

CAPITULO 1

INTRODUCCIÓN A LOS CONVERTIDORES CD-CA

1.1 Introducción.

Los convertidores de corriente directa CD a corriente alterna CA se conocen como inversores. La función de un inversor es cambiar un voltaje de entrada en corriente directa CD a un voltaje simétrico de salida en corriente alterna CA con magnitud y frecuencia deseadas. Tanto el voltaje de entrada como la frecuencia de salida pueden ser fijos o variables. Si se modifica el voltaje de entrada de CD y la ganancia del inversor se mantiene constante, es posible obtener un voltaje variable de salida. Por otra parte, si el voltaje de entrada en CD es fijo y por lo tanto no es controlable, se puede obtener un voltaje de salida variable si se varía la ganancia del inversor. Esto por lo general se hace utilizando algún tipo de modulación, como es la modulación por ancho de pulso *PWM* que permite controlar tanto la ganancia como la frecuencia del inversor. La ganancia del inversor se puede definir como la relación entre el voltaje de salida CA y el voltaje de entrada CD.

En los inversores, las formas de onda del voltaje de salida deberían ser senoidales. Sin embargo, en los inversores reales no son senoidales y contienen ciertas armónicas. Para aplicaciones de baja y mediana potencia, se pueden aceptar los voltajes de onda cuadrada o casi cuadrada; para aplicaciones de alta potencia, son necesarias las formas de onda de baja distorsión. Dada la disponibilidad de los dispositivos semiconductores de potencia de alta velocidad, es posible reducir significativamente el contenido armónico del voltaje de salida mediante diversas técnicas de conmutación.

Los inversores pueden clasificarse básicamente en dos tipos:

- Inversores monofásicos.
- Inversores trifásicos.

Cada tipo de inversor puede utilizar dispositivos de conmutación con activación y desactivación controlada como lo son los transistores bipolares BJT, los transistores bipolares de compuerta aislada IGBT, los transistores de efecto de campo de metal-oxido MOSFET, los tiristores, entre otros.

Estos inversores utilizan por lo general señales de control moduladas por ancho de pulso *PWM*, para producir un voltaje de salida de corriente alterna. El voltaje y la corriente de entrada del inversor pueden ser fijos o variables, y puede ser obtenido del voltaje de línea o de un generador de voltaje de corriente alterna a través de un rectificador y un filtro. También, puede ser obtenido de una batería, una celda de combustible, o de un arreglo de celdas solares.

A un inversor se le llama Inversor de Fuente de Voltaje *VSI*, si el voltaje de entrada se mantiene constante y la corriente es variable; o Inversor de Fuente de Corriente *CSI* si la corriente de entrada se mantiene constante y el voltaje variable.

Los inversores son ampliamente usados y algunas de sus aplicaciones pueden ser las siguientes:

- Controladores de motores de corriente alterna.
- Fuentes de poder ininterrumpibles (UPS).
- Fuentes de Corriente alterna.
- Generadores o compensadores estáticos de potencia reactiva.

1.2 Inversores monofásicos

Los inversores se pueden clasificar dependiendo del número de fases de voltaje de corriente alterna que generen a la salida, cuando se genera una sola fase de voltaje a la salida se conoce como inversor monofásico, y en inversor trifásico cuando se generan tres fases de voltaje a la salida. Cada tipo de inversor puede subdividirse en inversores de tres niveles que sintetizan una señal de corriente alterna con tres niveles de voltaje de CD, y en inversores multinivel los cuales sintetizan la señal de voltaje de corriente alterna a la salida con más de tres niveles de voltaje de CD.

1.2.1 Inversor de medio puente

La configuración más simple de un inversor monofásico es el inversor de medio puente, figura 1.1.

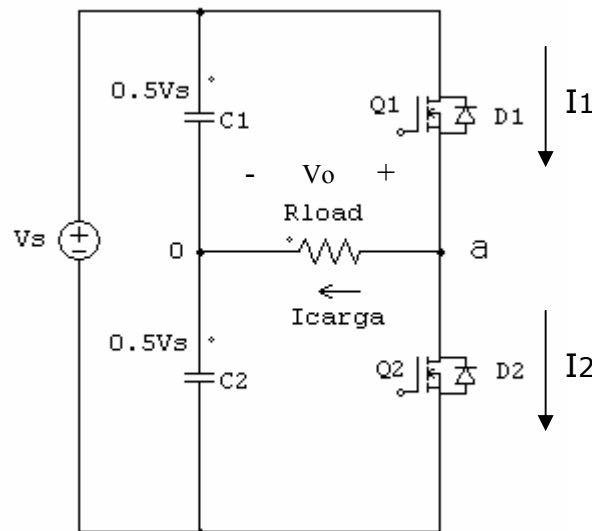


Figura 1.1 Inversor de Medio Puente

El circuito consiste en un par de dispositivos de conmutación Q_1 y Q_2 conectados en serie a través de una fuente de voltaje de corriente directa V_s , y una carga conectada entre el punto a y el punto central 0 en la unión de los dos capacitores C_1 y C_2 , los cuales dividen el voltaje de entrada V_s . Los

dispositivos Q_1 y Q_2 conmutan en forma alterna en un ángulo π para generar el voltaje de salida.

Mediante la figura 1.1 se puede explicar el principio de funcionamiento del inversor de medio puente. Inicialmente, se activa el transistor Q_1 durante un tiempo $T_0/2$, el voltaje instantáneo a través de la carga V_o será $V_s/2$. Después, el transistor Q_2 es activado por lo tanto Q_1 desactivado durante un tiempo $T_0/2$. El voltaje $-V_s/2$ aparece en la carga.

En la figura 1.2 se pueden observar las formas de onda del voltaje y la corriente en los dispositivos de conmutación de inversor de medio puente con carga resistiva. En realidad, una pequeña brecha (T_d) o banda muerta es conservada entre conmutaciones como se indica en la figura 1.2 para prevenir un corto circuito en la estructura.

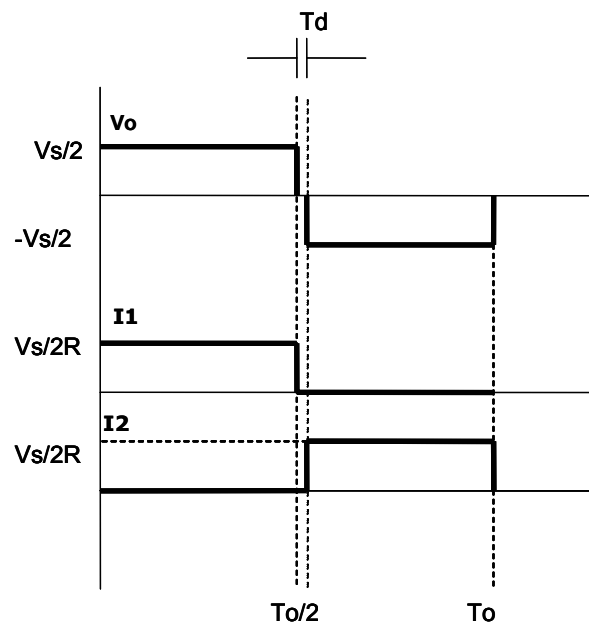


Figura 1.2. Formas de onda de un inversor de medio puente con carga resistiva.

El voltaje rms de salida V_o se puede encontrar a partir de:

$$V_o = \left(\frac{2}{T_0} \int_0^{T_0/2} \frac{V_s^2}{4} dt \right)^{1/2} = \frac{V_s}{2} \quad (1.1)$$

El voltaje instantáneo de salida v_o puede expresarse en una serie de Fourier como:

$$v_o = \sum_{n=1,3,5,\dots}^{\infty} \frac{2V_s}{n\pi} \text{Sen}(n\omega t) \quad (1.2)$$

$$v_o = 0 \text{ para } n = 2,4,\dots$$

Donde $\omega=2\pi f_0$ es la frecuencia del voltaje de salida en *radianes/segundo*. Para $n=1$, la ecuación proporciona el valor rms de la componente fundamental como:

$$V_1 = \frac{2V_s}{\sqrt{2\pi}} = 0.45V_s \quad (1.3)$$

1.2.2 Inversor de puente completo o puente H

Dos inversores de medio puente pueden ser conectados para formar un inversor de puente completo, o puente H, como el de la figura 1.3.

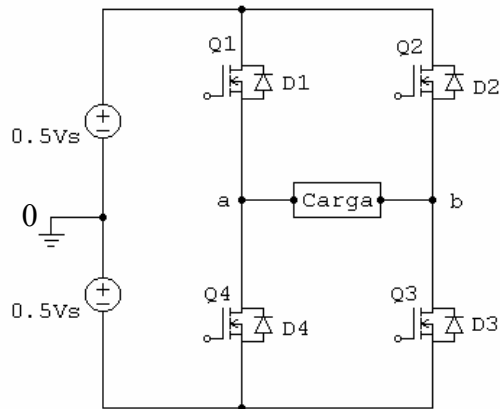


Figura 1.3. Inversor de Puente Completo

La ausencia de los capacitores es notoria y no se utilizan en este caso. La carga esta conectada entre los puntos a y b . En el modo de operación de señal de onda cuadrada, la cual es mostrada en la figura 1.4, el par de dispositivos Q_1Q_3 y Q_2Q_4 conmutan en forma alterna para generar la señal de voltaje de salida de onda cuadrada de amplitud V_s .

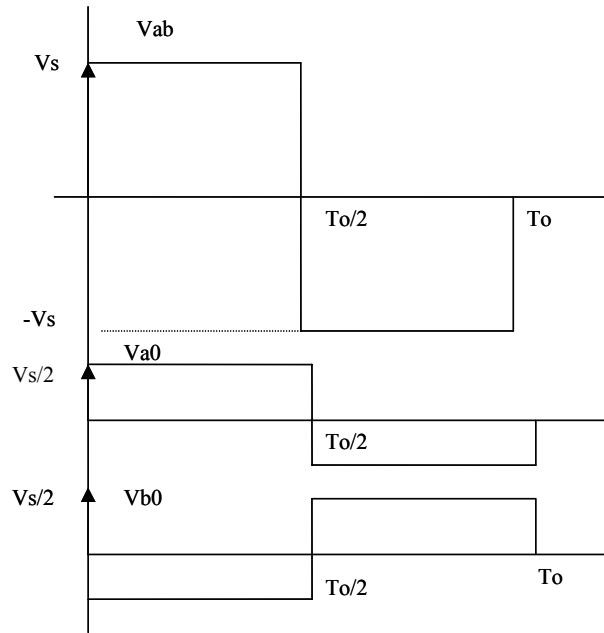


Figura 1.4. Formas de onda un inversor de puente completo con carga resistiva

Para esta estructura tanto los diodos y los MOSFET están dimensionados para soportar el voltaje de la fuente V_s cuando estos se encuentran polarizados inversamente y en corte respectivamente. La corriente pico que deberán conducir los MOSFET es I_m y la corriente que conducirán los diodos es $I_m \text{ sen } \varphi$ [1].

El voltaje rms de salida se puede determinar a partir de:

$$V_o = \left(\frac{2}{T_o} \int_0^{T_o/2} V_s^2 dt \right)^{1/2} = V_s \quad (1.4)$$

El voltaje instantáneo de salida esta determinado por:

$$v_o = \sum_{n=1,3,5,\dots}^{\alpha} \frac{4V_s}{n\pi} \text{Sen}(n\omega t) \quad (1.5)$$

Y para $n=1$, la ecuación proporciona el valor rms de la componente fundamental como:

$$V_1 = \frac{4V_s}{\sqrt{2\pi}} = 0.9V_s \quad (1.6)$$

1.2.3 Inversor de celda de tres polos

Cuando se trata de estudiar el funcionamiento de un Inversor de Fuente de Voltaje (VSI) se puede iniciar éste con un simple Inversor de Celda de Tres Polos, el cual se muestra en su forma simplificada en la figura 1.5. Este inversor es usado para ilustrar que una fuente de corriente I , se puede conectar a diferentes potenciales.

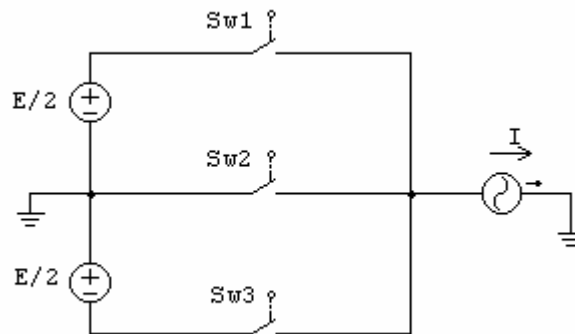


Figura 1.5. Inversor de Celda de Tres Polos (forma simplificada).

En el caso simplificado del inversor de celda de tres polos (figura 1.5), el interruptor superior $Sw1$ debe bloquear un voltaje igual a E cuando el interruptor inferior $Sw3$ esta conduciendo. En el caso similar, el interruptor inferior $Sw3$ debe bloquear un voltaje igual a $-E$ cuando el interruptor superior $Sw1$ esta conduciendo.

El interruptor central $Sw2$, el cual conduce tanto corriente positiva o negativa bloquea un voltaje igual a $+E/2$ o $-E/2$ según sea el estado de conmutación. Debido a que los dispositivos de conmutación son unidireccionales, por lo cual solo pueden conducir corriente en una sola dirección, el interruptor central está formado por dos dispositivos de conmutación $Q1$ y $Q2$ conectados en antiserie. De esta manera se forma un

interruptor bidireccional o de cuatro cuadrantes (4Q) como el que se muestra en la figura 1.6.

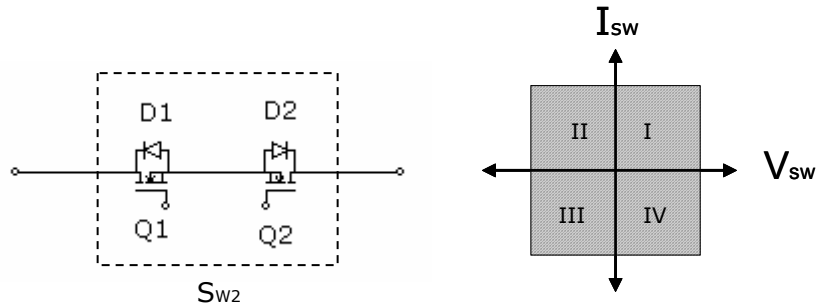


Figura 1.6. Interruptor Bidireccional.

Con respecto al disparo de los dispositivos de conmutación. Las señales de control de los dispositivos de conmutación conectados en serie puede ser la misma. Por lo tanto solo tres señales de control para el inversor de tres polos, deben ser generadas en cada tiempo. Por lo menos una de estas señales debe de encender un dispositivo de conmutación para permitir que la corriente fluya a través de la fuente de corriente I .

El estudio de la corriente y voltajes aplicados a los interruptores muestra que este principio puede ser implementado con seis dispositivos de conmutación capaces de bloquear un voltaje igual a $E/2$ colocados como se muestra en la figura 1.7 [2].

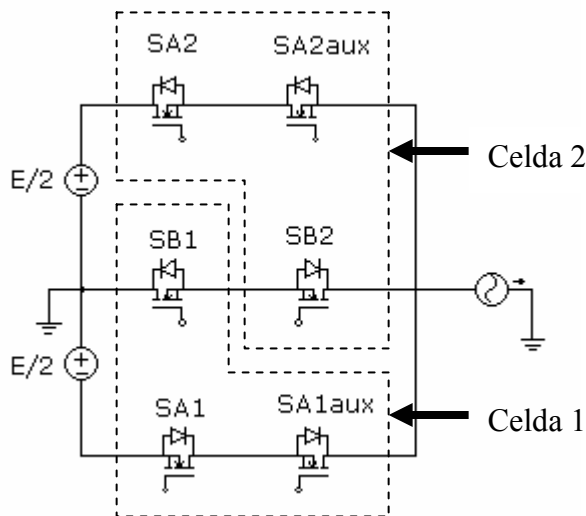


Figura 1.7. Implementación del Inversor de Celda de Tres Polos.

El inversor de celda de tres polos esta formado por dos celdas de conmutación, figura 1.7, las cuales conmutan en forma alterna para generar un voltaje de corriente alterna a la salida. Cada una de las celdas de conmutación básicamente están formadas por dos interruptores S_A y S_B , los cuales tienen estados opuestos de conmutación. Para el dimensionamiento de los dispositivos de conmutación se ha agregado un dispositivo auxiliar a cada una de las celdas. Por lo tanto, cuando la celda 2 esta conduciendo ($S_{A2}'on$, $S_{B2}'off$, $S_{A1}'off$, $S_{B1}'on$) la celda 1 esta apagada. El voltaje de salida es igual a $E/2$, y cuando la celda 1 esta conduciendo el voltaje a salida es $-E/2$. Una señal con tres niveles de voltaje se obtiene a la salida ($E/2, 0, -E/2$), figura 1.8.

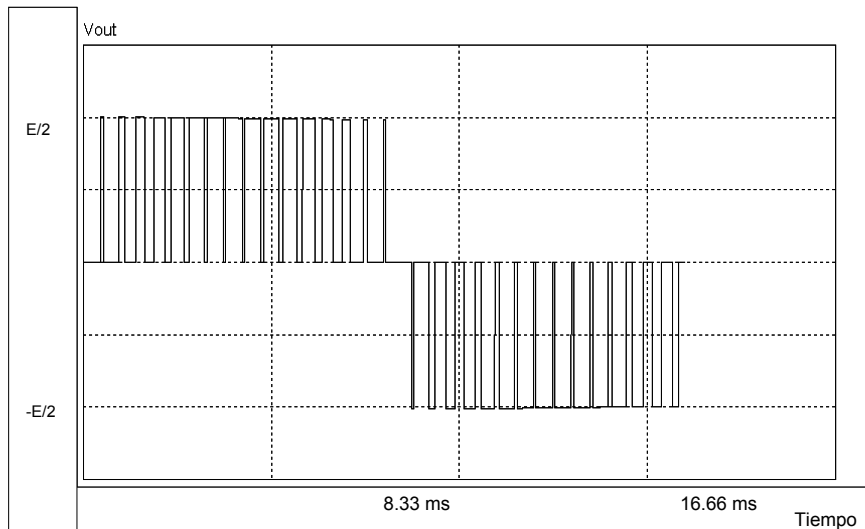


Figura 1.8. Voltaje de salida de un inversor de celda de tres polos.

1.3 Convertidores multinivel

Al realizar un análisis más detallado a los inversores de medio y de puente completo, es notorio que al incrementarse el voltaje de entrada de CD el voltaje que deben bloquear los dispositivos de conmutación aumenta. Por lo tanto, dispositivos de conmutación con mayores capacidades son necesarios para aplicaciones de alto voltaje. Existen ciertas limitaciones tecnológicas que

restringen el diseño de inversores de mediana (Kw.) y alta potencia (MW) para estas estructuras básicas. Además presentan una baja calidad espectral debido a la forma de onda cuadrada o casi-cuadrada del voltaje de salida.

Para solucionar dichos problemas existen varias topologías clasificadas como multinivel o convertidores multinivel. Su finalidad es sintetizar una señal de CA a través de varios niveles de voltaje de CD obtenidos normalmente con capacitores. Por lo tanto, al incrementarse los niveles de voltaje se puede generar una señal escalonada la cual se aproxima a una señal senoidal con una mínima distorsión armónica.

También, el incremento en el número de niveles de voltaje significa que mayores voltajes de entrada pueden ser utilizados a través de la utilización de dispositivos de conmutación conectados en serie. Desafortunadamente, el número de niveles de voltaje de salida está limitado por problemas de desbalance del voltaje en algunas topologías.

Dentro de las topologías de convertidores multinivel más conocidas se encuentran:

- Convertidor Multinivel de Diodo Anclado
- Convertidor Multinivel con Capacitores Flotantes
- Inversor de Puentes H cascados
- Convertidores multicelda
- Convertidores multicelda apilables.

1.3.1 Convertidor Multinivel de Diodo Anclado.

Un convertidor multinivel de diodo anclado de m -niveles consiste de $m-1$ capacitores en el bus de CD y produce m niveles de voltaje de salida por fase.

En la figura 1.9 se muestra un convertidor multinivel de diodo anclado de cinco niveles en el cual el bus de CD esta formado por cuatro capacitores C_1 , C_2 , C_3 , y C_4 .

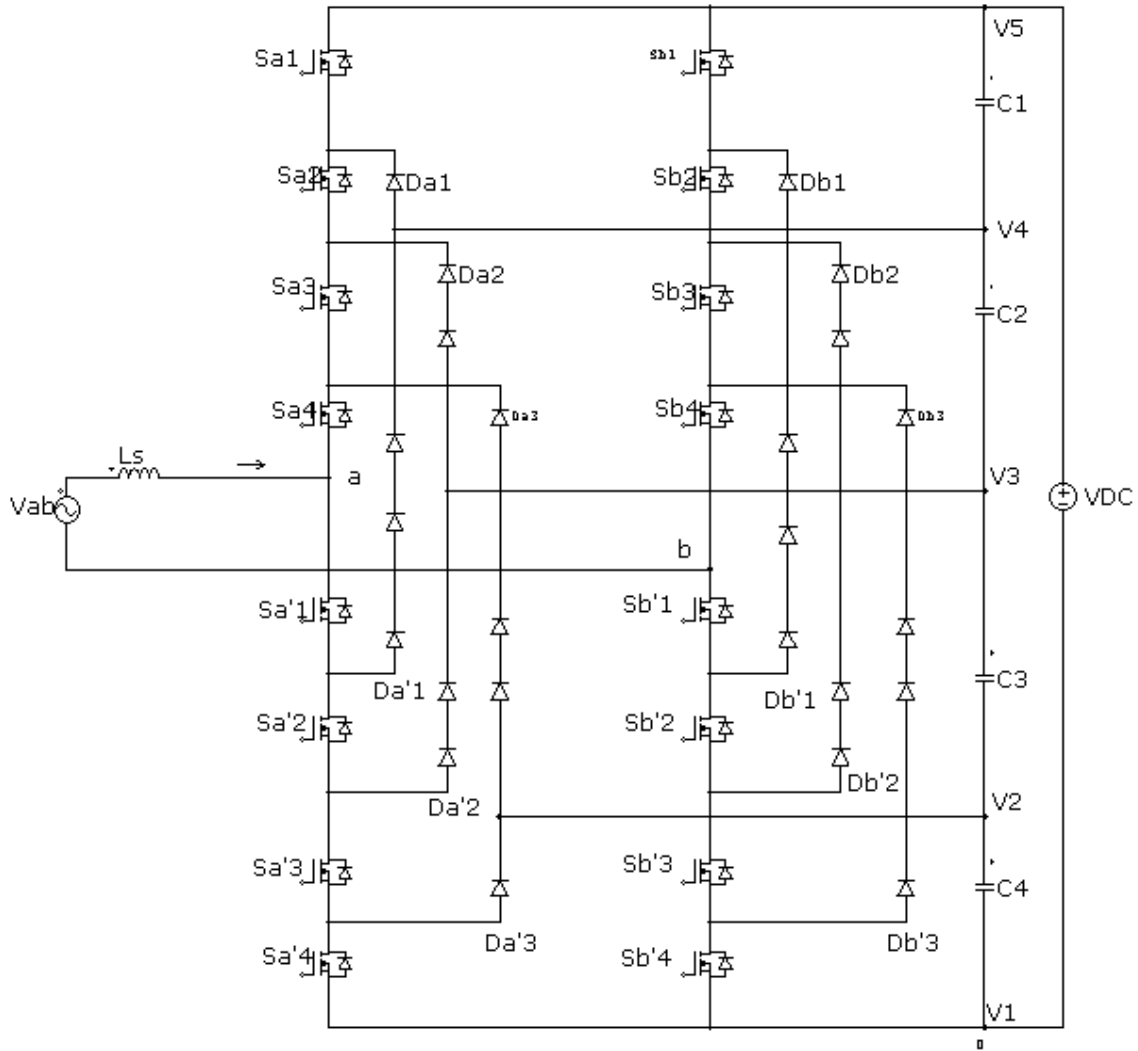


Figura 1.9. Convertidor multinivel de diodo anclado de cinco niveles

Para el bus de voltaje de CD, el voltaje a través de cada capacitor es $V_{CD}/4$, y el voltaje que debe bloquear cada dispositivo de conmutación esta limitado por el nivel de voltaje de un capacitor, $V_{CD}/4$, a través de los diodos anclados.

Para explicar más a fondo como m -niveles de voltaje pueden ser obtenidos, se puede analizar la salida de voltaje en el punto a , y tomando como punto de referencia la terminal negativa del bus de CD, 0 .

Para el convertidor de cinco niveles de la figura 1.9, existen cinco combinaciones de conmutación con las cuales se pueden obtener cinco niveles de voltaje de fase a la salida a través de a y 0 .

1. Para el nivel de voltaje $V_{a0} = V_{CD}$, todos los dispositivos de conmutación de la parte superior (S_{a1} hasta S_{a4}) deberán conducir.
2. Para el nivel de voltaje $V_{a0} = 3V_{DC}/4$, deberán conducir los tres dispositivos de conmutación S_{a2} , S_{a3} , y S_{a4} , y un dispositivo de conmutación de la parte inferior $S_{a'1}$.
3. Para el nivel de voltaje $V_{a0} = V_{CD}/2$, los dispositivos de conmutación S_{a3} y S_{a4} deberán conducir al igual que dos dispositivos de conmutación de la parte inferior $S_{a'1}$ y $S_{a'2}$.
4. Para el nivel de voltaje $V_{a0} = V_{CD}/4$, el dispositivo de conmutación S_{a4} y los tres dispositivos de conmutación $S_{a'1}$, $S_{a'2}$, $S_{a'3}$ deberán de conducir.
5. Para el nivel de voltaje $V_{a0} = 0$, deberán de conducir todos los dispositivos de conmutación de la parte inferior que abarca de $S_{a'1}$ hasta $S_{a'4}$.

En la tabla 1.1 se enlistan los diferentes niveles de voltaje que se pueden obtener a la salida V_{a0} del convertidor y su correspondiente estado de conmutación.

VOLTAJE DE SALIDA V_{a0}	ESTADO DE CONMUTACIÓN							
	S_{a1}	S_{a2}	S_{a3}	S_{a4}	$S_{a'1}$	$S_{a'2}$	$S_{a'3}$	$S_{a'4}$
$V_5 = V_{CD}$	1	1	1	1	0	0	0	0
$V_4 = 3V_{CD}/4$	0	1	1	1	1	0	0	0
$V_3 = V_{CD}/2$	0	0	1	1	1	1	0	0
$V_2 = V_{CD}/4$	0	0	0	1	1	1	1	0
$V_1 = 0$	0	0	0	0	1	1	1	1

Tabla 1.1. Niveles de voltaje de un convertidor de diodo anclado de cinco niveles y su respectivo estados de conmutación.

El estado de conmutación 1 indica que el dispositivo de conmutación está encendido, por lo tanto conduciendo. El estado 0 significa que el dispositivo de conmutación está apagado. Existen cuatro pares de dispositivos de conmutación complementarios en cada fase. Estos pares de dispositivos de conmutación complementarios están definidos por el estado de conducción de cada uno de los pares de dispositivos de conmutación y en el cual se excluye el otro cuando uno está encendido. En pocas palabras cada par de dispositivos de conmutación tienen estados de conducción opuestos. Estos pares, para el caso de la fase a , están formados por $(S_{a1}, S_{a'1})$, $(S_{a2}, S_{a'2})$, $(S_{a3}, S_{a'3})$, y $(S_{a4}, S_{a'4})$.

En la figura 1.10 se puede observar la forma de onda del voltaje de fase y de línea de salida de un convertidor de cinco niveles. El voltaje de fase consiste del voltaje de fase positiva a y del voltaje de fase negativa b . Cada voltaje de fase forma medio ciclo de la señal senoidal. El resultado del voltaje de línea es una señal con nueve niveles. Lo anterior implica que un convertidor de m -niveles de voltaje de fase de salida tiene $2m-1$ niveles de voltaje de línea V_{ab} de salida.

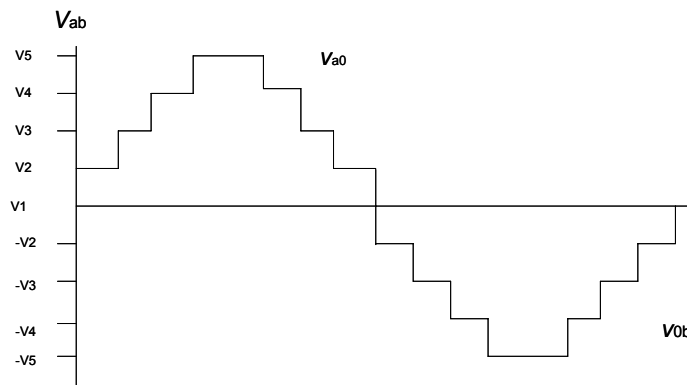


Figura 1.10. Voltajes de fase (V_{a0} y V_{0b}) y Voltaje de línea (V_{ab}) de un convertidor multinivel de diodo anclado de 5 niveles.

A continuación se enlistan algunas ventajas y desventajas del convertidor multinivel de diodo anclado [3]:

Ventajas:

- Cuando el número de niveles es alto, el contenido armónico será suficientemente bajo y se evitará el uso de filtros.
- La eficiencia es alta.
- El flujo de potencia reactiva puede ser controlado.

Desventajas:

- Cuando el número de niveles es alto es necesario el uso de una gran cantidad de diodos.
- Dificultad al realizar el control de potencia real para un solo convertidor.

1.3.2 Convertidor Multinivel con Capacitores Flotantes

La figura 1.11 muestra la estructura de un convertidor multinivel de puente completo con capacitores flotantes basado en un convertidor de cinco niveles.

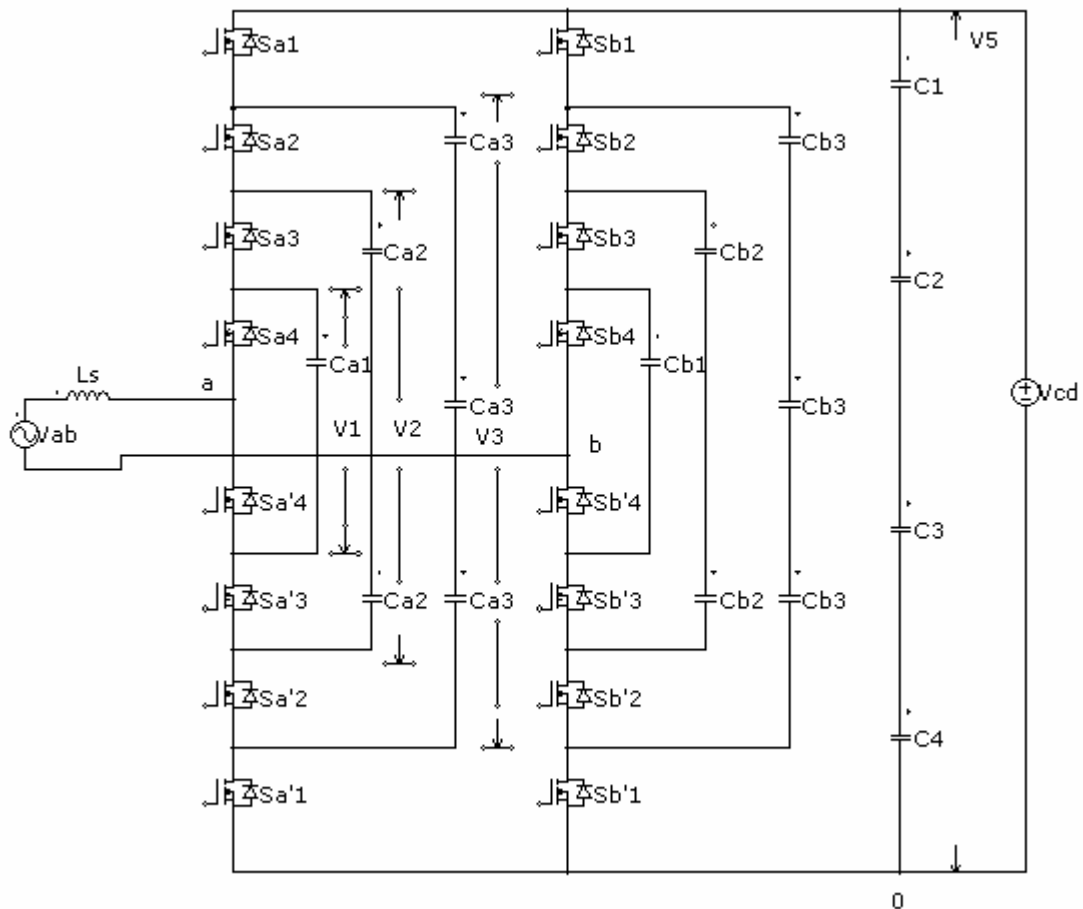


Figura 1.11. Convertidor multinivel monofásico con capacitores flotantes de cinco niveles.

Asumiendo que cada capacitor tiene el mismo rango de voltaje, la conexión en serie de los capacitores en la figura 1.11 es para indicar el nivel de voltaje entre los puntos anclados. El balance de los tres capacitores de la rama de fase a , C_{a1} , C_{a2} , y C_{a3} es independiente de la rama de fase b . También, las dos ramas de fase a y b comparten los mismos capacitores (C_1 - C_4) del bus de CD de entrada.

El nivel de voltaje definido en el convertidor multinivel con capacitores flotantes es similar al del convertidor multinivel de diodo anclado. El voltaje de fase de un convertidor de m niveles esta formado por m niveles incluyendo el nivel de referencia o cero volts, y el voltaje de línea por $2m-1$ niveles. Tomando en cuenta que cada capacitor tiene el mismo rango de voltaje al igual que los dispositivos de conmutación, el bus de CD necesita $m-1$ capacitores para un convertidor de m niveles.

Para realizar el análisis del voltaje en un convertidor multinivel con capacitores flotantes se puede utilizar la figura 1.11 como referencia, y tomando el voltaje de salida de la rama de fase a con respecto a la terminal negativa del bus de CD, V_{a0} , el voltaje V_{a0} se puede sintetizar a través de las siguientes combinaciones.

Para el nivel de voltaje $V_{a0} = V_{cd}$, se encienden los dispositivos de conmutación S_{a1} hasta S_{a4} .

Para el nivel de voltaje $V_{a0} = 3V_{CD}/4$, se tienen cuatro combinaciones posibles:

1. $S_{a1}, S_{a2}, S_{a3}, S_{a'4}$ ($V_{a0} = V_{CD} - V_{CD}/4$).
2. $S_{a2}, S_{a3}, S_{a4}, S_{a'1}$ ($V_{a0} = 3V_{CD}/4$).
3. $S_{a1}, S_{a3}, S_{a4}, S_{a'2}$ ($V_{a0} = V_{CD} - 3V_{CD}/4 + V_{CD}/2$).
4. $S_{a1}, S_{a2}, S_{a4}, S_{a'3}$ ($V_{a0} = V_{CD} - V_{CD}/2 + V_{CD}/4$).

Para el nivel de voltaje $V_{a0} = V_{CD}/2$, se tienen seis combinaciones posibles:

1. $S_{a1}, S_{a2}, S_{a'3}, S_{a'4}$ ($V_{a0} = V_{DC} - V_{DC}/2$).

2. $S_{a3}, S_{a4}, S_{a'1}, S_{a'2}$ ($V_{a0} = V_{DC}/2$).
3. $S_{a1}, S_{a3}, S_{a'2}, S_{a'4}$ ($V_{a0} = V_{DC} - 3V_{DC}/4 + V_{DC}/2 - V_{DC}/4$).
4. $S_{a1}, S_{a4}, S_{a'2}, S_{a'3}$ ($V_{a0} = V_{DC} - 3V_{DC}/4 + V_{DC}/4$).
5. $S_{a2}, S_{a4}, S_{a'1}, S_{a'3}$ ($V_{a0} = 3V_{DC}/4 - V_{DC}/2 + V_{DC}/4$).
6. $S_{a2}, S_{a3}, S_{a'1}, S_{a'4}$ ($V_{a0} = 3V_{DC}/4 - V_{DC}/4$).

Para el nivel de voltaje $V_{a0} = V_{CD}/4$, se tienen cuatro combinaciones posibles:

1. $S_{a1}, S_{a'2}, S_{a'3}, S_{a'4}$ ($V_{a0} = V_{DC} - 3V_{DC}/4$)
2. $S_{a4}, S_{a'1}, S_{a'2}, S_{a'3}$ ($V_{a0} = V_{DC}/4$)
3. $S_{a3}, S_{a'1}, S_{a'2}, S_{a'4}$ ($V_{a0} = V_{DC}/2 - V_{DC}/4$)
4. $S_{a2}, S_{a'1}, S_{a'3}, S_{a'4}$ ($V_{a0} = 3V_{DC}/4 - V_{DC}/2$)

Para el nivel de voltaje $V_{a0} = 0$, se encienden los dispositivos de conmutación de $S_{a'1}$ hasta $S_{a'4}$.

La tabla 1.2 enlista una posible combinación de los niveles de voltaje y su correspondiente estado de conmutación. Utilizando tales estados de conmutación, cada dispositivo necesita ser conmutado solamente una vez por ciclo, acorde con el tiempo de encendido de cada dispositivo listado en la tabla 1.2.

VOLTAJE DE SALIDA V_{a0}	ESTADO DE CONMUTACIÓN							
	S_{a1}	S_{a2}	S_{a3}	S_{a4}	$S_{a'4}$	$S_{a'3}$	$S_{a'2}$	$S_{a'1}$
$V_5 = V_{CD}$	1	1	1	1	0	0	0	0
$V_4 = 3V_{CD}/4$	1	1	1	0	1	0	0	0
$V_3 = V_{CD}/2$	1	1	0	0	1	1	0	0
$V_2 = V_{CD}/4$	1	0	0	1	1	1	1	0
$V_1 = 0$	0	0	0	0	1	1	1	1

Tabla 1.2. Posible combinación de estados de conmutación para un convertidor multinivel con capacitores flotantes de cinco niveles.

El convertidor multinivel con capacitores flotantes presenta al igual que el convertidor multinivel de diodo anclado el problema del rendimiento de los dispositivos de conmutación. Presentan también, la dificultad de balancear el voltaje en la conversión de potencia real, siendo éste el mayor problema puesto que requiere de un gran número de capacitores de almacenamiento. En un convertidor multinivel de m -niveles se requiere en total $(m-1)*(m-2)/2$ capacitores flotantes por fase. Además de $(m-1)$ capacitores que forman el bus de CD.

A continuación se enlistan algunas ventajas y desventajas del convertidor multinivel con capacitores flotantes [3]:

Ventajas.

- Cuando el número de niveles es suficientemente alto, el contenido armónico será bajo y se evitará el uso de filtros.
- El flujo de potencia real y reactiva puede ser controlado, haciendo posible que este convertidor sea factible para el uso en transmisión de alto voltaje.

Desventajas:

- Excesivo número de capacitores cuando el número de niveles es alto, y el costo del convertidor se ve elevado.
- El control de inversor es complicado.

1.3.3 Inversor multinivel con puentes H cascados.

El inversor multinivel cascado consiste en una serie de inversores de puente H. La función general de un inversor multinivel de este tipo es del sintetizar un voltaje deseado a través de varias fuentes de Voltaje de CD separadas (*SDCSs*: Separate Direct Current Sources's). Estas fuentes pueden ser obtenidas a través de baterías o celdas de combustible. La figura 1.12 muestra la estructura de un inversor cascado con fuentes de voltaje de CD separadas.

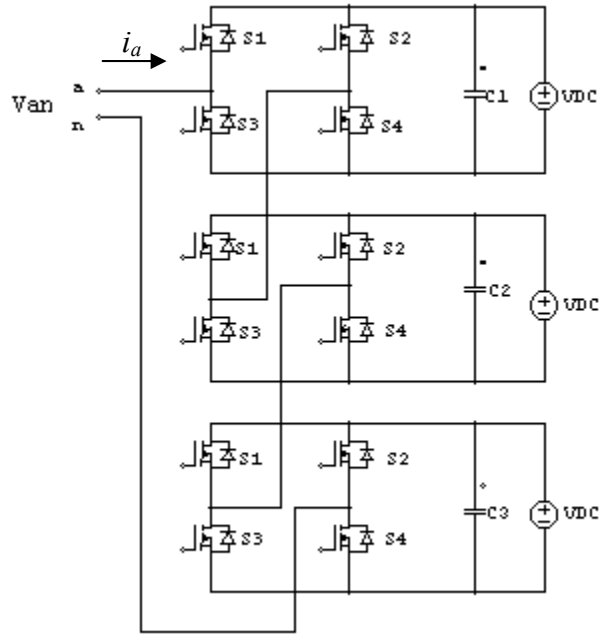


Figura 1.12. Inversor multinivel con puentes H cascados.

Cada SDCS está conectada a un inversor de puente H. Cada inversor puede generar tres niveles de voltaje de salida ($+V_{DC}$, cero, y $-V_{DC}$). Cada nivel del inversor está formado por cuatro interruptores S1, S2, S3, S4. En este inversor multinivel se puede obtener una distorsión armónica baja al controlar el ángulo de conducción en cada uno de los inversores de puente completo [3].

Con la corriente de fase i_a , y retardando el voltaje de fase en 90° , la carga promedio de cada capacitor será igual a cero en cada ciclo de línea. Por lo tanto, el voltaje de cada uno de los capacitores estará balanceado [3], [4]. Por otra parte, el número de niveles de voltaje a la salida en un inversor de este tipo está definido por $m = 2s + 1$, donde m es el número de niveles de voltaje a la salida, y s es el número de fuentes de DC. Por ejemplo, un inversor de este tipo de 9 niveles tiene cuatro SDCS's y cuatro inversores de puente H. Para la conversión de potencia, este tipo de inversor necesita fuentes de DC separadas. La estructura de las fuentes de voltaje de DC separadas es factible cuando se utilizan fuentes de energía como celdas de combustible, celdas fotovoltaicas. Por citar ventaja de este convertidor el número de componentes

que utiliza es menor a comparación de los convertidores multinivel mencionados con anterioridad.

1.3.4 Convertidores multicelda.

El convertidor multicelda se encuentra clasificado como inversor de fuente de voltaje (*VSI*) monofásico multinivel. El circuito general de un convertidor multicelda es mostrado en la figura 1.13.

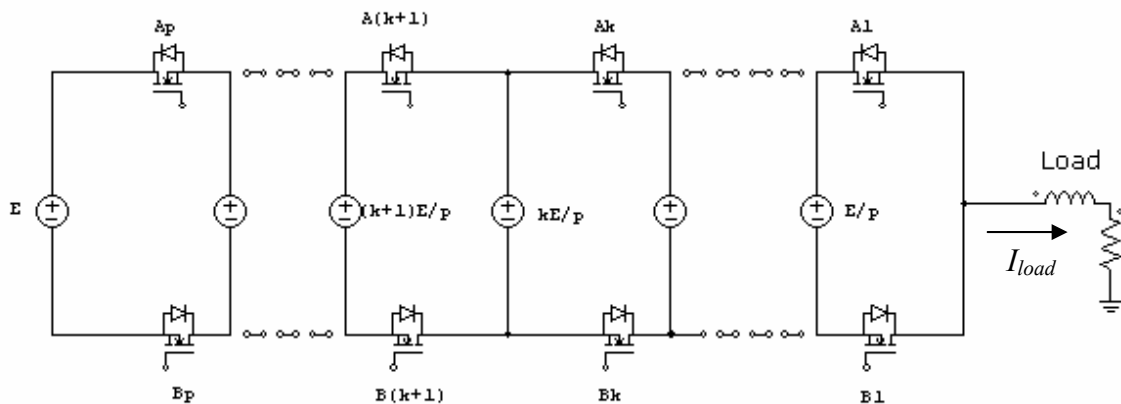


Figura 1.13. Circuito General de un Convertidor Multicelda.

El convertidor multicelda esta compuesto básicamente por p pares de interruptores de tres cuadrantes separados por $p-1$ fuentes flotantes de voltaje, siendo el voltaje de entrada igual a E . A cada par de interruptores referenciados por (A_k, B_k) con $k \in [1 \dots p]$, que forman al convertidor se les conoce como celda básica de conmutación la cual es mostrada en la figura 1.14. Dichos interruptores pueden ser implementados con algún tipo de dispositivo de conmutación que para el caso de estudio están representados por MOSFET's.

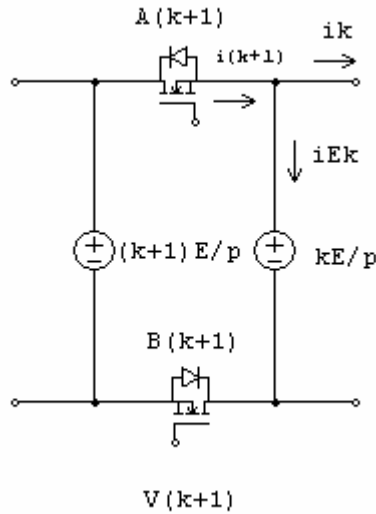


Figura 1.14. Celda Básica de Conmutación.

Para el funcionamiento correcto de la celda de la figura 1.14, los dispositivos de conmutación que forman la celda de conmutación nunca deberán de conducir simultáneamente porque pondrían en corto circuito las fuentes flotantes de voltaje kE/p y $(k+1)E/p$. Y nunca deberán de bloquear al mismo tiempo puesto que se tendría un circuito abierto, provocando que la fuente de voltaje deje de suministrar corriente a la carga I_{load} . Por lo tanto los dispositivos de conmutación que forman la celda tienen estados opuestos de conmutación.

El voltaje que debe bloquear cada dispositivo de cada una de las celdas que forman al convertidor multicelda es el mismo. Este voltaje es obtenido por medio de la aplicación de Ley de voltajes de Kirchhoff a cada una de las celdas de conmutación, que para el caso de la figura 1.14 resulta:

$$(k+1)\frac{E}{p} - k\frac{E}{p} = \frac{E}{p} \quad (1.7)$$

Donde k representa la posición física de las fuentes flotantes dentro de la estructura. $k=1$ representa la fuente flotante de la extrema derecha siendo p el número de celdas de conmutación que forman la estructura.

Como una celda de conmutación es funcional si tiene fuentes flotantes de voltaje que no entreguen potencia promedio, éstas están implementadas con capacitores. En un capacitor la corriente promedio en cada periodo de conmutación es cero, y que además permiten la distribución del voltaje en los dispositivos de conmutación. Por lo tanto, cada fuente flotante de voltaje kE/p es sustituida por un capacitor flotante C_k . Esto debido a la suposición de que la corriente de la fuente I_{load} es constante en cada periodo de conmutación, por lo tanto la corriente promedio i_{EK} puede ser cancelada por la imposición del mismo ciclo de trabajo en los interruptores A_{k+1} y A_k permitiendo la distribución correcta de voltaje [5]. El mayor avance de esta estructura, son los capacitores flotantes que permite la distribución del voltaje a través de los dispositivos de conmutación.

El voltaje aplicado a los dispositivos de cualquier celda de conmutación es impuesto por el voltaje de las fuentes V_{ck} y V_{ck+1} . La suma del voltaje instantáneo a través de todos dispositivos de conmutación de la estructura es siempre igual al voltaje de entrada E , tomando en cuenta que siempre la mitad de los dispositivos de conmutación están en conducción. Consecuentemente, el voltaje de balance a través de los dispositivos de conmutación esta dado por [6]:

$$(V_{Ak})_{off} = (V_{Bk})_{off} = \frac{E}{p} \quad (1.8)$$

Donde $(V_{Ak})_{off}$ es el voltaje que debe bloquear el dispositivo de conmutación (A_k), cuando se encuentra apagado (*off*).

También, el balance del voltaje en los capacitores se obtiene cuando el ciclo de trabajo de la señal de control de cada una de las celdas de conmutación del convertidor multicelda es el mismo pero defasadas $2\pi/p$ donde p representa el número de celdas que forman a la estructura [6].

Una vez descritas las características básicas de un convertidor multicelda, es importante mencionar la técnica de control del mismo. Para describir la estructura de control de un convertidor multicelda, se puede tomar como referencia el convertidor multicelda de la figura 1.15, el cual está formado por tres celdas de conmutación y por dos capacitores flotantes.

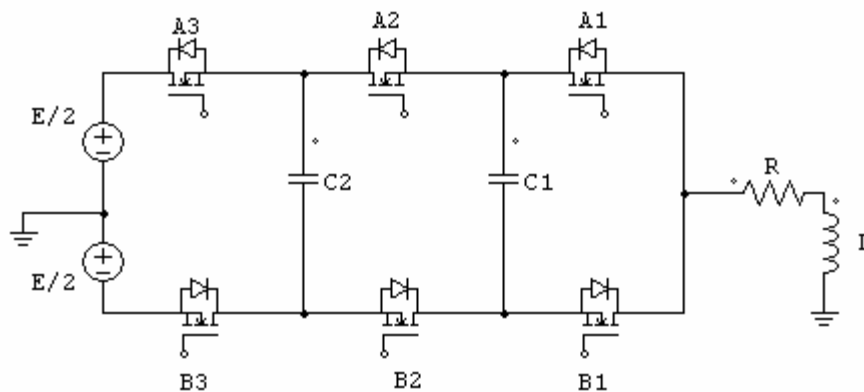


Figura 1.15. Convertidor multicelda de tres niveles.

La estrategia de control aplicada para un convertidor multicelda puede estar basado en modulación por ancho de pulso *PWM*, el cual en su estructura más simple está implementado por un modulador analógico, como el mostrado en la figura 1.16. Este está el cual esta formado por tres comparadores de voltaje, por una señal de modulación. Por tres señales triangulares que forman las señales modulantes y por tres inversores de voltaje.

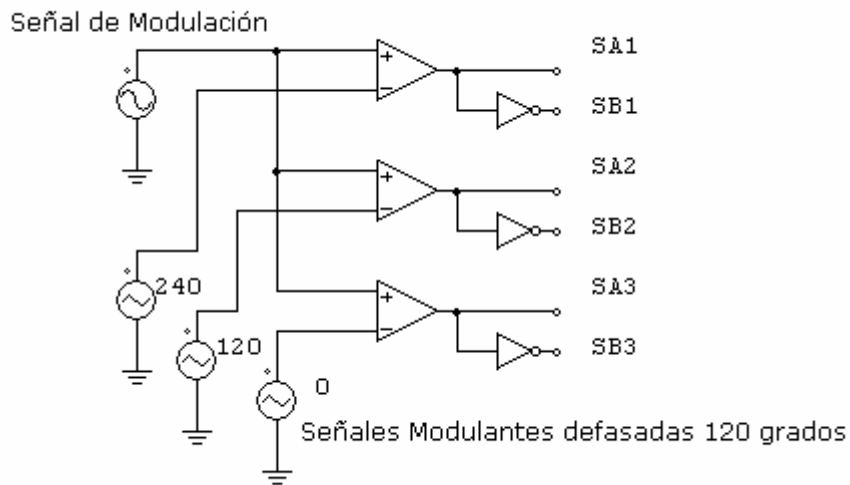


Figura 1.16. Ejemplo de un modulador analógico para un convertidor multicelda de tres celdas de conmutación (S_{Xy} es la señal de control del dispositivo de conmutación X_y).

La presencia de una sola señal de modulación garantiza que exista el mismo ciclo de trabajo en todas las celdas. Las señales modulantes, desfasadas $2\pi/3$ entre sí, tienen la función de provocar un desfase en las señales de control [5].

Usando el modulador de la figura 1.16 en el convertidor de la figura 1.15, se puede obtener una señal de cuatro niveles de voltaje a tres veces la frecuencia de conmutación, figura 1.17.

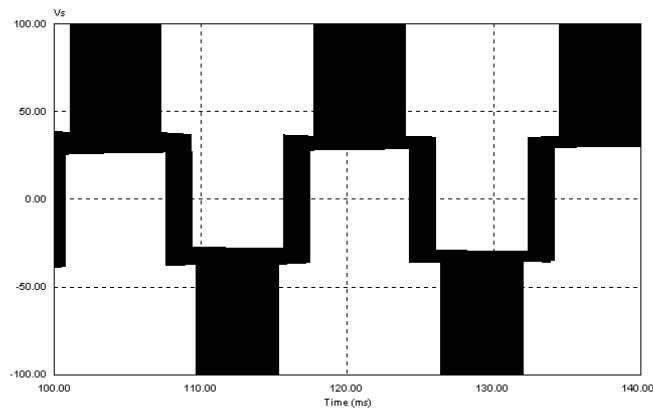


Figura 1.17. Forma de onda del voltaje de salida de un convertidor multicelda de tres niveles.

Una vez descrito el funcionamiento del convertidor multicelda, el cual está formado por p celdas de conmutación se pueden marcar los puntos más importantes de esta topología [5]:

- Si las celdas están controladas con el mismo ciclo de trabajo, y la frecuencia de la fuente de corriente es menor que la frecuencia de conmutación, las fuentes de voltaje flotante pueden ser simples capacitores.
- Si las señales de control de cada celda de conmutación esta defasada por $2\pi/p$, la señal de salida puede tomar $p+1$ niveles de voltaje como son: $0; E/p; 2E/p; \dots; E$, el espectro del voltaje y la corriente de salida tendrán su primer armónico en $p*f_{sw}$, donde f_{sw} es la frecuencia de conmutación y p es el número de celdas de conmutación de las cuales este formado el convertidor.

1.4 Inversores básicos y multinivel.

En este capítulo se presentaron las características fundamentales de los inversores más comunes como lo son los de medio puente y de puente completo, así como también algunas de sus ventajas y desventajas. Se presentaron las características básicas de algunos convertidores multinivel, los cuales surgen como una solución para aplicaciones de alta y mediana potencia. Estos presentan características especiales como baja distorsión del voltaje de salida, la disminución en el estrés de los componentes, y en algunos casos la eliminación del filtrado a la salida.

Reciben especial atención los convertidores multicelda porque son la base de los convertidores que son tratados en este trabajo de tesis: los

Convertidores multicelda apilables. La asociación de celdas de conmutación provoca que el estrés en voltaje a través de los interruptores disminuya. Si esto ocurre con la simple asociación en serie, porque no pensar en una más compleja. Los Convertidores multicelda apilables fueron desarrollados pensando en mejorar las características y desempeño de los convertidores multicelda.