectoria de la corriente que conduce a través de la carga generalmente inductiva (motor) se perdiera, causando sobre-voltajes que de igual manera destruirían al CM.

Estas dos consideraciones se deben tomar en cuenta debido a que los dispositivos semiconductores no pueden conmutar instantáneamente por el tiempo de apagado y encendido inherente a la construcción de los mismos.

¹ DYNEX es una marca líder en el desarrollo de tecnología para semiconductores de potencia establecida actualmente en Lincoln, UK.

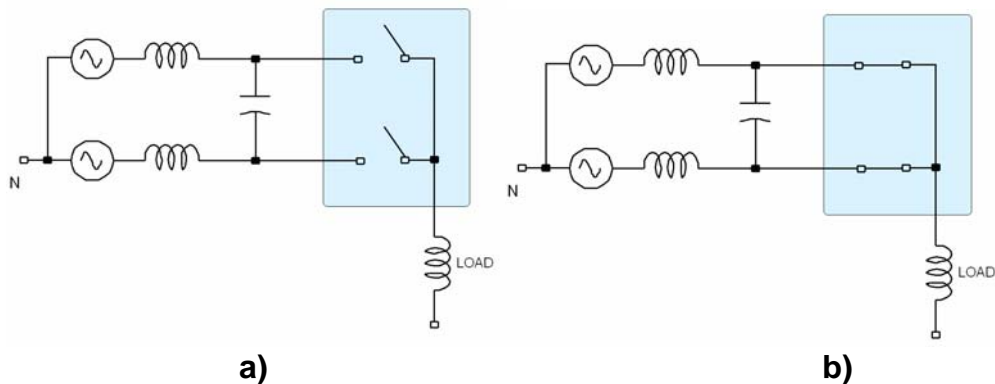


Figura 2.11 Conmutaciones no permitidas en un convertidor matricial, a) dos interruptores abiertos al mismo tiempo en una fase de salida, b) dos interruptores cerrados al mismo tiempo en una fase de salida.

Enseguida se expone una estrategia de conmutación que ha sido expuesta en [4] [18] y que da una solución a este problema. Esta técnica de conmutación consiste en cuatro pasos, y depende de la dirección de la corriente de salida, por lo que se requiere de obtener esta información, ya sea por sensores de corriente o monitoreando el voltaje en los dispositivos de la celda de conmutación. La Fig. 1.13 muestra el esquema de conmutación donde la dirección de la corriente de salida determina el patrón de conmutación.

Para facilitar la explicación, en la Fig. 1.12 se muestran sólo dos fases de entrada conectadas a una fase de salida. Se asume que la corriente fluye en la dirección indicada y que el interruptor S1 (S1a y S1b) se encuentra inicialmente cerrado. Cuando una conmutación hacia S2 es requerida, la dirección de la corriente nos dice cual de los interruptores, S1a o S1b, no está conduciendo. Este dispositivo es entonces apagado. En este caso S1b se apaga. El dispositivo de S2 que conducirá la corriente se enciende, S2a en este caso. En este momento, sólo basta apagar S1a para transferir la corriente de la carga de S1 a S2. El interruptor restante S2b es encendido para permitir la conducción bidireccional de la corriente que ahora fluye por S2. Este proceso se muestra en la Fig. 1.13, donde el tiempo de retardo t_d se determina de acuerdo con la características de los dispositivos semiconductores utilizados (tiempos de apagado y encendido).

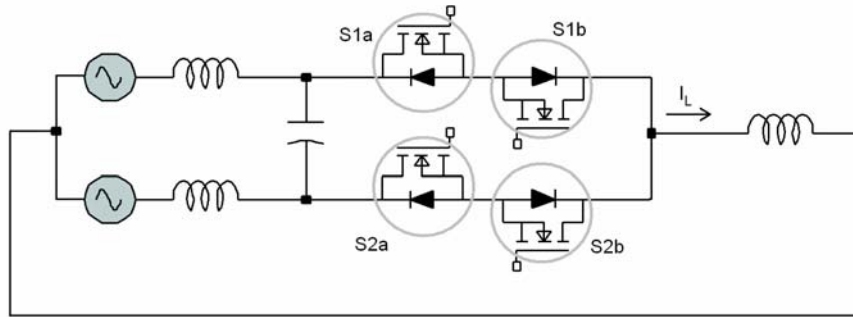


Figura 2.12 Dos celdas de conmutación conectada a una fase de salida.

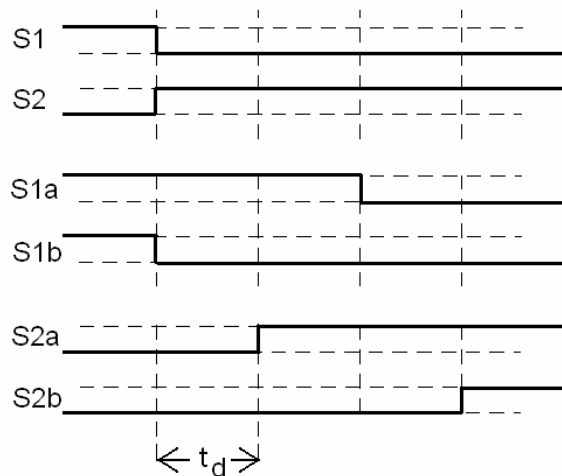


Figura 2.13 Diagrama de tiempo para el proceso de conmutación de una fase de entrada a otra.

2.5 Estrategias de Modulación.

Las señales de salida del CM se forman seleccionando cada una de las fases de entrada de manera secuencial por periodos de tiempo definidos. Generalmente las secuencias para cada una de las fases de salida son las mismas. Fig. 1.14 muestra una fase de salida para el CM con una frecuencia de conmutación relativamente baja para apreciar su comportamiento. El voltaje de salida consiste en segmentos generados por las tres fases de entrada, como se puede apreciar. Las corrientes de entrada consisten en segmentos de las tres corrientes de salida más periodos nulos en los cuales la corriente de salida circula a través de los interruptores del CM.

Tomando en cuenta solo una fase de salida, la técnica de modulación debe especificar el tiempo que cada una de las fases de entrada se conecta a la

fase de salida dentro de un periodo de tiempo definido por la frecuencia de conmutación.

Para conseguir que CM que genere una señal de salida con una frecuencia y amplitud específica, uno de los métodos es definir patrones PWM parecidos a los utilizados en los inversores tradicionales, donde la señal con la frecuencia de conmutación es modulada para la frecuencia de salida específica. La frecuencia de conmutación es suficientemente grande comparada con la frecuencia de modulación.

Al método mencionado anteriormente se le conoce como aproximación por la matriz de modulación [19] [20]. Este es un método directo desarrollado inicialmente por Alesina y Venturini, por lo que a la técnica también se le conoce como modulación Venturini ó AV (Por las iniciales de los nombres).

La matriz de modulación contiene los ciclos de trabajo de los interruptores en el CM, este método se profundiza en el capítulo 3, y es el que ha sido implementado experimentalmente.

En la Fig. 1.14 se muestra un ejemplo de las señales de control generadas por la modulación AV para una fase de salida, también se muestra el voltaje que se obtiene a la salida en dicha fase.

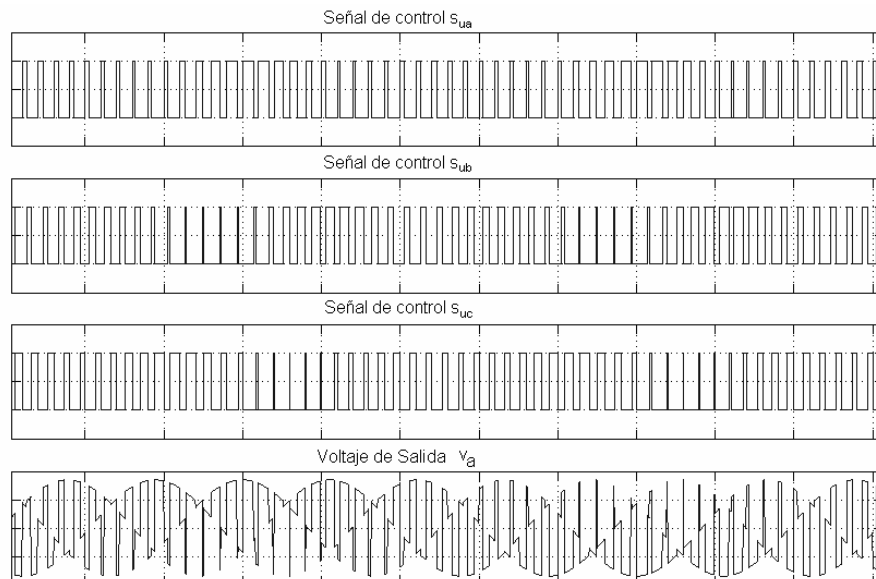


Figura 2.14 Patrones PWM, Modulación AV.

Otro de los métodos fundamentales que ha sido desarrollado para este convertidor es la aproximación utilizando Modulación Vectorial (Space Vector Modulation, SVM, por sus siglas en inglés) [13] [21]. La importancia de estos dos métodos es considerada por el fuerte soporte matemático que define a cada una, descrito en diferentes publicaciones fundamentales en el desarrollo de esta topología.

2.6 Consideraciones prácticas

Se debe considerar el uso de elementos adicionales para el correcto funcionamiento del CM. Entre las principales consideraciones, el CM requiere de filtros en la entrada para eliminar el rizo generado por la frecuencia de conmutación y circuitos de protección que eviten posibles sobre-voltajes que puedan dañar al CM.

2.6.1 Filtros de entrada

La principal función de los filtros de entrada que se muestran en la Fig. 1.1 es reducir los armónicos que se generan por la frecuencia de conmutación en la corriente de entrada. Estos filtros no necesitan almacenar energía y su tamaño es menor a frecuencias de conmutación altas. Existen configuraciones de filtros LC muy sencillas como la que se muestra en la Fig.2.15 y que resultan ser la mejor alternativa tomando en cuenta costo y tamaño [2].

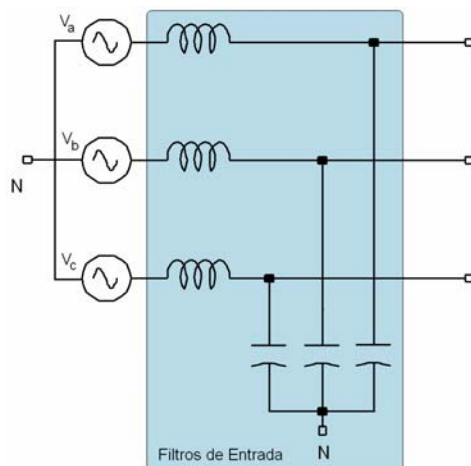


Figura 2.15 Filtros de entrada.

Otra función del filtro es evitar la generación de sobre-voltajes producidos por la rápida conmutación de las corrientes de entrada, al producir un corto circuito debido a que las conmutaciones no son instantáneas.

2.6.2 Circuito de protección

Una desventaja de este convertidor, es que al no existir una etapa intermedia de CD, la corriente en la carga inductiva (motor) no tiene una trayectoria pasiva de libre circulación, siempre lo hace a través de los interruptores y por las líneas de alimentación. Por esta razón no es posible simplemente apagar los interruptores, debido a que se pondría en circuito abierto a la carga al interrumpir repentinamente la corriente en la carga

inductiva, causando un transitorio de voltaje bastante elevado que dañaría al convertidor.

La energía almacenada en las inductancia del motor tiene, entonces, que ser liberada sin crear sobre-voltajes peligrosos.

La solución más común para evitar este tipo de sobre-voltajes es añadir un puente rectificador entre las líneas de entrada y salida del convertidor como se muestra en la Fig. 1.16 [22][23].

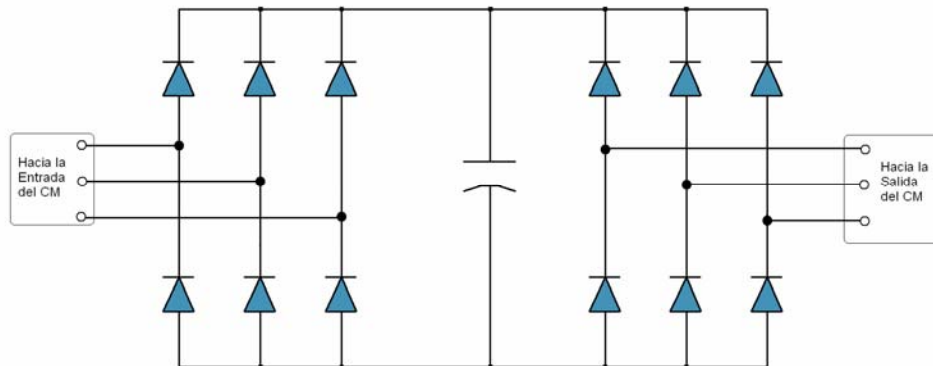


Figura 2.16 Circuito de Protección.

Este puente utiliza 12 diodos de respuesta rápida, lo que incrementa el número de dispositivos semiconductores y por lo tanto el costo. El capacitor utilizado en este circuito sirve para tomar la energía por la conmutación almacenada por la carga inductiva sin exceder el voltaje máximo que soportan los dispositivos, su valor es del orden de 130 μF [24], tamaño considerablemente inferior al utilizado en los convertidores convencionales.

2.7 Aplicaciones

La principal aplicación de este convertidor es en variadores de velocidad para motores de inducción, empleados en diversas aplicaciones industriales.

El Convertidor Matricial podría ser la topología ideal en el uso de futuras tecnologías tales como en sistemas que operen a altas temperatura, dado que estos dispositivos pueden operar hasta 300°C [10], la ausencia de voluminosos capacitores electrolíticos, como los utilizados en los inversores tradicionales, podría representar una ventaja considerable.

En este capítulo se han expuesto los principales aspectos y requerimientos del CM, que serán detallados en los siguientes capítulos. El método básico de modulación se ha implementado en el Capítulo 4, y los resultados se muestran en el Capítulo 5.