

CAPÍTULO 3

Convertidores multinivel.

3.1 Introducción.

Existen diferentes topologías para la conversión de energía de CD-CA, por lo que en este capítulo empezaremos entendiendo el concepto de multinivel, se mencionarán las topologías mas comunes, se presentará las ventajas y desventajas de la conversión multinivel en general y se analiza el convertidor multinivel con diodo anclado al neutro, para tres y cinco niveles, además se presentan las técnica de control para conmutación.

3.2 Qué se entiende por convertidor multinivel.

Los convertidores multinivel incluyen un arreglo de semiconductores de potencia y capacitores como fuentes de voltaje, el voltaje generado de salida tiene forma de onda escalonada considerando que los interruptores se cierran y se abren en tiempos diferentes, dependiendo del número de interruptores de potencia los voltajes en la salida crece sumando los voltajes de los capacitores, mientras que los interruptores de potencia soportan voltajes reducidos. La Fig. 3.1 muestra un diagrama esquemático de un convertidor multinivel de una pierna con diferentes números de niveles, donde los semiconductores de potencia son representados por interruptores ideales con varias posiciones. [17]

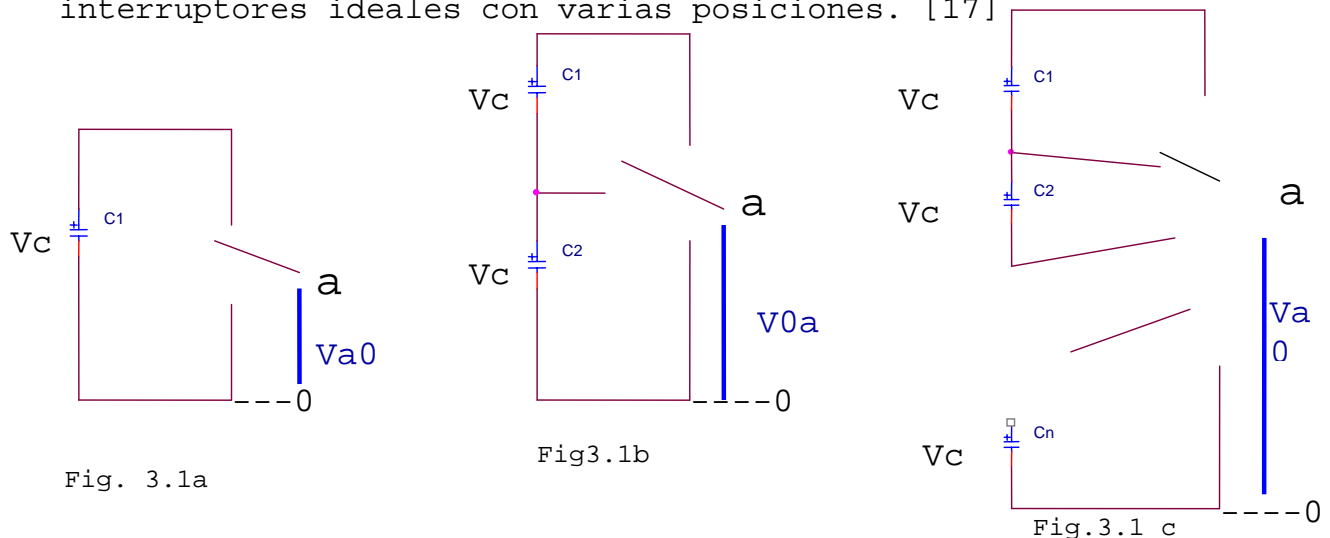


Fig. 3.1a

Fig3.1b

Fig.3.1 c

Fig.3.1. Pierna de una fase de un convertidor de dos niveles, tres niveles, n niveles.[17]

Puede observarse que los voltajes generados son medidos con respecto a la terminal negativa del capacitor inferior ver Fig.3.1.

3.3 Qué es un convertidor multinivel CD-CA.

Los convertidores multinivel en los últimos años se han consolidado como una opción más para convertir energía CD-CA en el rango de potencia media y alta desde el punto de vista económico y técnico[23], podemos encontrar un incremento en las aplicaciones donde la conversión de la energía se realiza mediante convertidores multinivel[17,20,23,26].

De acuerdo con la historia el concepto de conversión multinivel existe antes de los trabajos presentados por Nabae, Takahashi y Akagi[18] en 1980, pero a partir de esta fecha se considera el punto de partida de los convertidores multinivel actuales. Es por esto que la comunidad científica y la industria han enfocado sus investigaciones y desarrollo en estos convertidores. La técnica de conversión multinivel se considera un área joven en el campo de la conversión de energía, presentando unas expectativas que hacen pensar en un gran potencial para una más amplia aplicación en el futuro[26].

La forma más general de entender los convertidores CD-CA multinivel es considerarlo como un seccionador de tensión. La tensión de alterna de salida, de valor elevado, se obtiene a partir de diferentes niveles de tensión de continua de entrada, de valor mas pequeño accionando adecuadamente los interruptores del convertidor Fig.3.2, siendo esta la diferencia básica respecto a un convertidor CD-CA convencional, donde la tensión de continua de entrada presenta un único nivel.

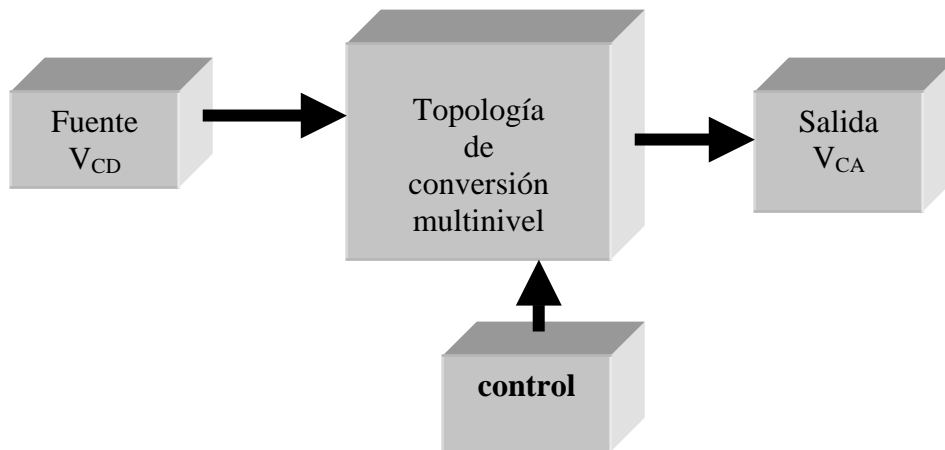


Fig.3.2 Elementos necesarios para un convertidor CD-CA usando un convertidor multinivel.

3.4 Topologías de inversores multinivel.

Las topologías multinivel básicas que son objeto de mayor estudio son las siguientes [23].

- Convertidor con diodos anclado (Diode-Clamped converter).
- Convertidor con capacitores flotantes (flying-capacitor converter).
- Convertidor con conexión en cascada de puentes monofásicos (Cascaded Full-Bridge converter)

Existen además otras topologías que según [26], despiertan menos interés como son las siguientes.

- Convertidor asimétrico híbrido.
- Convertidor con puentes en cascada y fuentes CD-CD con aislamiento.
- Convertidor con topologías multinivel en cascada.
- Convertidor con conmutación suave.
- Rectificador elevador de 3 niveles/convertidor matricial.
- Inversores acoplados por transformador.
- Convertidor diodo/capacitor anclado.
- Convertidor nuevo diodo anclado.
- Convertidor multinivel generalizado.

Generalizando podemos agrupar a los convertidores multinivel de la siguiente forma Fig.3.3.

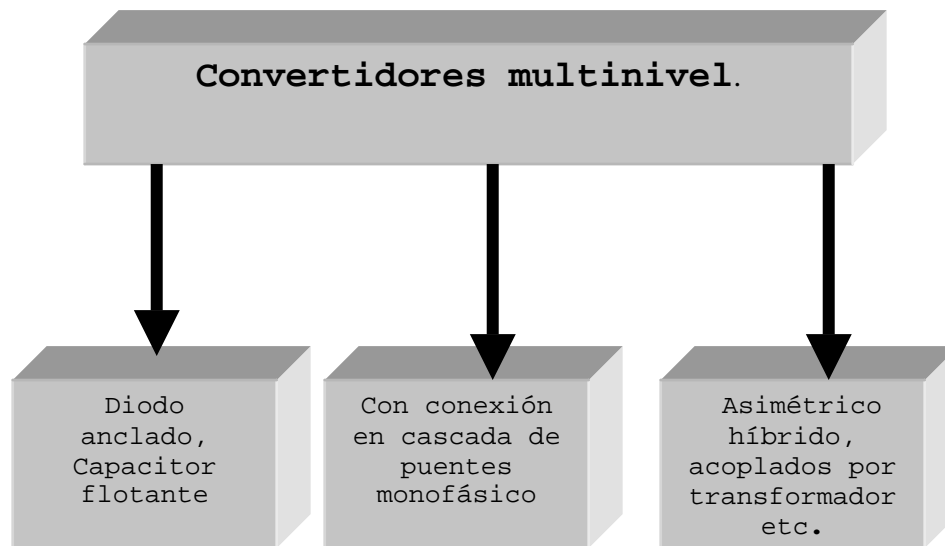


Fig.3.3. Topologías de los convertidores multinivel.[26]

Para este trabajo de tesis se seleccionó el convertidor multinivel diodo anclado(clamped), por las ventajas que presenta sobre la topología con capacitor flotante como se verá más adelante en el sección 3.8.

3.5 Características de los convertidores multinivel.

Las características más relevantes de los convertidores multinivel son las siguientes:

- La disposición del voltaje (V_{CD}) de entrada en múltiples niveles permite aumentar varias veces la tensión de trabajo del convertidor empleando los mismos interruptores que un convertidor convencional. Cada interruptor debe bloquear únicamente la tensión correspondiente a un único nivel de continua, evitando de esta manera el inconveniente del equilibrado estático y dinámico de la asociación serie de los dispositivos electrónicos[19][20].
- La potencia de los convertidores se incrementa al emplear voltajes mayores, sin necesidad de incrementar la corriente, evitando así mayores pérdidas durante la conducción, y por consecuencia mejorar el rendimiento del convertidor.

- El voltaje de salida obtenida en un convertidor multinivel CD-CA presenta un contenido armónico menor que el obtenido en un convertidor CD-CA convencional de potencia equivalente[17]. Teóricamente puede obtenerse una distorsión armónica nula si se dispone de un número infinito de niveles de la tensión de entrada trayendo como consecuencia la reducción del peso y costo de los filtros[17].
- La corriente de entrada absorbida presenta una distorsión armónica baja [17].
- Se genera una tensión de modo común (CM) inferior, por tanto se reduce la corriente parásita que circula por los rodamientos de los motores alargando su vida útil. En resumen usando un método de modulación adecuado, puede llegar a cancelarse la tensión en modo común[21][26].
- Pueden operar con una baja frecuencia de conmutación considerando frecuencia del orden debajo de 1000 Hertz [19].
- La respuesta dinámica del convertidor es más rápida, por tener más niveles de tensión de salida y emplear filtros de menor tamaño [26].
- Para aplicaciones industriales la demanda de potencia se ha incrementado en los últimos años, llegando a niveles de pocos megawatt hasta 10 MW, con alimentación desde la red de alimentación(2,3 a 6.9 KV)[17]. En general, en los convertidores CD-CA se consiguen mejores formas de tensión y corriente de salida al aumentar la frecuencia de conmutación [16].
- La mayor exigencia por parte de las instituciones normativas en cuanto a la calidad de la energía(reducción de contenidos armónicos de tensiones y corrientes) unido a la creciente demanda de potencia por parte de aplicaciones y convertidores [26].

3.6 Desventajas de los inversores multinivel.

Algunos inconvenientes de los convertidores multinivel son:

- Cuando se emplea un número grande de interruptores (mas de 7) la complejidad del control se incrementa[27].
- Es necesario tener diferentes niveles de tensión de entrada, que pueden obtenerse con capacitores o mediante varias fuentes de continua. Cuando se emplean

capacitores las tensiones de estos deben de permanecer constantes o equilibradas en cualquier condición de trabajo, con objeto que cada capacitor actúe como una fuente de tensión constante.

3.7 Convertidor multinivel con diodo anclado al neutro.

Para el caso del convertidor diodo anclado de tres niveles monofásico, la topología se muestra en la fig.3.4 [17,18], también se le conoce como Neutral-Point Clamped converter(NPC).

Este convertidor es el más ampliamente estudiado y aplicado de todas las topologías mencionadas con anterioridad[26].

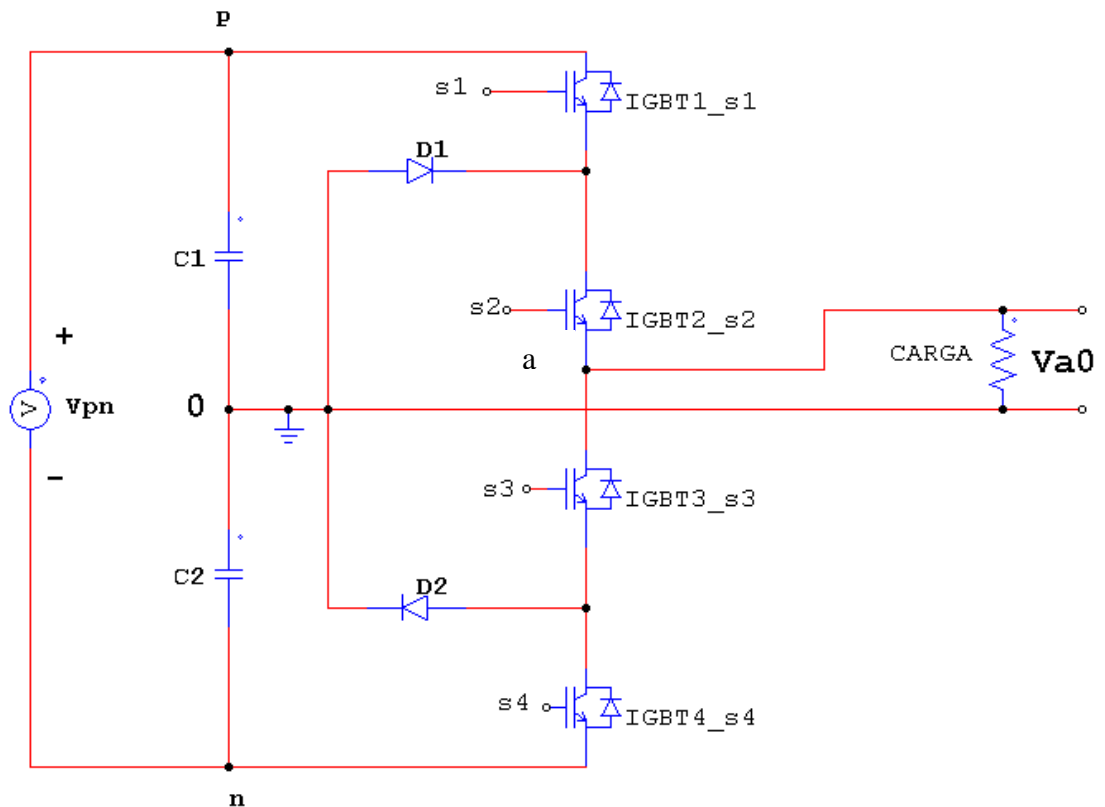


Fig.3.4. Convertidor monofásico de 3 niveles.

En este circuito la tensión V de CD se divide mediante dos capacitores $C1$ Y $C2$, donde el punto medio, 0 (tierra) se define como el punto neutro de continua (neutral point). La tensión de salida V_{a0} puede tomar tres niveles diferentes $V_{pn}/2$, 0, $-V_p/2$ tal como se muestra en la Fig.3.4. Para obtener estos tres niveles de salida el accionamiento de control de los interruptores $s1, s2, s3, s4$, se muestra en la tabla 3.1, donde se tienen dos pares complementarios; esto es, cuando uno está cerrado obliga al otro a estar abierto. Para este convertidor los pares complementarios son $s1-s3$, $s2-s4$.

Interruptores cerrados	Tension V_{a0}
$s1-s2$	$V_{pn}/2$
$s2-s3$	0
$s3-s4$	$-V_{pn}/2$

Tabla 3.1. Interruptores a conmutar para obtener los tres niveles de tensión de salida para el diodo anclado.

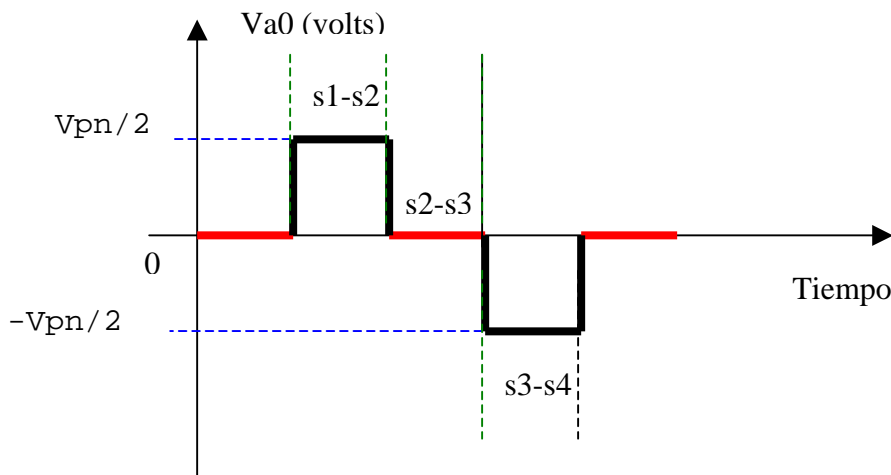


Fig.3.5. Niveles de voltaje de salida V_{a0} de acuerdo a la conmutación para topologías diodo anclado.

Los diodos conectados a 0 volts en el circuito de la Fig.3.4 tienen como función anclar (clamp) las tensiones de bloqueo de los interruptores a una fracción del bus de continua, esto es a la tensión de $V_{pn}/2$. Los diodos anclados deben de bloquear la misma tensión.

La tensión de salida analizada V_{a0} que es una señal de alterna se muestra en la Fig.3.5. donde se muestran los tres niveles $-V_{pn} / 2$, 0 , $V_{pn} / 2$. También podemos observar, que si se considera, la tensión de salida con respecto al punto n (referencia de la fuente de CD del bus principal) del circuito de la Fig.3.4 se tienen tres niveles positivos de tensión, V_p , $V_p/2$, 0 y el convertidor trabaja como convertidor CD-CD [17,18,26].

Esta topología puede incrementarse en el número de niveles, la Fig.3.6 muestra una rama de 5 niveles.

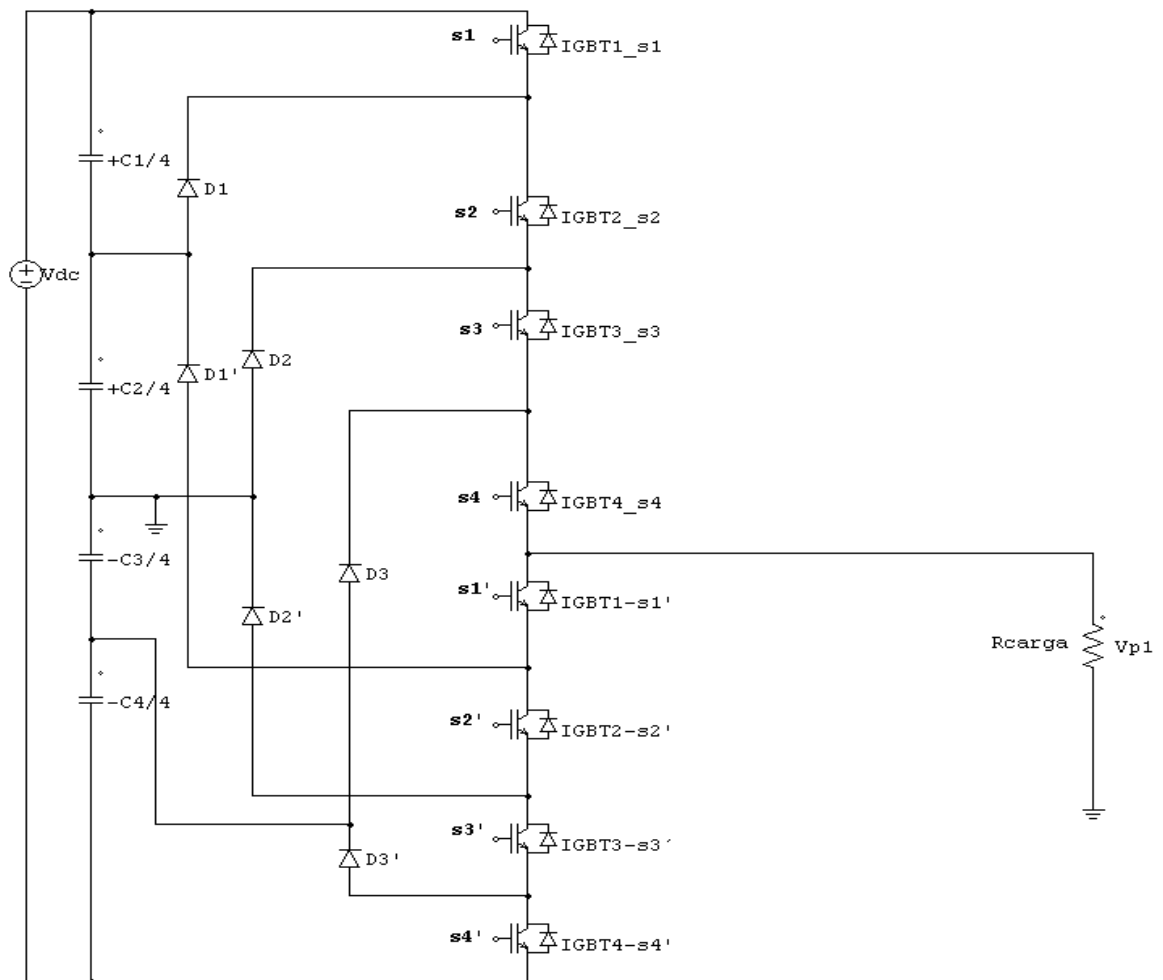


Fig.3.6. Convertidor monofásico diodo anclado de cinco niveles.

Podemos observar que la tensión V_{DC} , se reparte en cinco niveles por medio de los capacitores $C1, C2, C3, C4$, siendo el valor de la tensión de cada capacitor y la tensión de bloqueo de cada interruptor igual $V_{DC}/4$. La tabla 3.2 muestra las combinaciones de control de los interruptores para obtener los cinco niveles, donde los pares complementarios son: $s1-s1'$, $s2-s2'$, $s3-s3'$, $s4-s4'$.

Interruptores cerrados	Tensión
$s1-s2-s3-s4$	$V_{dc}/2$
$s2-s3-s4-s1'$	$V_{dc}/4$
$s3-s4-s1'-s2'$	0
$s4-s1'-s2'-s3'$	$-V_{dc}/4$
$s1'-s2'-s3'-s4'$	$-V_{dc}/2$

Tabla 3.2. Interruptores cerrados para obtener los cinco niveles de salida en el convertidor anclado.

Las tensiones de alterna de salida se muestran en la Fig.3.7.

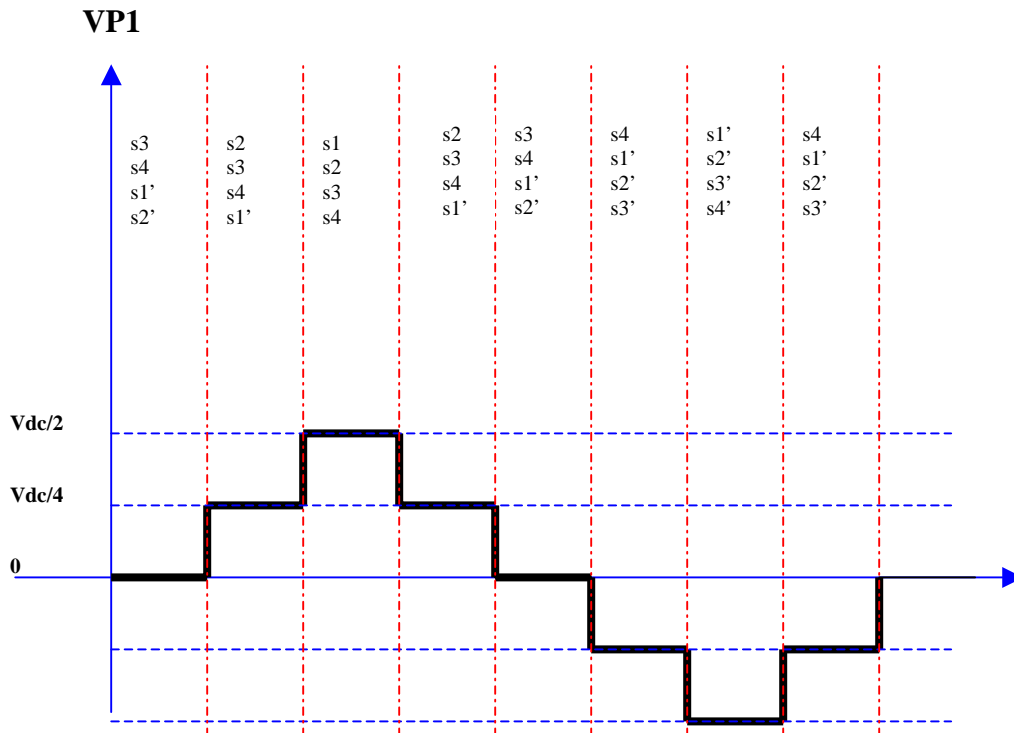


Fig.3.7. Tensiones de salida del convertidor de cinco niveles para el convertidor diodo anclado.

Algunos de los problemas que se presentan cuando se usan mas de tres niveles, es la tensión de bloqueo de los diodos anclados. De acuerdo con la Fig.3.6 podemos apreciar lo siguiente:

- Cuando los interruptores de conmutación $s_1-s_2-s_3-s_4$ estan cerrados , el diodo D_3 debe de bloquear la tension de tres capacitores ($3 V_{dc}/4$), mientras que el diodo D_2 debe de bloquear dos capacitores ($2 V_{dc}/4$), y el diodo D_1 debe bloquear $V_{dc}/4$.
- Cuando los interruptores de conmutación s_1',s_2',s_3',s_4' estan cerrados, D_1' debe de bloquear $3V_{dc}/4$, D_2' $2V_{dc}/4$ y D_3' $V_{dc}/4$.

Si la tensión de bloqueo de cada diodo es igual a la del interruptor, sucede que cuando se cierran interruptores que ocasionan una tensión a bloquear mayor que la de un capacitor deben de conectarse arreglos de diodos en serie, ocasionando esto el incremento del número de diodos. Para el caso analizado D_3 y D_1' que deben de bloquear $3V_{dc}/4$, deberá de configurarse con tres diodos conectados en serie, D_2 y D_2' con dos diodos [12].

3.8 Ventajas de la topología diodo anclado(Diode-Clamped).

- El número de capacitores utilizados es menor, comparada con otras topologías, siendo esto de interés puesto que son los elementos reactivo los de mayor costo en el convertidor.
- La tensión de bloqueo de los interruptores(IGBT o Mosfet)es la misma que la tensión de los capacitores de entrada, y para el caso de (n) niveles esta es igual a [17,18].

$$V_{capacitor} = \frac{V_{cd}}{(n-1)} \quad (3.1)$$

- Se pueden conectar directamente a un bus de continua, sin necesidad de crear otros buses adicionales.
- No requiere de transformadores adicionales.
- Cambio de un estado a otro accionando un solo interruptor.
- Cuando la cantidad de niveles es suficientemente alta, el contenido de armónicos es lo suficientemente bajo para evitar el uso de filtros.

3.9 Desventajas de la topología diodo anclado(Diode-Clamped).

- Se requiere que los diodos anclados sean de recuperación rápida y capaces de conducir la corriente nominal del convertidor, además de estar sometidos a recuperación inversa exigente[26].
- Al aumentar el numero de niveles se requieren mas diodos.
- Es difícil controlar el flujo de la potencia real del convertidor individual, en sistemas con varios convertidores [14].
- En topologías de más de tres niveles, los diodos anclados bloquean diferentes tensiones esto es en función de su posición en el convertidor, siendo la máxima tensión de bloqueo igual a:

$$V_{\text{diodo}} = \frac{V_{cd} (n - 2)}{(n - 1)} \quad (3.2)$$

Donde n es el numero de niveles [17,18].

Por lo que se requiere la asociación serie de diodos o el uso de diodos de mayor tensión, si se utilizan diodos de un mismo tipo con la misma capacidad de bloqueo que los interruptores del convertidor, puesto que no todos los diodos soportan la misma tensión como se mencionó anteriormente cuando el número de niveles es mayor que tres.

- Se requieren

$$N_{\text{diodos}} = 2(n - 2) \quad (3.3)$$

diodos por fase [17].

Esto quiere decir que el número de diodos de anclaje por fase aumenta en forma cuadrática con el número de niveles, aumentando la complejidad del diseño, disminuyendo la fiabilidad del diseño e incrementado el costo del convertidor. Por lo que el número de niveles recomendado como máximo es de siete o nueve [26].

- Es necesario que las tensiones de los capacitores se mantengan equilibradas en cualquier punto de trabajo, complicando el control del convertidor. Mantener el equilibrio de los capacitores se dificulta conforme se incrementa el número de niveles, incluso puede ser imposible en algunas condiciones de operación[26].

Después de valorar las ventajas y desventajas de los convertidores diodo anclado, podemos concluir que la topología de 3 niveles (neutral-point-clamped-NPC), reúne todas las ventajas antes mencionadas y no presenta las desventajas que se presentan en mas de tres niveles.

Sin embargo actualmente se encuentran funcionando comercialmente convertidores de mas de tres niveles [26].

3.10 Métodos de control de los inversores multinivel.

Las técnicas de conmutación de los convertidores multinivel, de acuerdo a la frecuencia de conmutación de los interruptores pueden agruparse en las siguientes cinco categorías Fig.3.8.[26]

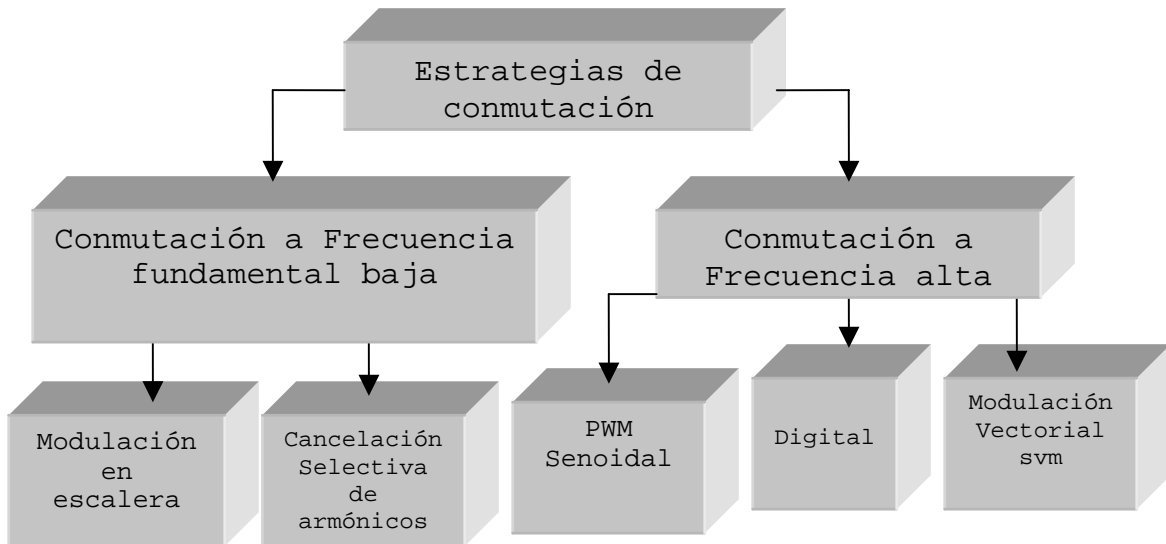


Fig.3.8. Formas de conmutación para convertidores multinivel.[26]

Lo que se busca con las diferentes técnicas de conmutación son las siguientes características:

- Minimización de los contenidos armónicos de la tensión de salida en el inversor.
- Regulación de la amplitud y frecuencia de salida.
- Equilibrio de las tensiones instantánea de los capacitores, cuando la topología lo requiere.

De las diferentes técnicas de conmutación trataremos la SPWM (sinusoidal pulse width modulation, PWM sinusoidal) y la digital que es la utilizada en este trabajo [26].

3.11 Modulación PWM senoidal.

Esta es una de las técnicas analógicas más empleadas en aplicaciones industriales debido a su simplicidad y que cumple con las tres características anteriores. Consiste en comparar una señal senoidal a la frecuencia fundamental (f_r) de salida (60 Hertz) conocida como moduladora, y otra triangular o diente de sierra (f_c) a la que se llama portadora, normalmente de una frecuencia mucho mayor que la moduladora Fig 3.9.

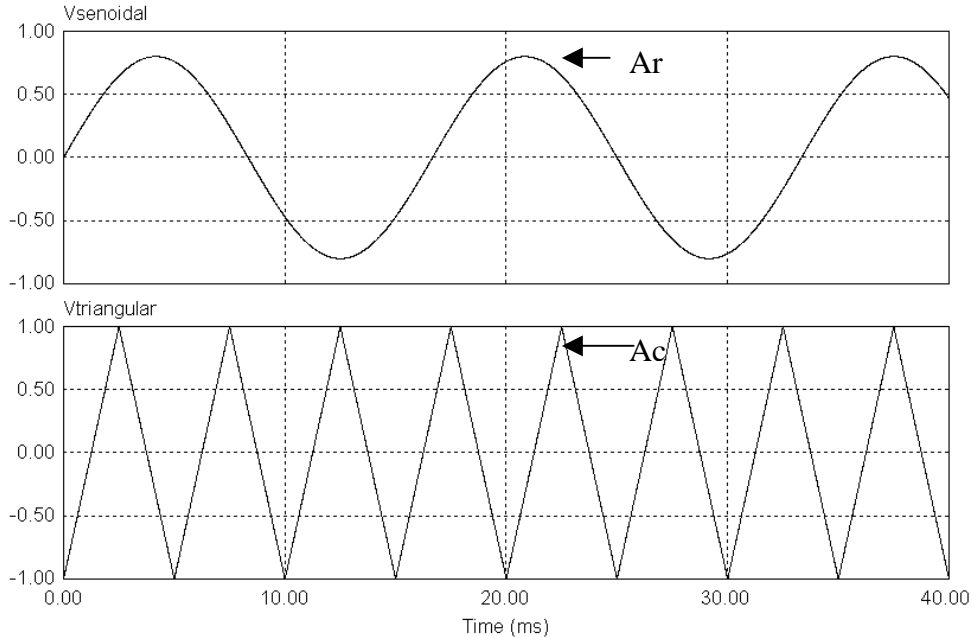


Fig.3.9. Onda moduladora senoidal y portadora triangular.

Esto permite variar el ancho de cada pulso de conmutación en proporción con la amplitud de la onda moduladora, [8,12,23,13]. Cuando se comparan estas dos señales se generan los pulsos de conmutación de los interruptores de potencia del convertidor multinivel de la fig.3.4.

La frecuencia f_r de la señal moduladora determina la frecuencia f_o de salida del inversor, y su amplitud pico A_r controla el índice de modulación m , y por consiguiente el voltaje rms de salida V_o donde.
$$m = \frac{A_r}{A_c} \quad \text{ec.3.4}$$

La secuencia de pulsos obtenidos para el control de la conmutación de los interruptores de potencia para el convertidor multinivel con diodo anclado al neutro después de la comparación de las señales se muestran en la Fig.3.10, teniendo como portadora una señal triangular a 200 hertz y moduladora una senoidal a 60 hertz.

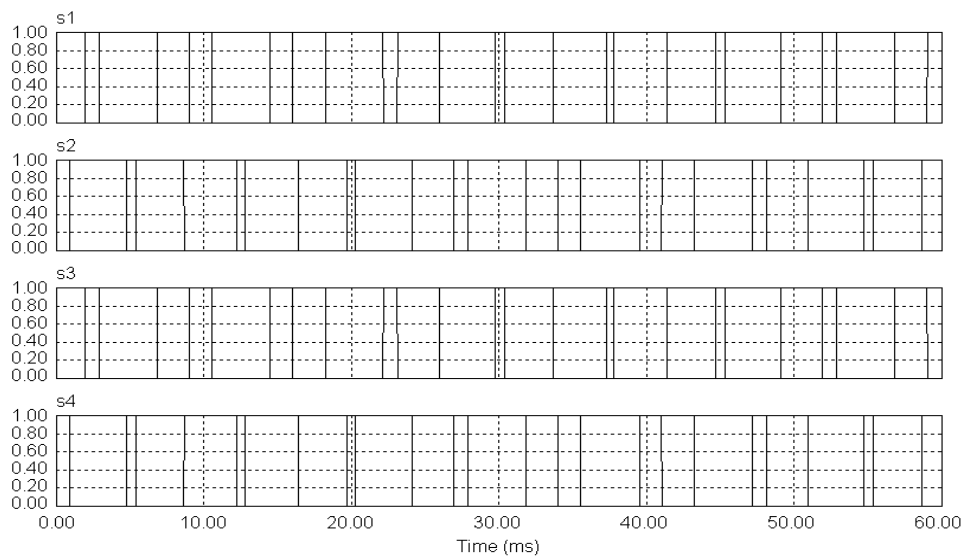


Fig.3.10. Secuencia de pulsos para la conmutación de los interruptores.

3.12 Modulación usando técnica control digital.

Este tipo de modulación consiste en crear los tiempos necesarios para obtener la frecuencia de la señal de salida, para el caso la frecuencia de 60 hertz (frecuencia de línea), usando multivibradores monoestables no reactivables, donde el pulso de disparo es la misma portadora que normalmente es de alta frecuencia (60 a 75 khz), esto se muestra en Fig.3.11.

Después de tener estos pulsos, utilizando compuertas and, se agrega la portadora tal como se muestra en la Fig. 3.12. para generar los pulsos de control para la conmutación de los interruptores de potencia del convertidor multinivel.

Otra forma de obtener esta forma de control, es mediante la programación en VHDL de un FPGA o CPLD, el cual minimiza el número de conexiones externas, teniendo además la ventaja de que los retardos generados en los componentes internos son muy pequeños[26].

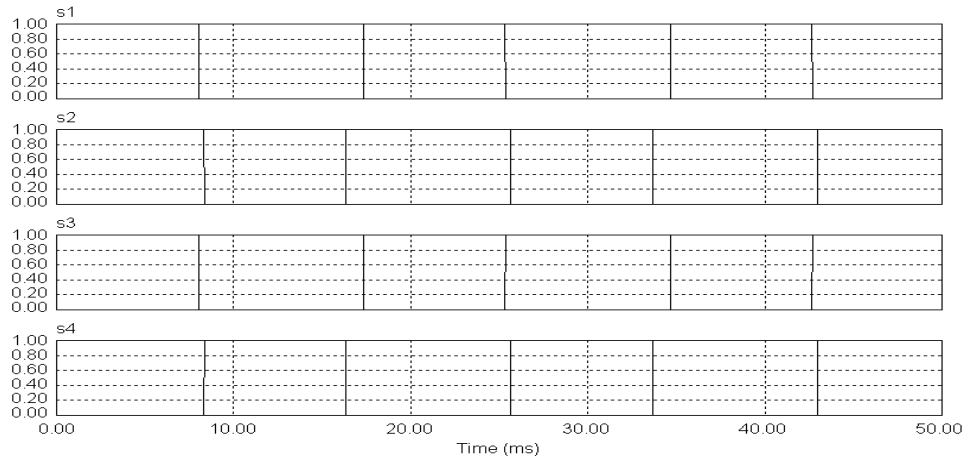


Fig.3.11. Duración de los pulsos para la conmutación sin la portadora.

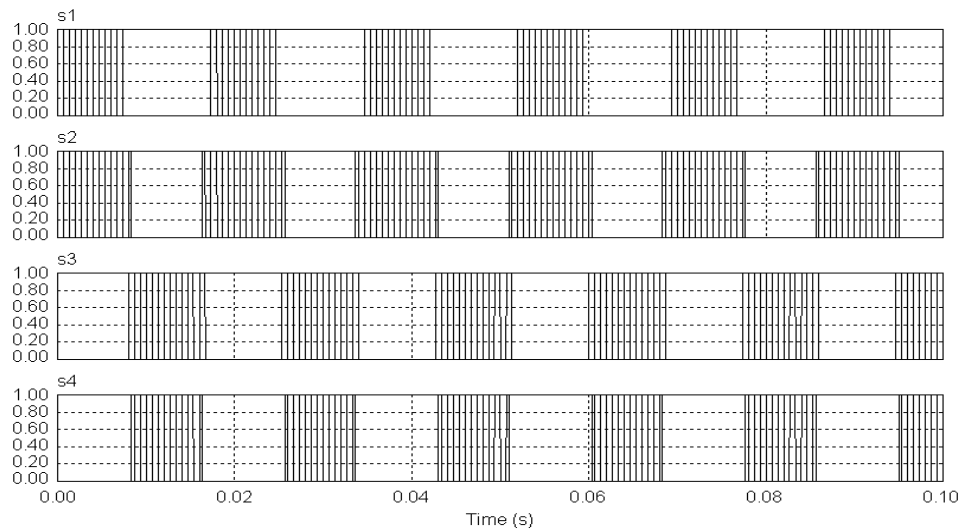


Fig.3.12. Duración de los pulsos para la conmutación con la portadora.