

CAPITULO 1

ANÁLISIS DEL CONVERTIDOR CD/CA PARA UNA CARGA NO LINEAL

1.1 Introducción

En pequeños sistemas de generación de energía, el convertidor de CD/CA es usualmente la interfase entre la fuente primaria de energía (p.e. un banco de baterías, módulos fotovoltaicos, etc.) y la carga no lineal [12].

Las funciones de un inversor o convertidor CD/CA son las siguientes:

Estos convierten un voltaje de CD, variable o no, aun voltaje fijo o variable de CA tanto en amplitud y frecuencia.

Aseguran una señal de salida con una baja Distorsión Armónica Total (TDH), baja desviación de frecuencia y voltaje [5].

Protegen a sistemas de generación de potencia eléctrica de valores anormales de voltaje, corriente, frecuencia y temperatura. Se puede incluir el aislamiento eléctrico si es necesario.

Se obtiene una alta eficiencia del sistema, lo cual se logra con un control óptimo del flujo de energía.

Las aplicaciones de los convertidores pueden ser en motores donde se requiere controlar su frecuencia y tensión de salida cuando éstas deban ser variables.

En sistemas de alimentación ininterrumpibles, su aplicación es para que la frecuencia y la tensión de salida sean fijas.

En filtros activos, para reducir distorsiones en la red eléctrica y mejorar la forma de onda de la tensión de línea. Estos son importantes por su amplia utilización, sin embargo, presentan ciertas limitantes debido a los dispositivos semiconductores y a las técnicas de modulación empleadas en estos [13] [14] [15].

A continuación se hace una breve explicación del comportamiento de las dos etapas del convertidor CD/CA, se explica el comportamiento teórico del

convertidor Push-Pull, del inversor puente completo y de las técnicas de modulación del convertidor de CD/CA.

1.2 Convertidor Push-Pull

Un convertidor CD/CD que proporciona aislamiento por medio de un transformador es el convertidor Push-Pull de la Figura 1.1a. En este convertidor la inductancia magnetizante del transformador no se considera como un parámetro de diseño, así es que para analizar este circuito se supone que el transformador es ideal [1] [4].

Los interruptores Sw_1 y Sw_2 se activarán y desactivarán siguiendo la secuencia de conmutación de la Figura 1.1 b. Para comenzar el análisis, se estudia el circuito con cada uno de los interruptores cerrados y después con los dos interruptores abiertos.

Interruptor Sw_1 cerrado

Al cerrar Sw_1 se establece una tensión en el devanado primario P_1 de valor

$$v_{p1} = V_s \quad (1.1)$$

La tensión en P_1 se transformará en los otros tres devanados, con lo que se obtiene

$$v_{s1} = V_s \left(\frac{N_s}{N_p} \right)$$

$$v_{s2} = V_s \left(\frac{N_s}{N_p} \right)$$

$$v_{p2} = V_s \quad (1.2)$$

$$v_{sw2} = 2V_s$$

El diodo D_1 está directamente polarizado, el diodo D_2 está polarizado en inversa y

$$v_x = v_{s2} = V_{s2} \left(\frac{N_s}{N_p} \right)$$

$$v_{Lx} = v_x - V_o = V_s \left(\frac{N_s}{N_p} \right) - V_o \quad (1.3)$$

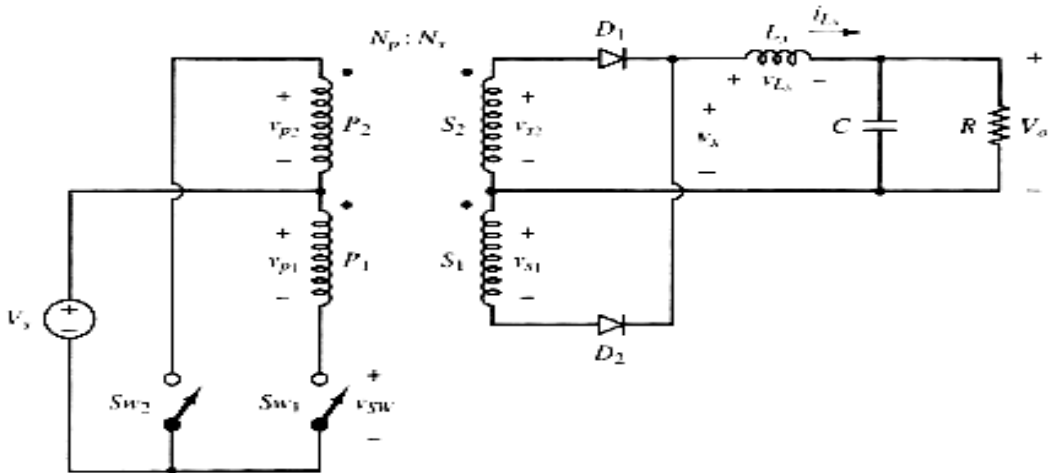


Figura 1.1 (a) Convertidor Push-Pull [4].

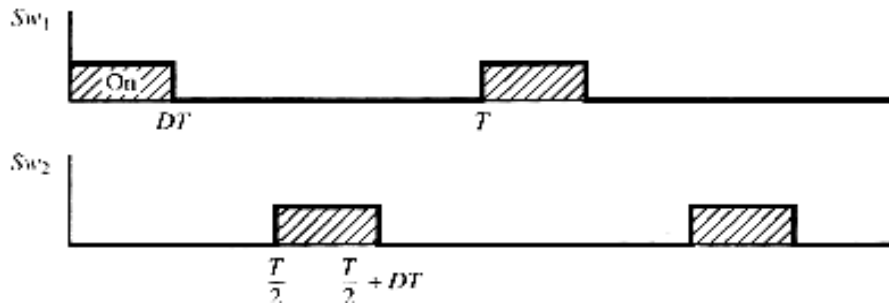


Figura 1.1 (b) Secuencia de conmutación [4].

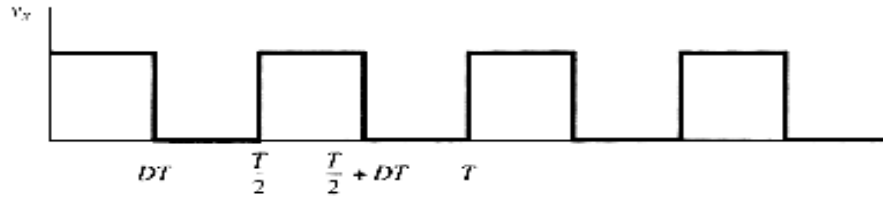


Figura 1.1 (c) Tensión v_x [4]

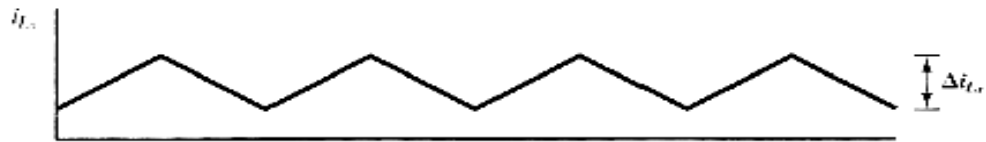


Figura 1.1 (d) Corriente en L_x . [4]

Suponiendo que la tensión de salida V_o es constante, la tensión en L_x es constante y reproduce un aumento lineal de la corriente en L_x . Cuando Sw_1 está cerrado, la variación de corriente en L_x es

$$\frac{\Delta i_{L_x}}{\Delta t} = \frac{\Delta i_{L_x}}{DT} = \frac{V_s \left(\frac{N_s}{N_p} \right) - V_o}{L_x}$$

$$(\Delta i_{L_x})_{\text{cerrado}} = \left(\frac{V_s \left(\frac{N_s}{N_p} \right) - V_o}{L_x} \right) DT \quad (1.4)$$

Interruptor SW_2 cerrado

Al cerrar Sw_2 se establece una tensión en el devanado primario P_2 , de valor

$$v_{p2} = -V_s \quad (1.5)$$

La tensión en P_2 se transformará en los otros tres devanados, con lo que se obtiene

$$\begin{aligned} v_{p1} &= V_s \\ v_{sw1} &= -V_s \left(\frac{N_s}{N_p} \right) \\ v_{sw2} &= -V_s \left(\frac{N_s}{N_p} \right) \\ v_{sw1} &= 2V_s \end{aligned} \quad (1.6)$$

El diodo D_2 está directamente polarizado, el diodo D_1 está polarizado en inversa y

$$\begin{aligned} v_x = -v_{x2} &= V_s \left(\frac{N_s}{N_p} \right) \\ v_{Lx} = v_x - V_o &= V_s \left(\frac{N_s}{N_p} \right) - V_o \end{aligned} \quad (1.7)$$

Que es un pulso de tensión positivo. La corriente en L_x aumenta linealmente cuando Sw_2 está cerrado y se aplica la Ecuación 1.4.

Ambos interruptores abiertos

Cuando los dos interruptores están abiertos, la corriente en los dos devanados primarios es nula. La corriente en la bobina de filtro L_x debe mantener la continuidad, por lo que los diodos D_1 y D_2 estarán directamente polarizados. La corriente de la bobina se divide uniformemente entre los devanados secundarios del transformador [2] [4]. La tensión en cada devanado secundario es nula, y

$$\begin{aligned}v_x &= 0 \\v_{L_x} &= v_x - V_o = -V_o\end{aligned}\quad (1.8)$$

La tensión en L_x es $-V_o$, por lo que se produce una disminución lineal de la corriente en variación de la corriente cuando están abiertos los dos interruptores es

$$\frac{\Delta i_{L_x}}{\Delta t} = \frac{\Delta i_{L_x}}{\frac{T}{2} - DT} = \frac{V_o}{L_x}\quad (1.9)$$

Resolviendo para hallar Δi_{L_x}

$$(\Delta i_{L_x})_{\text{abierto}} = -\left(\frac{V_o}{L_x}\right)\left(\frac{1-D}{2}\right)T\quad (1.10)$$

Como la variación neta de la corriente en la bobina en un periodo debe ser nula en T_1 permanente,

$$(\Delta i_{Lx})_{\text{cerrado}} + (\Delta i_{Lx})_{\text{abierto}} = 0 \quad (1.11)$$

$$\left(\frac{V_s \left(\frac{N_s}{N_p} \right) - V_o}{L_x} \right) DT + \left(\frac{V_o}{L_x} \right) \left(\frac{1}{2} - D \right) T = 0 \quad (1.12)$$

Calculando V_o ,

$$V_o = 2 V_s \left(\frac{N_s}{N_p} \right) D \quad (1.13)$$

Siendo D el ciclo de trabajo de cada interruptor. En el análisis anterior se ha supuesto que la corriente en la bobina es permanente. El rizado de salida del convertidor Push-Pull es

$$\frac{\Delta V_o}{V_o} = \frac{1 - 2D}{32 * Lx * C * f^2} \quad (1.14)$$

En el análisis anterior se ha despreciado la inductancia magnetizante del transformador.

Si se incluye L_m en el circuito equivalente, la corriente i_L aumentará linealmente cuando este cerrado Sw_1 , fluirá sin variar su valor cuando estén abiertos Sw_1 y Sw_2 y decrecerá linealmente cuando esté cerrado Sw_2 . Como Sw_1 y Sw_2 están cerrados a intervalos iguales, la variación neta de i_{Lm} es nula y se desmagnetiza en cada periodo el núcleo del transformador en el caso ideal [2] [4].

1.3 Topologías Inversoras

El objetivo de un convertidor de potencia CD/CA ver figura 1.2 es obtener una tensión de salida senoidal a una frecuencia dada, partiendo de una tensión de CD (bus de salida continua).

El funcionamiento consiste en trocear la tensión de continua de una forma predeterminada, por lo que se hace necesaria la utilización de filtros pasivos para conformar una tensión de salida senoidal [3] [6].

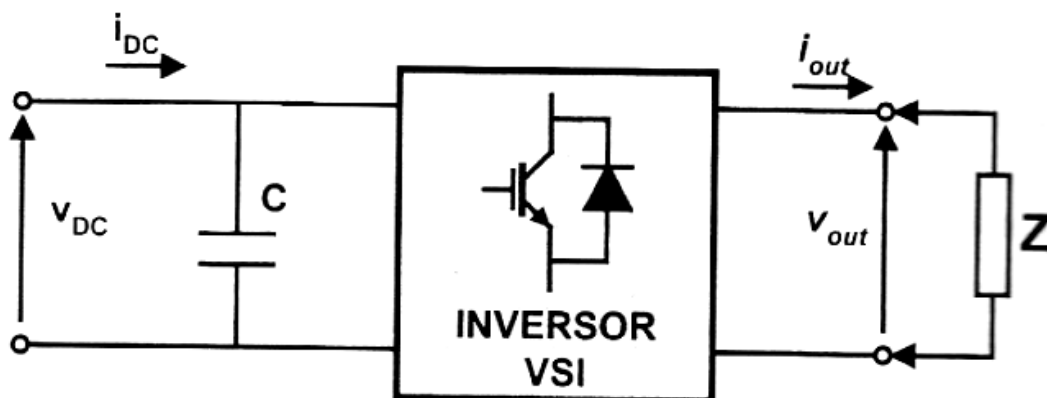


Figura 1.2 Convertidor de CD/CA [6]

En el caso de un inversor monofásico con una carga RL a la salida, la corriente va con retraso con respecto de la tensión, tal como se observa en la figura 1.3.

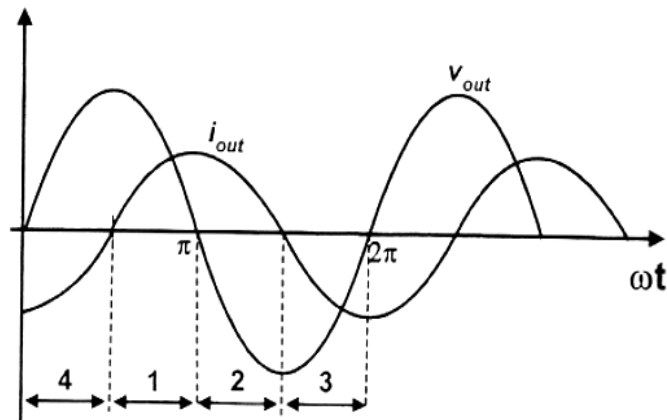


Figura 1.3 Desfasamiento de la corriente con respecto de la tensión con una carga RL [6]

4.1.1 Inversor Medio Punte

El Inversor con tensión de salida fija más sencillo es el monofásico de onda cuadrada con toma media (half bridge), cuya configuración se muestra en la figura

1.4.

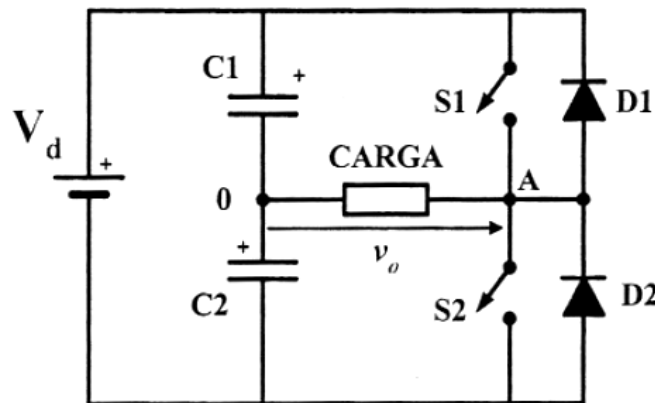


Figura 1.4 Inversor Monofásico de onda cuadrada con toma media (half bridge) [6].

La fuente de tensión de continua V_d mantiene los condensadores C_1 y C_2 cargados a una tensión igual a $V_d/2$. El funcionamiento de este convertidor es muy simple ya que sólo existen dos interruptores controlados S_1 y S_2 que conmutan alternativamente:

Si el interruptor S_1 está en "ON" y el S_2 en "OFF", el condensador C_1 se conecta a través de S_1 a la carga, aplicándole una tensión de valor $V_{AO}=V_{C1}= +V_d/2$.

Si el interruptor S_1 está en "OFF" y el S_2 en "ON", el condensador C_2 se conecta a través de S_2 a la carga, aplicándole una tensión de valor $V_{AO}=V_{C2}= -V_d/2$.

La señal de salida que se obtiene en la carga es una señal alternada de valor máximo $+V_d/2$ y valor mínimo $-V_d/2$, cuya representación gráfica se puede observar en la figura 1.5:

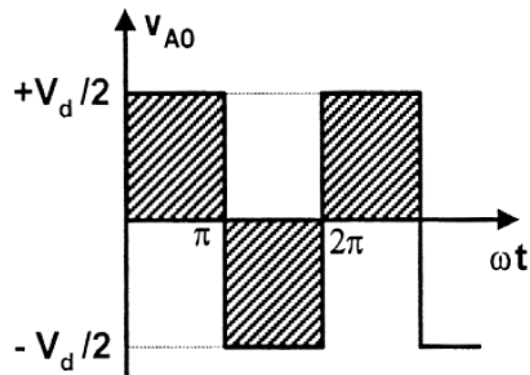


Figura 1.5 La señal alternada de salida obtenida en la salida del Inversor con la carga RL [6].

Los diodos D1 y D2 actúan como diodos de libre circulación (diodos volantes) cuando la carga tiene una parte de componente inductiva, evitando la aparición de sobretensiones en los interruptores controlados (S_1 , S_2) cuando pasa a circuito abierto y existe energía almacenada en la parte inductiva de la carga [5] [6].

Los parámetros característicos que definen la calidad de la tensión de salida en los inversores son los siguientes:

Factor Armónico del n-ésimo armónico (HF_n). Este mide la aportación ideal de cada uno de los armónicos a la señal de salida, viene expresada por:

$$HF_n = \frac{V_{A0n}}{V_{A01}} \quad (1.15)$$

Donde:

V_{A01} : Valor eficaz de la componente fundamental ($n= 1$).

V_{A0n} : Valor eficaz de la componente armónica(n).

Distorsión Armónica Total (THD). Esta mide la relación entre el valor de la tensión fundamental con el valor del resto de los armónicos. Viene expresada por:

$$THD = \frac{1}{V_{A01}} \sqrt{\sum_{n=3,5,7,\dots}^{\alpha} V_{A0n}^2} \quad (1.16)$$

Factor de Distorsión (DF). Este mide el nivel de cada componente armónica con respecto al nivel de la componente fundamental, viene expresada por:

$$DF = \frac{1}{V_{A01}} \sqrt{\sum_{n=3,5,7,\dots}^{\alpha} \left(\frac{V_{A0n}}{n^2} \right)^2} \quad (1.18)$$

La Distorsión de una componente armónica viene expresada por:

$$DF_n = \frac{V_{A0n}}{V_{A01} * n^2} \quad (1.19)$$

Estos parámetros que definen la tensión de salida y sirven para evaluar la calidad de la tensión de salida con respecto a una tensión/corriente senoidal [5].

4.3.2 Inversor Puentes Completo

En el caso de tener un inversor de onda cuadrada en la topología Puente Completo (Full - Bridge), cuyo esquema eléctrico es el mostrado en la figura 1.6

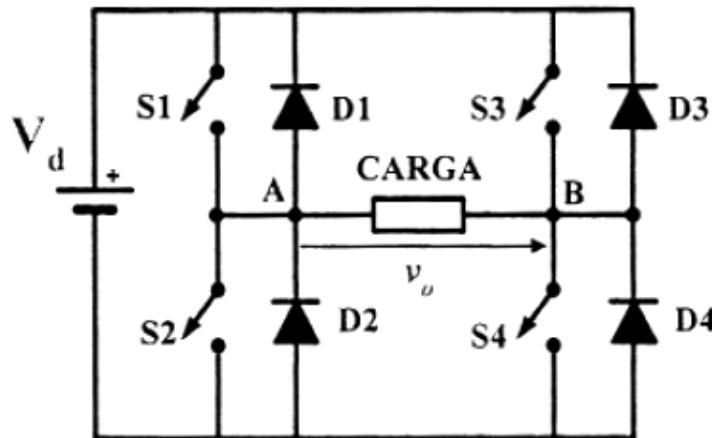


Figura 1.6. Inversor de onda cuadrada en Topología Puente Completo [6]

Se denomina "rama" al tipo de conexión de los interruptores S_1 y S_2 que conmutan alternativamente, por lo que nunca están en circuito cerrado simultáneamente, por lo tanto en este tipo de topología existen dos ramas (Rama #1: $S_1 - S_2$ y Rama #2 $S_3 - S_4$) [5] [6].

El funcionamiento de este convertidor consiste en conmutar, siguiendo una secuencia determinada, los cuatro interruptores controlados S_1 , S_2 , S_3 y S_4 . Las posibles conmutaciones que se puede establecer son las siguientes:

Si S_1 y S_4 están en "ON" y S_2 y S_3 están en "OFF". Aplicando a la carga una tensión de valor $v_{AB} = +V_d$, durante un intervalo de tiempo igual a medio periodo.

Si S_1 y S_4 están en "OFF" y S_2 y S_3 están en "ON". Aplicando a la carga una tensión de valor $v_{AB} = -V_d$, durante un intervalo de tiempo igual a medio periodo.

La señal de salida que se obtiene en la carga es una señal alternada de valor máximo $+V_d$ y valor mínimo $-V_d$, cuya representación gráfica se presenta en la figura 1.7.

A igual que en el inversor medio puente, los diodos $D1$, $D2$, $D3$ y $D4$, actúan como diodos de libre circulación (diodos volantes) cuando la carga tiene una parte de componente inductiva evitando la aparición de sobretensiones en los interruptores controlados [1] [6].

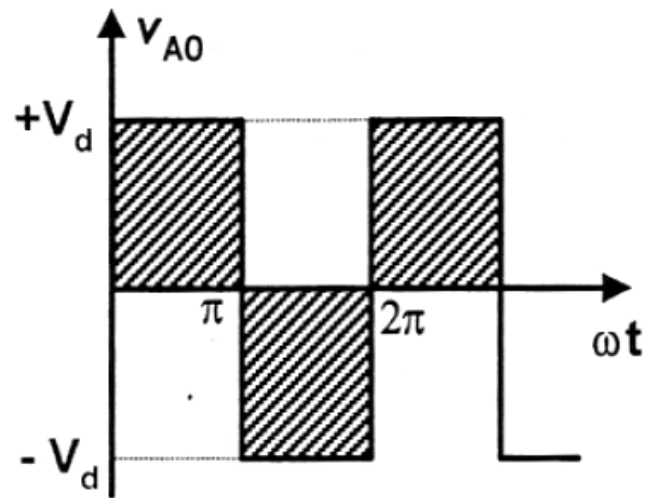


Figura 1.7. La señal de salida que se obtiene en la carga es una señal alternada en Topología Puente Completo [6]

1.4 Técnicas de Control de Inversores Monofásicos

En el siguiente apartado se detallan algunas técnicas de modulación utilizadas en el control escalar de inversores, entre las que se destacan están las siguientes:

- Modulación por Desplazamiento de Fase.
- Modulación en Anchura de un Pulso por Semiperíodo.
- Modulación en Anchura de varios Pulsos por Semiperíodo.
- Modulación Senoidal (SPWM).

Por simplicidad, se van a explicar las anteriores técnicas de modulación aplicadas a inversores monofásicos. La sección de potencia utilizada para los inversores monofásicos responde al esquema mostrado en la figura 1.8 [6]:

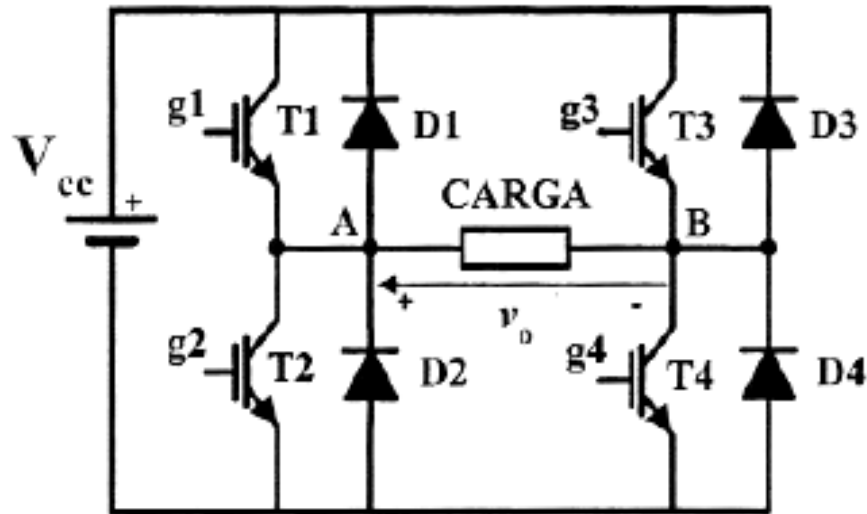


Figura 1.8. Esquema de la Topología Puente Completo para su control [6].

Se enumeran las características básicas de todas las técnicas de modulación, dedicando un apartado especial a la modulación senoidal (SPWM) aplicada a inversores monofásicos, dada su importancia y la frecuencia con que se usa en aplicaciones de elevada potencia [3] [6].

1.4.1 Modulación de Ancho de Pulso

Se aplica un control de la tensión de salida mediante la variación del ancho de un pulso por semiperiodo.

En un inversor monofásico se obtienen las señales de control mediante la comparación de una señal de referencia rectangular v_{ref} cuya amplitud es V_{ref} y una

onda triangular v_{Tri} cuya amplitud es V_{Tri} . La salida de dicha comparación activará el circuito de excitación del inversor.

La frecuencia de la señal de referencia determina la frecuencia de la tensión de salida. Para variar el valor de la tensión de salida se realiza mediante la variación de la amplitud de la de referencia (V_{ref}) la cual determina la variación del ancho del pulso δ desde un valor mínimo de 0° hasta un valor máximo de 180° . Se denomina índice modulación de amplitud (m_a) a la relación existente entre la amplitud de la señal de referencia y la señal triangular [3] [6]:

$$m_a = \frac{\hat{V}_{ref}}{\hat{V}_{tri}} \quad (1.20)$$

En la figura 1.9 se muestra la señal de referencia utilizada (señal rectangular) y la señal triangular.

A partir de la comparación de dichas señales se obtienen las señales de control de los interruptores ($V_{g1,4}$ y $V_{g2,3}$) que producen una tensión en extremos de la carga (v_o) tal como se muestra en la parte inferior de dicha figura.

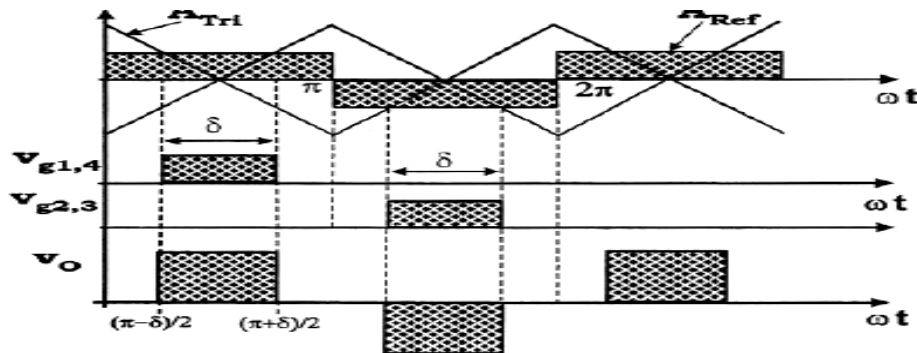


Figura 1.9. Señal es de referencia utilizada (señal rectangular) y la señal triangular. Obteniéndose las señales de control de los interruptores ($V_{g1,4}$ y $V_{g2,3}$) [3].

Esta técnica de modulación de la anchura de un pulso por semiperiodo es sencilla de implementar, aunque presenta el inconveniente de que el ancho de pulso controla simultáneamente la tensión eficaz y la posible reducción/eliminación de una componente armónica. El armónico dominante es el tercer armónico y el factor de distorsión armónica aumenta mucho cuando el índice de modulación de amplitud tiende a cero ($m_a \rightarrow 0$) [3] [5] [6].

1.4.2 Modulación de varios anchos de pulso

El control de la tensión de salida se obtiene mediante la variación del ancho de varios pulsos en cada semiperiodo. En un inversor monofásico se obtienen las señales de control mediante la comparación de una señal de referencia rectangular en cada semiciclo, cuya amplitud es V_{ref} y una onda triangular, cuya amplitud es V_{tri} [3] [6]

La salida de dicha comparación activará el circuito de excitación del inversor. La frecuencia de la señal de referencia f_{ref} determina la frecuencia de la tensión de salida y la frecuencia de la señal triangular f_{tri} determina el número de pulsos "p" por semiciclo.

$$p = \frac{f_{tri}}{2 * f_{ref}} \quad (1.21)$$

Para variar el valor de la tensión de salida se realiza mediante la variación de la amplitud de la señal de referencia (V_{ref}) la cual determina la variación del ancho de los pulsos δ desde un valor mínimo de 0° hasta un valor máximo de 180° .

Haciendo variar la tensión de salida desde 0 voltios hasta la tensión máxima de salida.

A partir de la sección de potencia igual al caso anterior, las señales de control de esta técnica de modulación son las que se muestran en la figura 1.10 a continuación:

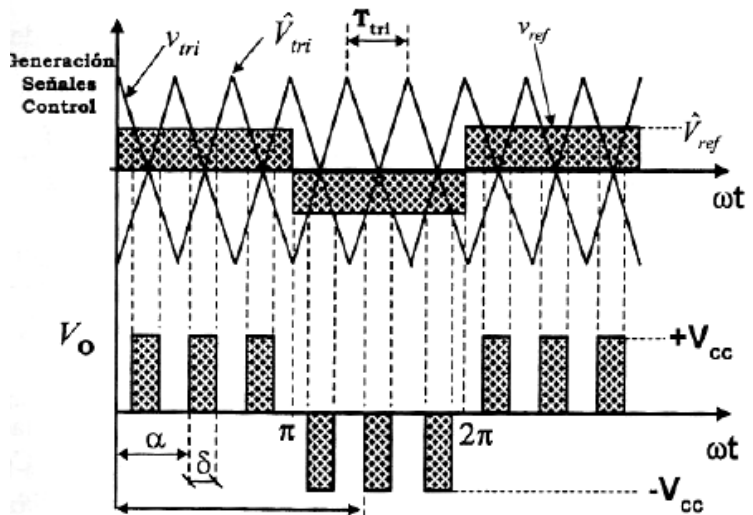


Figura 1.10. Señales de control de esta técnica de modulación anchura de varios pulsos por semiperiodo [3].

El número de pulsos totales a contabilizar (p) depende de la relación entre la frecuencia de la señal triangular y la frecuencia de salida deseada. Con la "m" se

indica el orden del pulso en cada semiciclo y dicho valor varía entre 1 y "p", que corresponde al número máximo de pulsos.

Esta técnica de modulación por anchura de varios pulsos es sencilla en el diseño del circuito de control aunque como en la anterior, el ancho de pulso controla simultáneamente la tensión eficaz y la reducción del armónico además de presentar un aumento de los armónicos de orden bajo [3] [6].

Respecto a la producción de armónicos de esta técnica de control, se puede justificar los modos de control PWM mediante el resultado de la división f_{tri}/f_{ref} , en tres tipos:

- Modo síncrono PWM.
- Modo asíncrono PWM.
- Modo conmutación PWM.

En el Modo Síncrono PWM el resultado de f_{tri}/f_{ref} es un valor entero. Es decir, coincide el paso por cero de la señal triangular con el paso por cero de la señal referencia, tal como se muestra en la figura 1.11.



Figura 1.11. Señales de Modo Síncrono PWM [6]

En el Modo Asíncrono PWM el resultado de f_{tri}/f_{ref} es un valor no entero, planteándose una situación como la reflejada en la figura siguiente. Aparecen componentes armónicas de orden par debido a la asimetría en el número de ciclos de la portadora.

También aparecen subarmónicos (frecuencias menores que la componente fundamental) ver figura 1.12.



Figura 1.12. Señales de Modo Asíncrono PWM [6]

En el Modo Conmutación PWM las componentes armónicas aparecen debido a la conmutación de los semiconductores a la frecuencia de la señal triangular. Aparecen componentes armónicas a la frecuencia de la señal triangular y además también sus múltiplos en sus bandas laterales.

Así, por ejemplo, si se trabaja con una señal triangular (frecuencia de conmutación) de 10 kHz, se obtienen armónicos a 10 kHz, 20 kHz y sus múltiplos con sus bandas laterales, tal como se aprecia en la figura 1.13 [6].

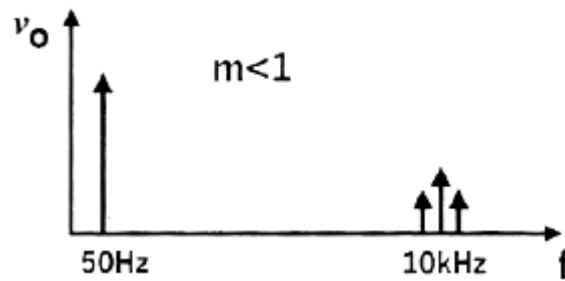


Figura 1.13. Señales de Modo Conmutación PWM [6]

1.4.3 Modulación Senoidal del Ancho de Pulso (SPWM)

El control de la tensión de salida se efectúa mediante la variación del ancho de varios pulsos por semiperiodo con una separación variable entre los pulsos. En un inversor monofásico se obtienen las señales de control mediante la comparación de una señal senoidal que actúa como señal de referencia, cuya amplitud es V_{ref} y de frecuencia f_{ref} y una señal triangular, cuya amplitud es V_{tri} y de frecuencia f_{tri} la cual mantiene constante su amplitud [3] [6].

El resultado de dicha comparación activará el circuito de excitación del inversor. La frecuencia de la señal de referencia es constante y determina la frecuencia de la tensión de salida y la frecuencia de la señal triangular determina el número de pulsos "p" por semiciclo [5].

La variación de la tensión de salida desde los 0 voltios hasta la tensión máxima de salida se realiza mediante la variación de la amplitud de la señal senoidal de referencia (v_{ref}), la cual determinan la variación del ancho de los pulsos o desde un

valor mínimo de 0° hasta un valor máximo que depende de la relación entre la frecuencia de la señal de referencia y la de la señal triangular (índice de modulación de frecuencia) y que también depende de la relación entre las amplitudes de las dos señales citadas (índice de modulación de amplitud) [5] [6].

Las señales de control típicas de esta técnica de modulación se muestran en la figura 1.14.

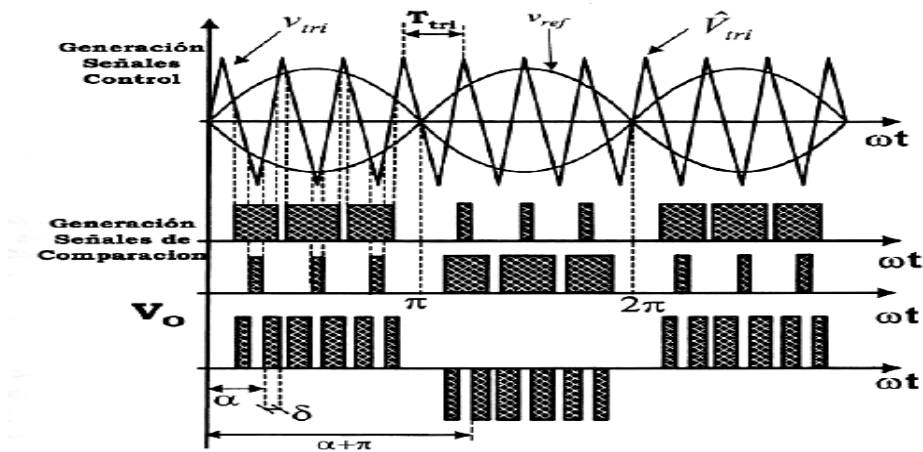


Figura 1.14. Señales de control típicas de Modulación senoidal del ancho de pulso [6]

El valor eficaz de la tensión salida viene dado por:

$$V_{0(RMS)} = V_{cc} * \sqrt{\sum_{n=1}^p \frac{\delta_m}{\pi}} \quad (1.22)$$

El valor instantáneo de la tensión de salida se obtiene aplicando el desarrollo en Serie de Fourier a la función de salida y es de la forma:

$$V_0(t) = \sum_{n=1,3,5,\dots}^{\infty} b_n \text{sen}(n\omega t) \quad (1.23)$$

La modulación SPWM presenta una menor distorsión, además permite variar la tensión de salida sin que el contenido de armónicos cambie. El diseño del circuito de control es algo más complejo y pueden aparecer pulsos de disparo de muy corta duración [5].

1.4.4 Modulación Senoidal Modificada del Ancho de Pulso

El objetivo es la mejora de las características del control SPWM, ya que tiene el inconveniente de la escasa variación del ancho de los pulsos por semiperiodo. En un inversor monofásico se obtienen las señales de control mediante la comparación de una señal senoidal (señal de referencia) y una onda triangular.

Esta señal triangular es especial con respecto a la modulación SPWM, ya que consiste en comparar la señal triangular solamente en los primeros y últimos 60° de cada semiciclo.

La salida de dicha comparación activará el circuito de excitación del inversor. La frecuencia de la señal de referencia determina la frecuencia de la tensión de salida y la frecuencia de la portadora determina el número de pulsos "p" por semiciclo.

Con este tipo de control aumenta el valor de la componente fundamental y las características armónicas mejoran. También se reduce el número de conmutaciones en los semiconductores de potencia y por lo tanto reduce las pérdidas de conmutación [5].

La representación de las señales de comparación, señales de control de los interruptores y la señal de salida para un inversor monofásico según esta modulación MSPWM se muestran en la figura 1.15

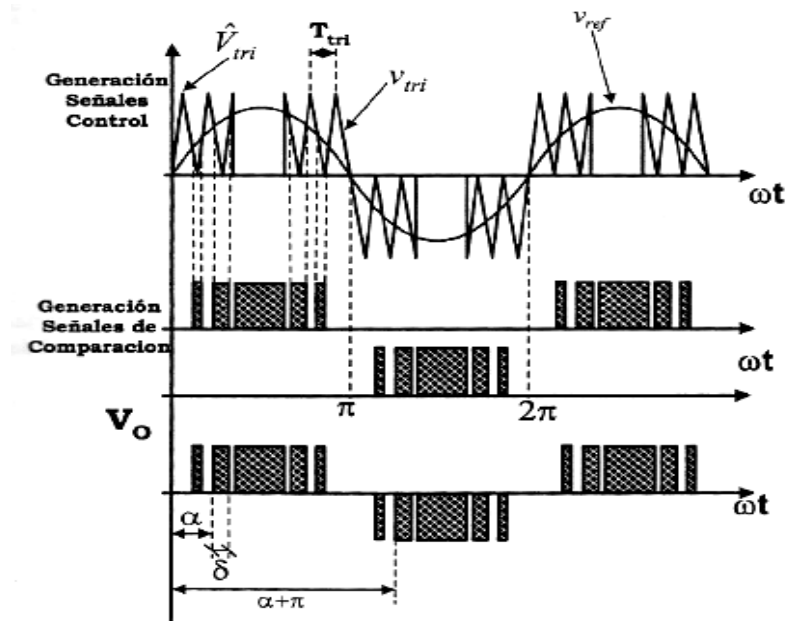


Figura 1.15. Señales de control típicas de modulación MSPWM [[6]]

Esta técnica de modulación MSPWM presenta unas características similares a la modulación SPWM. Una ventaja que presenta la modulación MSPWM es que se obtiene una tensión eficaz a la salida superior a la que se obtiene con la SPWM, aunque el circuito de control sea un poco más complejo [6].