

# Capítulo 1

## Convertidores CD/CA multinivel

### 1.1 Introducción

Los convertidores multinivel se han consolidado en los últimos años como una opción competitiva para la conversión de energía en el rango de media-alta potencia, tanto desde el punto de vista técnico como el económico [1]. Dicha competitividad se logra gracias a su capacidad para generar grandes cantidades de voltaje a partir de topologías integradas con dispositivos semiconductores económicos y de uso comercial; esto con el objetivo final de simplificar el dimensionamiento y precio de la infraestructura de la cual forman parte.

Los convertidores multinivel usan técnicas muy variadas para la conversión de energía, desde topologías básicas como el inversor de medio puente y puente completo, hasta convertidores con conexión en cascada de puentes H, de diodo anclado, de capacitores

flotantes y multicelda. El uso de estos convertidores aplicado a diferentes áreas dentro de la industria ha sido de vital importancia, tal es el caso fuentes de potencia (UPS's, calentadores por inducción, soldadoras-cortadoras, fuente de voltaje conmutada, etc.) y drivers para motores (activación de robots, aire acondicionado, elevadores, servos de CA, etc.)

## 1.2 Topologías de los convertidores multinivel

Este capítulo hace análisis de las topologías multinivel más comunes en el área, mostrando características, detalles, diferencias, ventajas y desventajas.

Existen dos topologías básicas que facilitan la comprensión del tema de convertidores CD/CA, estas topologías binivel son (Figura 1.1):

- Inversores de medio puente
- Inversor de puente completo (puente H)

No obstante, existen otras topologías que despiertan interés en la investigación y desarrollo de convertidores multinivel, las cuales se centran en cinco topologías básicas (Figura 1.1):

- Convertidor con conexión cascada de puentes H (*Cascade Full-Bridge Converter*) [2]
- Convertidor de diodo anclado (*Diode-Clamped Converter*) [3]
- Convertidor con capacitores flotantes (*Flying-Capacitor Converter*) [4]

- Convertidor multicelda (*Multicell Converter*) [5]
- Convertidor multicelda apilable (Stacked Multicell Converter) [17-21, 26]

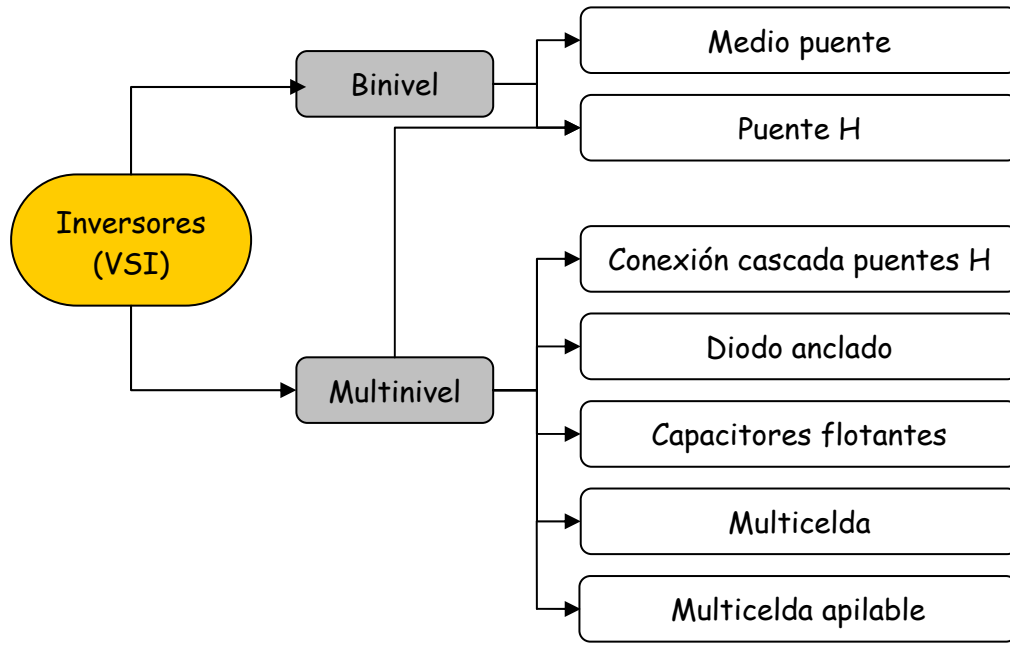


Figura 1.1 Estructuración de inversores binivel y multinivel [6].

### 1.3 Inversor de medio puente

La topología básica de un inversor monofásico es la de un inversor de medio puente, como el mostrado en la Figura 1.2. El inversor está constituido por un par de interruptores ( $S_1$  y  $S_2$ ) los cuales funcionan de forma complementaria, es decir, al estar en activo  $S_1$ ,  $S_2$  se mantiene abierto y el voltaje del capacitor  $C_1$  se ve reflejado en la carga; mientras que al estar en activo  $S_2$ ,  $S_1$  se abre y el voltaje de entrada  $V_s/2$  aparece a través de la carga. El voltaje de salida en la carga corresponderá a una señal cuadrada.

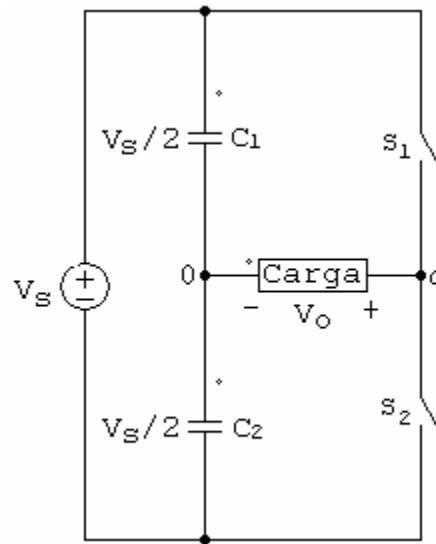


Figura 1.2. Inversor de medio puente.

Considerando que  $C_1$  y  $C_2$  están cargados a la mitad del voltaje  $V_s$ , tal como se observa en los capacitores flotantes de la Figura 1.2. Para la forma de onda del inversor de medio puente en la primera mitad del periodo ( $T/2$ ) se obtendrá un voltaje con forma de onda cuadrada ( $V_s/2$ ), para la segunda parte del periodo ( $T/2$  a  $T$ ) se polariza de forma inversa y el voltaje de salida será  $-V_s/2$ . Tal como se describe en la Tabla 1.1.

| Interruptores cerrados | Voltaje $V_{ao}$  |
|------------------------|-------------------|
| {S1}                   | $+V_s/2$          |
| Todos abiertos         | 0 (tiempo muerto) |
| {S2}                   | $-V_s/2$          |

Tabla 1.1. Control de un inversor de medio puente

Existe un tiempo intermedio denominado banda muerta ( $T_d$ ), el cual ayuda a prevenir un corto circuito al cambiar de estado los interruptores (Figura 1.3).

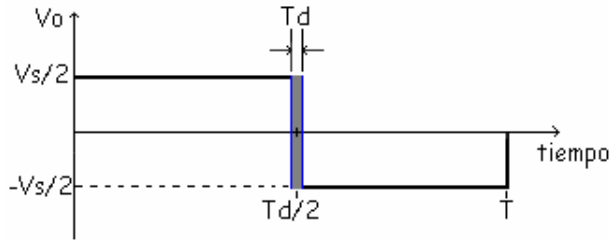


Figura 1.3. Voltaje de salida del inversor de medio puente.

### 1.4 Inversor de puente completo

El inversor de puente completo o puente H (Figura 1.4) está constituido por cuatro interruptores ( $S_1$ ,  $S_2$ ,  $S_3$  y  $S_4$ ), y su estrategia de control se define de la siguiente forma: cuando los interruptores  $S_1$  y  $S_4$  se activan simultáneamente, el voltaje de entrada  $V_s$  aparece a través de la carga. Si los interruptores  $S_2$  y  $S_3$  se activan al mismo tiempo el voltaje a través de la carga se invierte y adquiere el valor de  $-V_s$ .

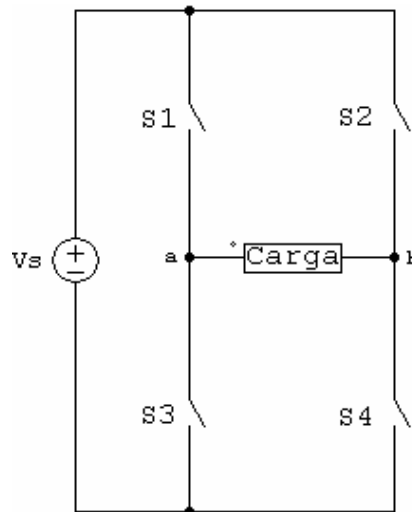


Figura 1.4. Inversor de puente completo (puente H).

Los posibles estados de conmutación se muestran en la Tabla 1.2.

| Interruptores cerrados | Voltaje $V_{ab}$  |
|------------------------|-------------------|
| {S1,S4}                | $+V_s$            |
| Todos abiertos         | 0 (tiempo muerto) |
| {S2,S3}                | $-V_s$            |

Tabla 1.2. Control de un inversor de puente completo.

La forma de onda del voltaje de salida del inversor de puente completo se muestra en la Figura 1.5.

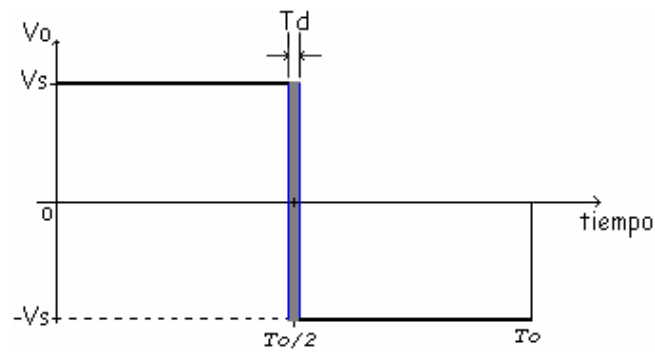


Figura 1.5. Voltaje de salida del inversor puente H.

### 1.5 Convertidor con conexión cascada de puentes H

Esta topología se basa en la conexión de puentes H con fuentes de CD separadas. Una de sus primeras aplicaciones fue la estabilización de plasma, trabajo publicado por Marchesoni et al.1988. La Figura 1.6 muestra un convertidor con conexión cascada de puentes H de cinco niveles, realizada mediante la conexión serie de dos etapas en puente H.

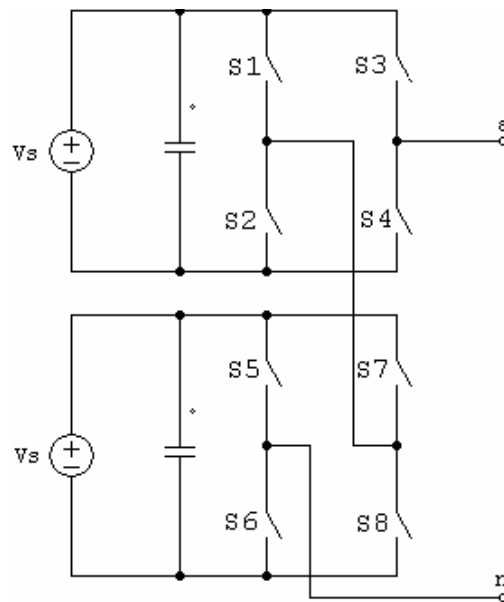


Figura 1.6. Convertidor cascada de puentes H de cinco niveles..

En este convertidor cada puente H puede generar tres voltajes de salida diferentes:  $+V_s$ ,  $0$  y  $-V_s$ . El voltaje de fase resultante se sintetiza por la suma de los voltajes generados por cada puente. Por tanto, el voltaje de salida  $V_{an}$  puede tomar cinco valores distintos:  $+2V_s$ ,  $+V_s$ ,  $0$ ,  $-V_s$ ,  $-2V_s$  (Tabla 1.3).

| Interruptores cerrados | Voltaje $V_{ao}$ |
|------------------------|------------------|
| {S2,S3,S6,S8}          | $+V_s$           |
| {S2,S3,S6,S7}          | $+2V_s$          |
| Todos abiertos         | 0                |
| {S1,S4,S6,S8}          | $-V_s$           |
| {S1,S4,S5,S8}          | $-2V_s$          |

Tabla 1.3. Control de un convertidor cascada de puentes H de cinco niveles

La Figura 1.7 muestra la forma de onda del voltaje de salida para el convertidor cascada de puentes H de cinco niveles.

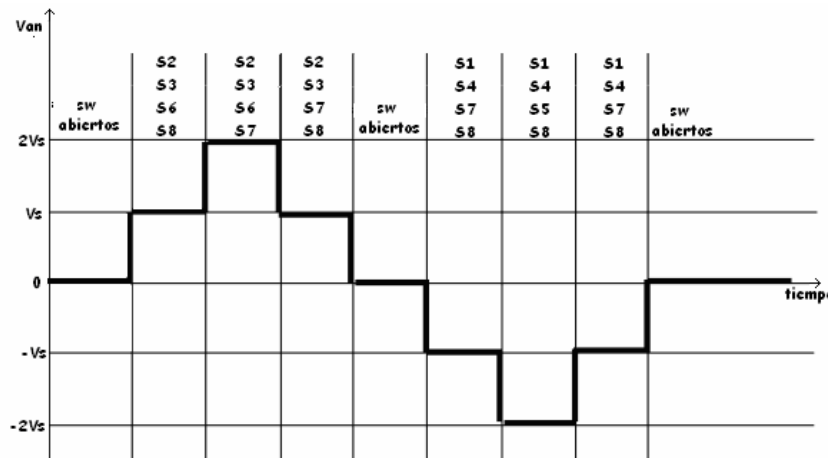


Figura 1.7. Forma de onda del voltaje de salida del convertidor cascada de puentes H de cinco niveles.

Sin embargo para el funcionamiento adecuado de esta topología es necesario que las entradas de voltaje de CD estén aisladas entre ellas, lo cual se consigue normalmente a través de un transformador con secundarios aislados o transformadores independientes acompañados de su respectivo rectificador con diodos [3]. No obstante, en aplicaciones de filtrado activo o corrección del factor de potencia, las fuentes de CD se pueden sustituir por capacitores. Por otro lado, se puede sustituir el rectificador de diodos por un



puede ser modular, reduciendo la complejidad en el montaje y precio. En consecuencia, el número de niveles se puede incrementar fácilmente añadiendo puentes H.

puente de IGBTs, que presentan la ventaja de conmutar a altas frecuencias, habilitando así la posibilidad de un flujo de corriente bidireccional [4] [5].

Los convertidores con conexión cascada de puentes H presentan las siguientes ventajas [4]:

- Al estar constituidos por la asociación de etapas en puente H, la construcción puede ser modular, reduciendo la complejidad en el montaje y precio. En consecuencia, el número de niveles se puede incrementar fácilmente añadiendo puentes H.
- Requieren menor número de componentes que otras topologías multinivel para alcanzar el mismo número de niveles.
- La topología es tolerante a fallos, puesto que puede perder una de sus etapas y reducir su salida a un nivel menos y seguir funcionando.

Los inconvenientes en los convertidores con cascada de puentes H son los siguientes [4]:

- Se requieren fuentes de CD aisladas para cada etapa en puente. Por tanto, será necesario emplear un transformador con múltiples secundarios o bien, múltiples transformadores independientes, los cuales deberán ser provistos de sus correspondientes rectificadores para suministrar el voltaje de CD.
- Las características del transformador hace que el costo del convertidor se incremente de forma considerable.

### 1.6 Convertidor de diodo anclado

La Figura 1.8 muestra un convertidor de diodo anclado de cinco niveles. Este convertidor es presentado por Nabae et al. 1980 [7], también conocido como Neutral-Point-Clamped Converter (NPC).

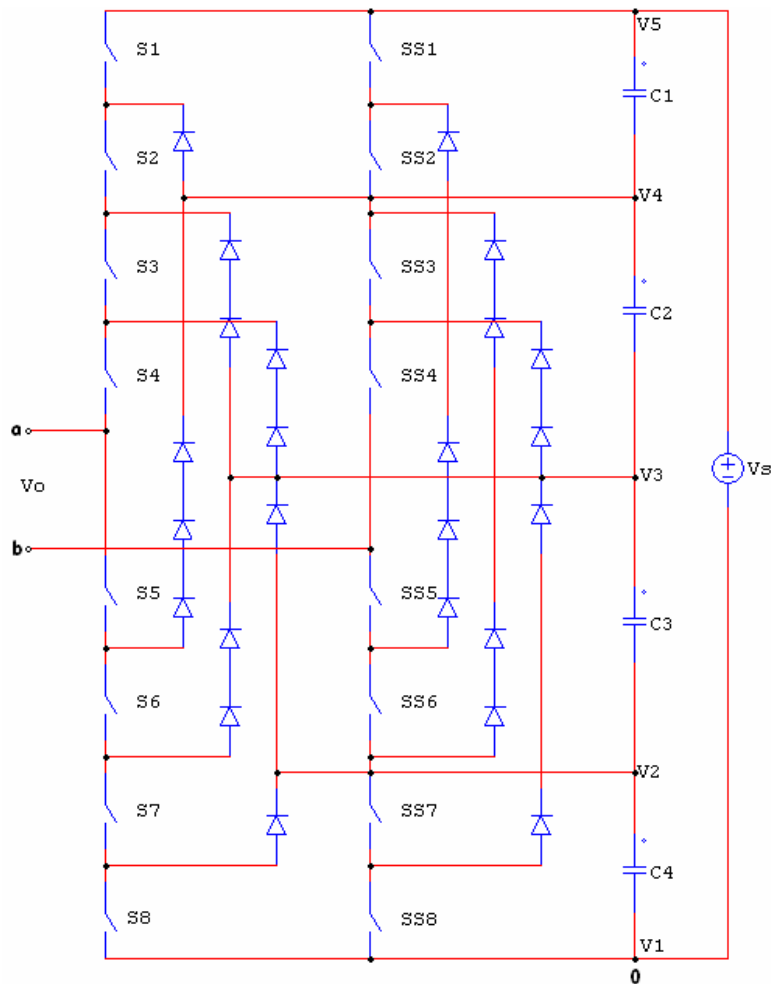


Figura 1.8. Convertidor de diodo anclado de cinco niveles.

El circuito de la Figura 1.8 se puede analizar considerando el punto  $a$  de la salida y el nodo de referencia  $0$  de la terminal negativa de la fuente. El voltaje de fase ( $V_{a0}$ ) puede tomar cinco niveles diferentes:  $+V_s$ ,  $+3V_s/4$ ,  $V_s/2$ ,  $V_s/4$  y  $0$ , por cada fase. La Tabla 1.4

muestra a modo de ejemplo el control para obtener los cinco niveles de voltaje mencionados, los cuales se ilustran en la Figura 1.9. El voltaje de fase está formado por la fase positiva  $a$  y la fase negativa  $b$ , por lo que cada voltaje de fase constituye un semiciclo de la señal sinusoidal.

| Interruptores cerrados | Voltaje $V_{ao}$ |
|------------------------|------------------|
| {S1,S2,S3,S4}          | $V_s$            |
| {S2,S3,S4,S5}          | $3V_s/4$         |
| {S3,S4,S5,S6}          | $V_s/2$          |
| {S4,S5,S6,S7}          | $V_s/4$          |
| {S5,S6,S7,S8}          | 0                |

Tabla 1.4. Control de un convertidor de diodo anclado de cinco niveles para la fase  $a$ .

La estrategia de control para generar una señal de forma sinusoidal en el caso del semiciclo positivo se muestra en la Tabla 1.4.

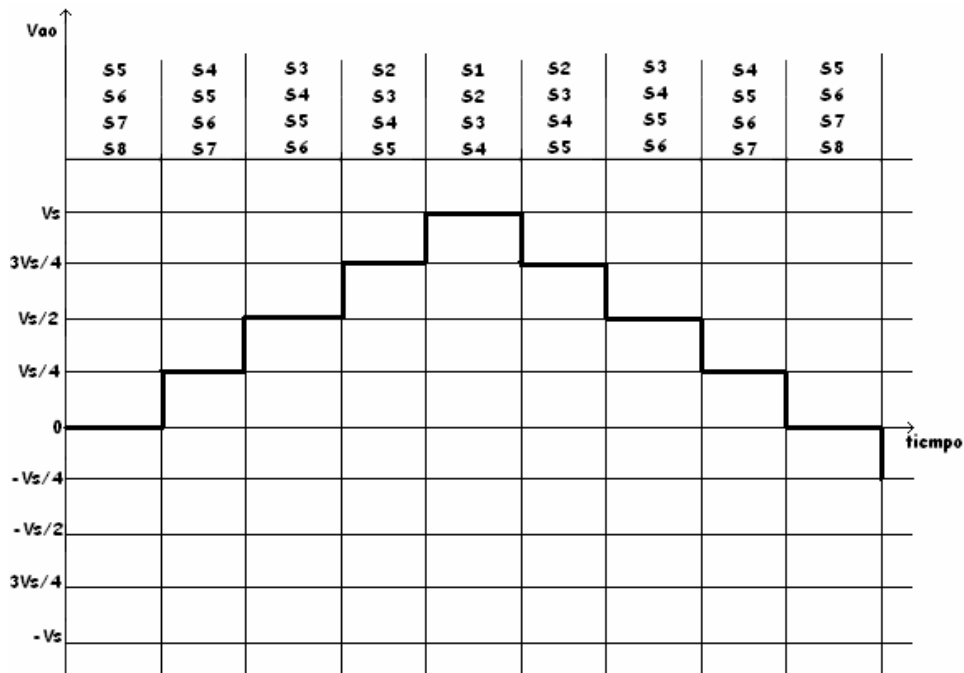


Figura 1.9. Voltaje de salida de  $V_{ao}$  en función de los interruptores conectados para el convertidor de diodo anclado.

Las ventajas de la topología de diodo anclado son [8]:

- El voltaje de bloqueo de los interruptores es el voltaje del capacitor de entrada  $V_s/(n-1)$  en el caso de  $n$  niveles.
- El número de capacitores es pequeño en comparación con otras topologías multinivel.
- No requiere transformadores.
- La eficiencia es alta.
- A medida que el número de niveles incrementa, el contenido armónico se reducirá.

Por otro lado, las desventajas del diodo anclado son [8]:

- Son necesario diodos de rápida recuperación.
- Es necesario que los voltajes de los capacitores se mantengan equilibrados en cualquier punto de trabajo, por lo que el control de convertidor se complica. Dicho equilibrio, se dificulta conforme aumenta el número de niveles, incluso puede ser imposible en algunas condiciones de operación.

### 1.7 Convertidor con capacitores flotantes

El convertidor con capacitores flotantes fue presentado en 1992 por Meynard et al. 1992<sup>a</sup> [9], también conocido con los nombres: Floating-Capacitor Converter [10] y Capacitor-Clamped Converter [11]. La Figura 1.10 muestra un convertidor con capacitores flotantes. La función de los capacitores es como la de un circuito de anclaje, es decir

prevé de forma natural el voltaje entre los interruptores, por lo que las señales de control pueden ser intercambiadas de fase para evitar problemas  $dv/dt$  [12].

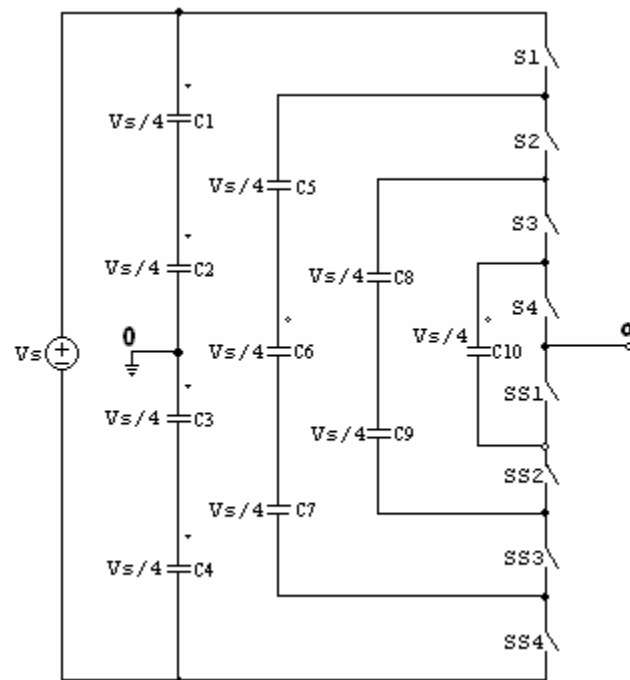


Figura 1.10. Convertidor con capacitores flotantes de cinco niveles.

En el circuito, el arreglo de los capacitores en serie ( $C1$ ,  $C2$ ,  $C3$  y  $C4$ ) permite equilibrar el voltaje en cada punto de anclaje ( $0$ ). El convertidor con capacitores flotantes se puede ver como un inversor de voltaje, en el cual los capacitores flotantes no únicamente son usados como anclaje, sino para mejorar el diseño, esto es, si se compara con la topología de diodo anclado. Para el caso del convertidor con capacitores flotantes se hace uso de interruptores conectados de forma complementaria ( $S1-SS4$ ,  $S2-SS3$ ,  $S3-SS2$ ,  $S4-SS1$ ).

| <b>Interruptores cerrados</b>  | <b>Voltaje <math>V_{ao}</math></b> |
|--|------------------------------------|
| {S1-S2-S3-S4}  | $V_s/2$                            |
| {S1-S2-S3-SS1} ó {S2-S3-S4-SS4} ó {S1-S3-S4-SS3}   | $V_s/4$                            |
| {S1-S2-SS1-SS2} ó {S3-S4-SS3-SS4} ó {S1-S3-SS1-SS3} ó<br>{S1-S4-SS2-SS3} ó {S2-S4-SS2-SS4} ó {S2-S3-SS1-SS4} | 0                                  |
| {S1-SS1-SS2-SS3} ó {S4-SS2-SS3-SS4} ó {S3-SS1-SS3-SS4}   | $-V_s/4$                           |
| {SS1-SS2-SS3-SS4}  | $V_s/2$                            |

Tabla 1.5. Conmutación de interruptores para obtener los cinco niveles de voltaje de salida en el convertidor con capacitores flotantes.

El funcionamiento normal del convertidor se presenta cuando los todos los capacitores están cargado a un voltaje de  $V_s/4$ , lo que significa que los capacitores  $C1$ ,  $C2$ ,  $C3$  y  $C4$  que se ubican paralelos a la fuente  $V_s$  se cargarán de forma equilibrada, en consecuencia los capacitores  $C5$ ,  $C6$  y  $C7$  entregarán un voltaje igual a  $3V_s/4$ , los capacitores  $C8$  y  $C9$  serán igual a  $V_s/2$  y por último el capacitor  $C10$  se cargará a  $V_s/4$ . Por lo que el equilibrio en los capacitores se logra escogiendo la combinación de interruptores apropiada de las existentes a la Tabla 1.5.

Ventajas del convertidor con capacitores flotantes [13]:

- Debido a la presencia de los capacitores flotantes, el voltaje de bloqueo de los interruptores es  $V_s/(n-1)$ , igual que en el convertidor de diodo anclado.
- Cuando el número de niveles es muy alto, el contenido armónico será muy bajo, facilitando el uso de filtros muy pequeños a la salida.

- Es posible agregar una rama adicional de interruptores para que se logre generar un voltaje trifásico, caso similar a la topología expuesta por los convertidores de diodo anclado.

Desventajas del convertidor con capacitores flotantes [13]:

- Se emplea un número elevado de capacitores. La corriente que circula a través de todos los capacitores flotantes es la misma, por lo tanto el valor de los capacitores debe ser el mismo para mantener un mismo voltaje de rizado.
- Los capacitores flotantes deben soportar la corriente de carga, por tanto deben ser seleccionados de forma adecuada, con objeto de no generar excesivas pérdidas y no condicionar la corriente máxima del convertidor.
- Debe de existir un proceso de precargado de los capacitores flotantes.

### 1.8 Convertidor multicelda

El convertidor multicelda está formado por celdas conectadas en serie, donde cada celda denominada celda básica de conmutación se forma por un par de interruptores que funcionan de manera complementaria, el circuito mostrado en la Figura 1.11 se constituye por tres celdas básicas de conmutación. Entre celdas existe una fuente de voltaje flotante [14, 15], por lo que se puede dividir el voltaje de entrada en  $p-1$  fuentes de voltaje, siendo  $p$  el número de celdas básicas de conmutación.

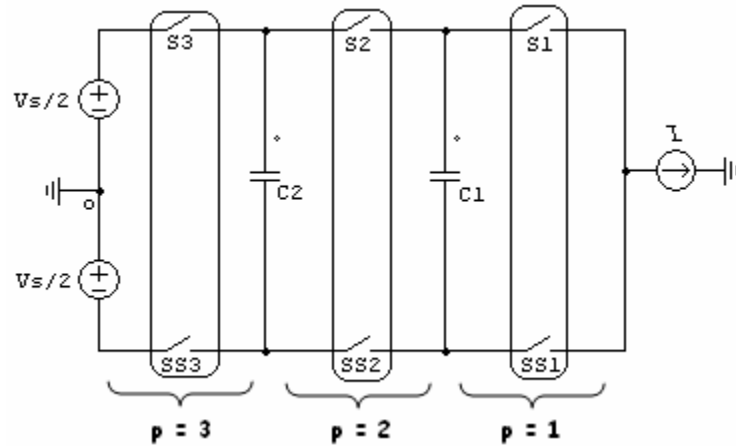


Figura 1.11. Convertidor multicelda de tres celdas.

Las condiciones de operación del convertidor multicelda son las siguientes:

- No deben conducir simultáneamente los interruptores de una celda básica, debido a que se presentaría una situación de cortocircuito.
- No deben bloquear los interruptores de una celda básica al mismo tiempo ya que la corriente  $I$  estará en circuito abierto.
- Si ambos interruptores están conmutando, se deben considerar los tiempos muertos para compensar los retardos de apagado [9, 16, 17].

Bajo tales condiciones, el máximo voltaje aplicado a las celdas de conmutación es igual a  $V_s/p$ , siendo  $V_s$  el voltaje total de la fuente de entrada y  $p$  el número de celdas en el circuito convertidor multicelda. Los resultados experimentales de un convertidor multicelda muestran que el balance del voltaje en los capacitores se obtiene cuando los ciclos de trabajo de las diferentes celdas en conmutación sean iguales y tengan un



desfasamiento de  $2\pi/p$  [16]. Por lo que la conmutación realizada en una forma complementaria crea un balance natural de los voltajes de los capacitores [15, 16, 18],

En la Figura 1.12 se muestra el voltaje de salida de un convertidor multicelda de tres celdas con cuatro niveles de voltaje producido por un inversor de tres celdas.

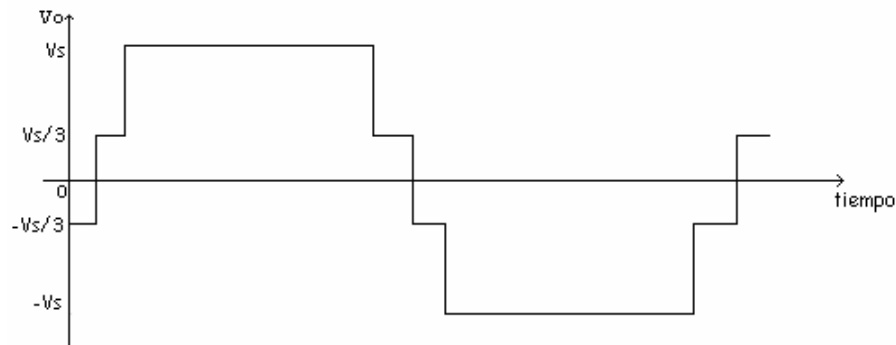


Figura 1.12. Voltaje de salida del inversor de voltaje de tres celdas

Dentro de las ventajas y desventajas del convertidor multicelda se debe dar un estado comparativo con varias topologías, puesto que ya se observó que las topologías multinivel hacen uso de un gran número de interruptores, capacitores y fuentes independientes de alimentación. Lo cual conlleva a un incremento en el costo de toda la topología en conjunto. Un estudio comparativo se presenta en [18], en donde se analizan topologías como: N.P.C, convertidor multicelda y un convertidor multicelda apilable.

Las ventajas del convertidor multicelda estarán referenciadas a la energía almacenada y las pérdidas en los interruptores, por lo que todo quedará en función de la aplicación.

Siendo que el convertidor multicelda presenta problemas en aplicaciones de alto voltaje [18], existe opciones, tales como la de los convertidores multicelda apilable, de dicho tipo de convertidores se da una breve reseña a continuación y se analiza con profundidad en el capítulo 2, ya que este tipo de tecnología es la que se usa para el desarrollo de este trabajo de tesis.

### 1.9 Convertidor multicelda apilable

El convertidor multicelda apilable, Stacked Multicell Converter (SMC), es un inversor con aplicación en altos voltajes. Su configuración (Figura 1.13) permite compartir la corriente y el voltaje entre interruptores, y de esta forma se reduce el estrés generado en los interruptores.

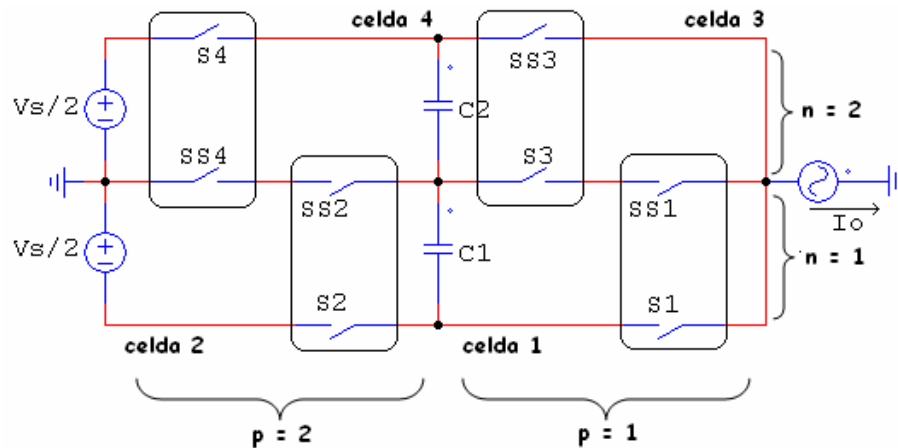


Figura 1.13. SMC de 2X2

El máximo voltaje que pasa a través de los interruptores es igual a  $V_s/(pxn)$ ,  $V_s$  es el voltaje de entrada,  $n$  el numero de pilas y  $p$  el numero de celdas [7, 8]. El voltaje de salida

con  $n \times p$  niveles de salida más uno, considerando el cero como nivel es mostrado en la Figura 1.14.

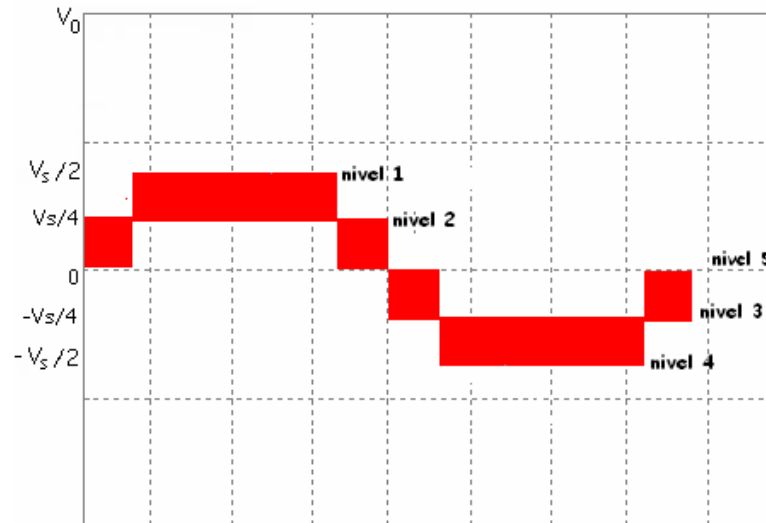


Figura 1.14. Voltaje de salida de SMC de 2X2.

## 1.10 Conclusiones

En este capítulo se presentó una perspectiva general de los inversores más comunes, mostrando las distintas topologías multinivel existentes: convertidor con conexión cascada de puentes H, convertidor de diodo anclado, convertidor con capacitores flotantes, convertidor multicelda y convertidor multicelda apilable. Para estas topologías se presentaron sus ventajas y desventajas, las cuales reflejaron claramente una dependencia de la aplicación.

A continuación se presenta la Tabla 1.6, en la cual se comparan las topologías expuestas en este capítulo. La comparación asume que todos los dispositivos tienen el mismo rango de voltaje, pero no necesariamente el mismo rango de corriente [19, 20], esto para no afectar el análisis, puesto que sólo se va a tomar el punto de vista de almacenamiento de energía. La comparación de topologías mostrada en la Tabla 1.6 está hecha en función del número de niveles ( $\lambda$ ) de voltaje que se presentan a la salida de cada topología.

| Tipo de convertidor         | Diodo anclado                        | Capacitores flotantes    | Conexión cascada         | Multicelda         | SMC              |
|-----------------------------|--------------------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------|------------------|
| Dispositivos de conmutación | $(\lambda - 1) \times 2$             | $(\lambda - 1) \times 2$ | $(\lambda - 1) \times 2$ | $\lambda \times 2$ | $2(\lambda - 1)$ |
| Diodos principales          | $(\lambda - 1) \times 2$             | $(\lambda - 1) \times 2$ | $(\lambda - 1) \times 2$ | 0                  | 0                |
| Diodos anclados             | $(\lambda - 1) \times (\lambda - 2)$ | 0                        | 0                        | 0                  | 0                |
| Capacitores en bus de CD    | $\lambda - 1$                        | $\lambda - 1$            | $(\lambda - 1)/2$        | 0                  | 0                |
| Capacitores principales     | 0                                    | $(\lambda - 1) \times 2$ | 0                        | $\lambda - 1$      | $\lambda - 3$    |

Tabla 1.6. Comparación entre arquitecturas inversoras [25].

De la Tabla 1.6 se puede observar que el número de capacitores contenidos en las arquitecturas es nulo para el caso del diodo anclado y la conexión cascada de puentes H, por lo que estas topologías no poseen elementos que almacenan energía.

Para finalizar este capítulo, se puede concluir que entre el estrés generado por el voltaje entre interruptores y las ventajas y desventajas de cada topología expuesta se tiene una superioridad por parte de los SMC.