



Capítulo 1

Fundamentos de electrónica de potencia

- Estructura de los convertidores estáticos usados como FACTS

1.2 - CONVERTIDORES CC-CA

1.2.1 - Introducción

Los convertidores CC-CA (o también llamados inversores) son destinados a controlar el flujo de energía eléctrica entre dos fuentes una continua (origen) a una fuente alterna (destino) que puede ser monofásica o polifásica.

Dependiendo de su aplicación el inversor puede ser alimentado en tensión o en corriente.

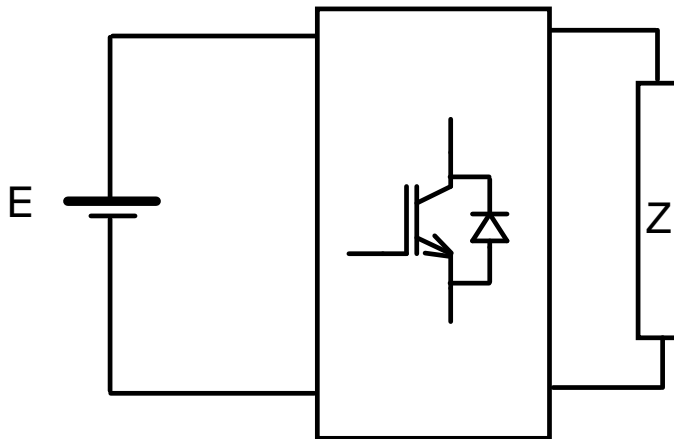


Fig. 1.15

El **inversor alimentado en tensión** es constituido por interruptores unidireccionales en tensión y bidireccionales en corriente (Fig. 1.15), para este caso la carga (Z en la Fig. 1.15) tiene que ser de naturaleza inductiva, aunque su comportamiento puede ser resistivo, capacitivo y/o inductivo.

Capítulo 1

Fundamentos de electrónica de potencia

- Estructura de los convertidores estáticos usados como FACTS

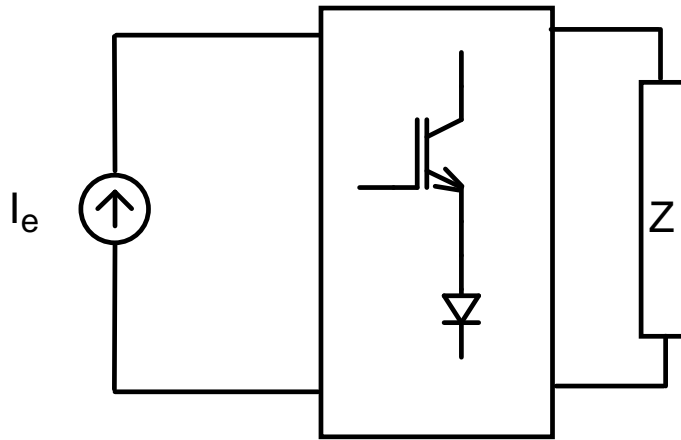


Fig. 1.16

El **inversor alimentado en corriente** es constituido por interruptores unidireccionales en corriente y bidireccionales en tensión (Fig.1.16), para este caso la carga (Z) tiene que ser de naturaleza capacitiva, aunque su comportamiento puede ser resistivo, capacitivo y/o inductivo.

Los inversores anteriormente mostrados no necesitan de los diodos cuando su carga es resistiva. No obstante, cuando sus cargas son impedancias se hace necesario los mismos, es decir, para el inversor alimentado en tensión es necesario el diodo en antiparalelo cuando su carga es inductiva y no funciona con cargas de naturaleza capacitivas. En el caso del inversor alimentado en corriente es necesario el diodo en serie con el interruptor cuando su carga es capacitiva y no funciona con cargas de naturaleza inductivas.

Capítulo 1

Fundamentos de electrónica de potencia

- Estructura de los convertidores estáticos usados como FACTS

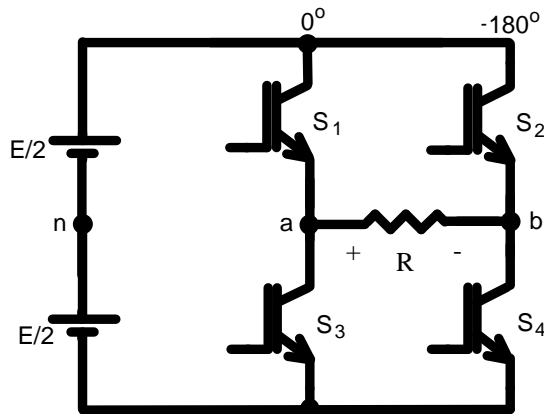


Fig. 1.17

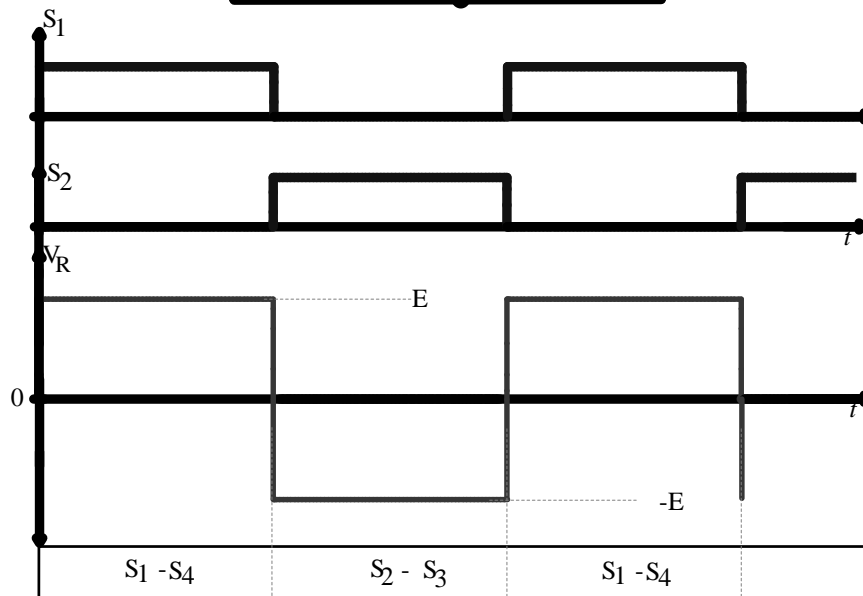
1.2.2 - Inversor monofásico puente completo alimentado en tensión

a) - Carga resistiva

Este inversor es mostrado en la Fig. 1.17 los interruptores son comandados con el cierre y la abertura sincronizada de los interruptores.

El principio de funcionamiento es el siguiente: cuando S_1 y S_4 conducen, el tensión de carga es igual a E , cuando S_2 y S_3 conducen el tensión se torna igual a $-E$.

La forma de onda para carga resistiva es mostrada en la Fig. 1.18. En esta estructura se cumple la denominada ley de brazo, es decir, S_1 es siempre complementario a S_3 y S_2 a S_4 .



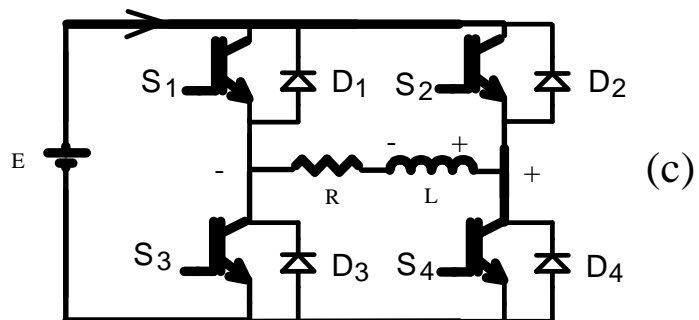
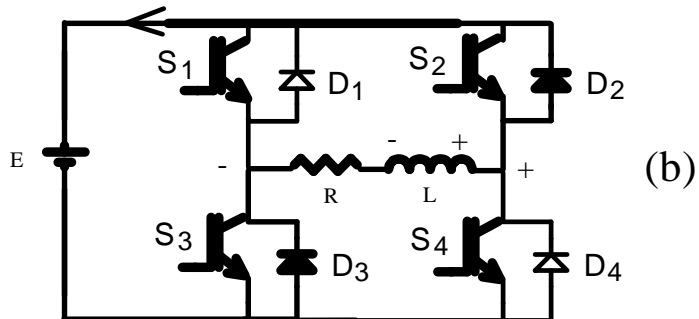
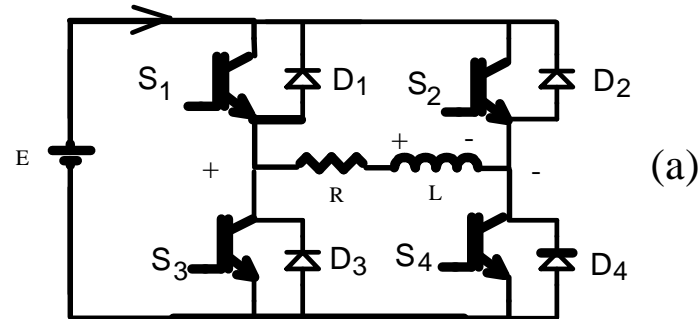
HABILITADO

Fig. 1.18

Capítulo 1

Fundamentos de electrónica de potencia

- Estructura de los convertidores estáticos usados como FACTS



b) - Carga inductiva

Si la carga fuese inductiva, deben ser adicionados los diodos de circulación libre D_1, D_2, D_3 y D_4 como están representados en la Fig. 1.19, donde también aparecen las cuatro etapas de funcionamiento de la estructura.

Para que el circuito funcione correctamente, para los casos en que la carga es inductiva, es necesario que la fuente E sea reversible en corriente, esto se debe a la regeneración de energía que se da en dos de las etapas.

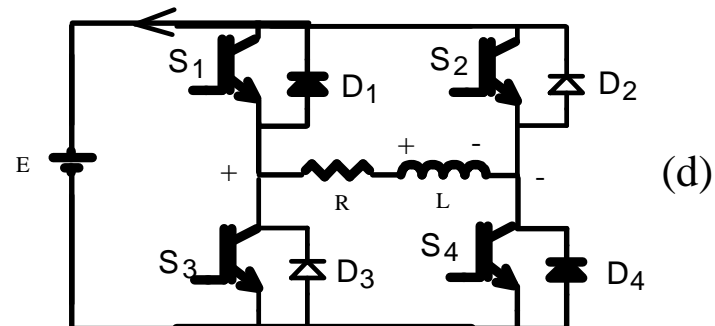
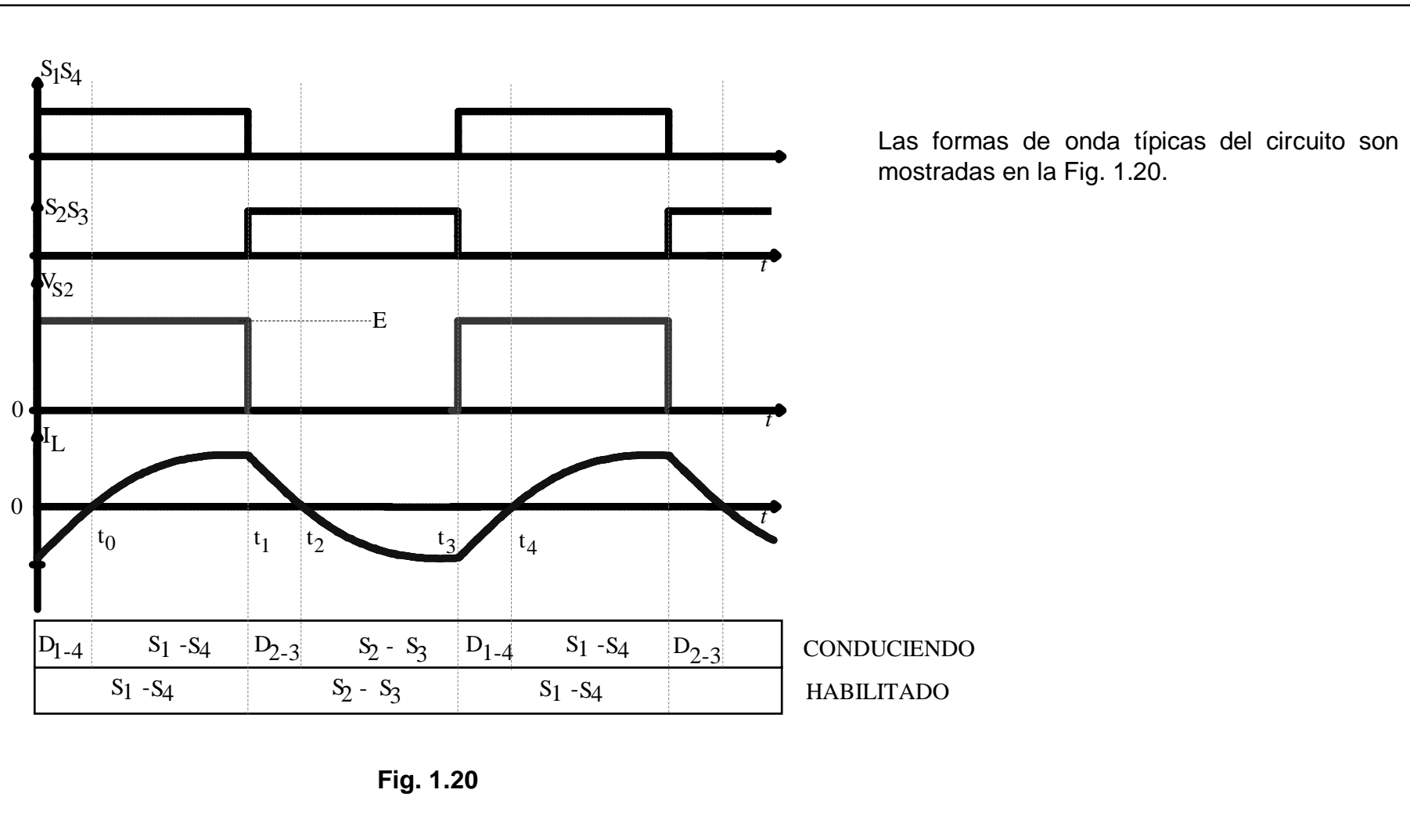


Fig. 1.19

Capítulo 1

Fundamentos de electrónica de potencia

- Estructura de los convertidores estáticos usados como FACTS



Capítulo 1

Fundamentos de electrónica de potencia

- Estructura de los convertidores estáticos usados como FACTS

1.2.3 - Inversor trifásico alimentado en tensión

La estructura del inversor trifásico es mostrado por la Fig. 1.21. El cual esta compuesto por:

S_1, S_2, S_3, S_4, S_5 y S_6 - Interruptores comandados
 D_1, D_2, D_3, D_4, D_5 y D_6 - Diodos de regeneración
 E - Fuente de alimentación
 R y L - Carga

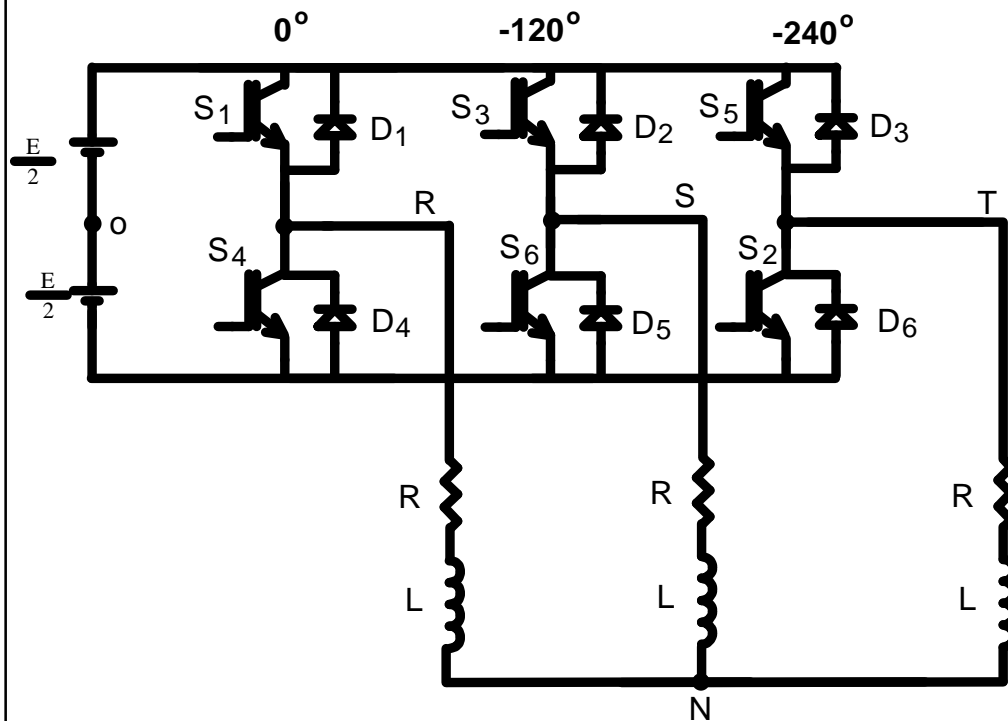


Fig. 1.21

Capítulo 1

Fundamentos de electrónica de potencia

- Estructura de los convertidores estáticos usados como FACTS

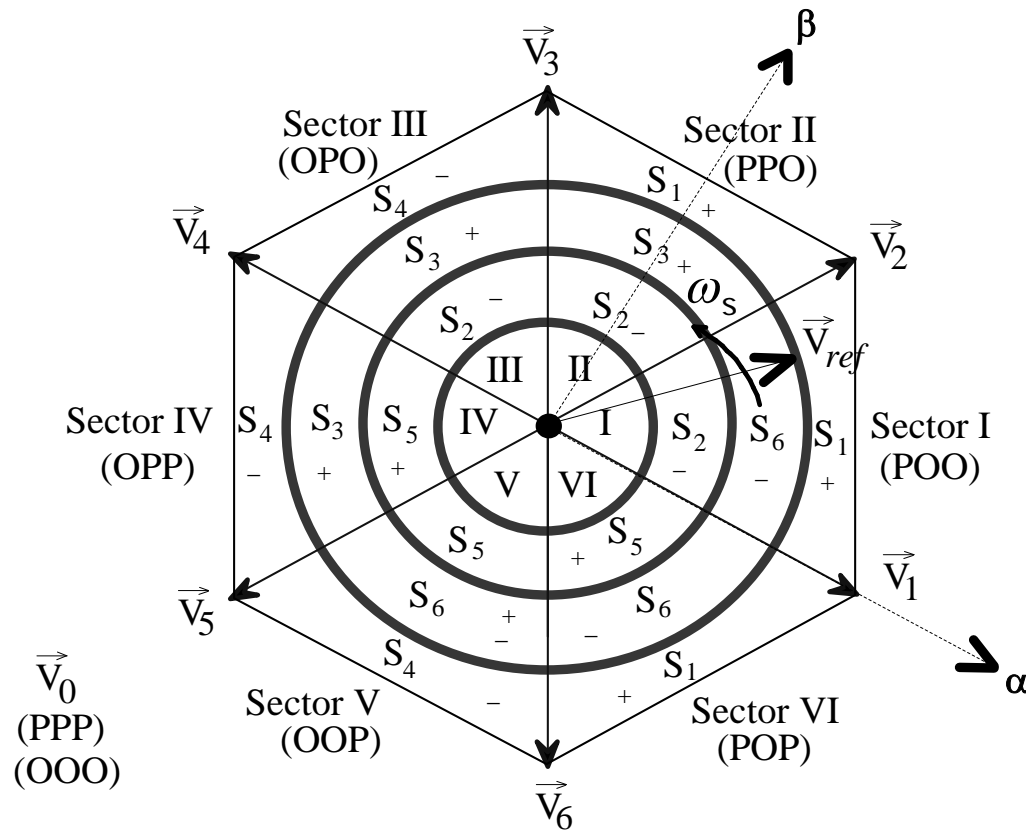


Fig. 1.22

Los interruptores son comandados según el diagrama representado en la Fig. 1.22, el cual representa todos los posibles estados de conmutación.

Cada interruptor se mantiene habilitado durante 180° . En cada instante existen 3 interruptores en conducción 2 en el grupo positivo (+) y 1 en el grupo negativo (-) o viceversa. El estado de conmutación 'P' (o también 1) denota que el interruptor superior de un brazo del inversor está en 'on' y la tensión (V_{an} , V_{bn} o V_{cn}) es E positivo, mientras que 'O' (o también 0) indica que el voltaje punto medio del inversor es cero debido a la conducción de algún interruptor inferior.

La Fig. 1.23 muestra los circuitos equivalentes obtenidos para estos estados de conmutación.

Capítulo 1

Fundamentos de electrónica de potencia

- Estructura de los convertidores estáticos usados como FACTS

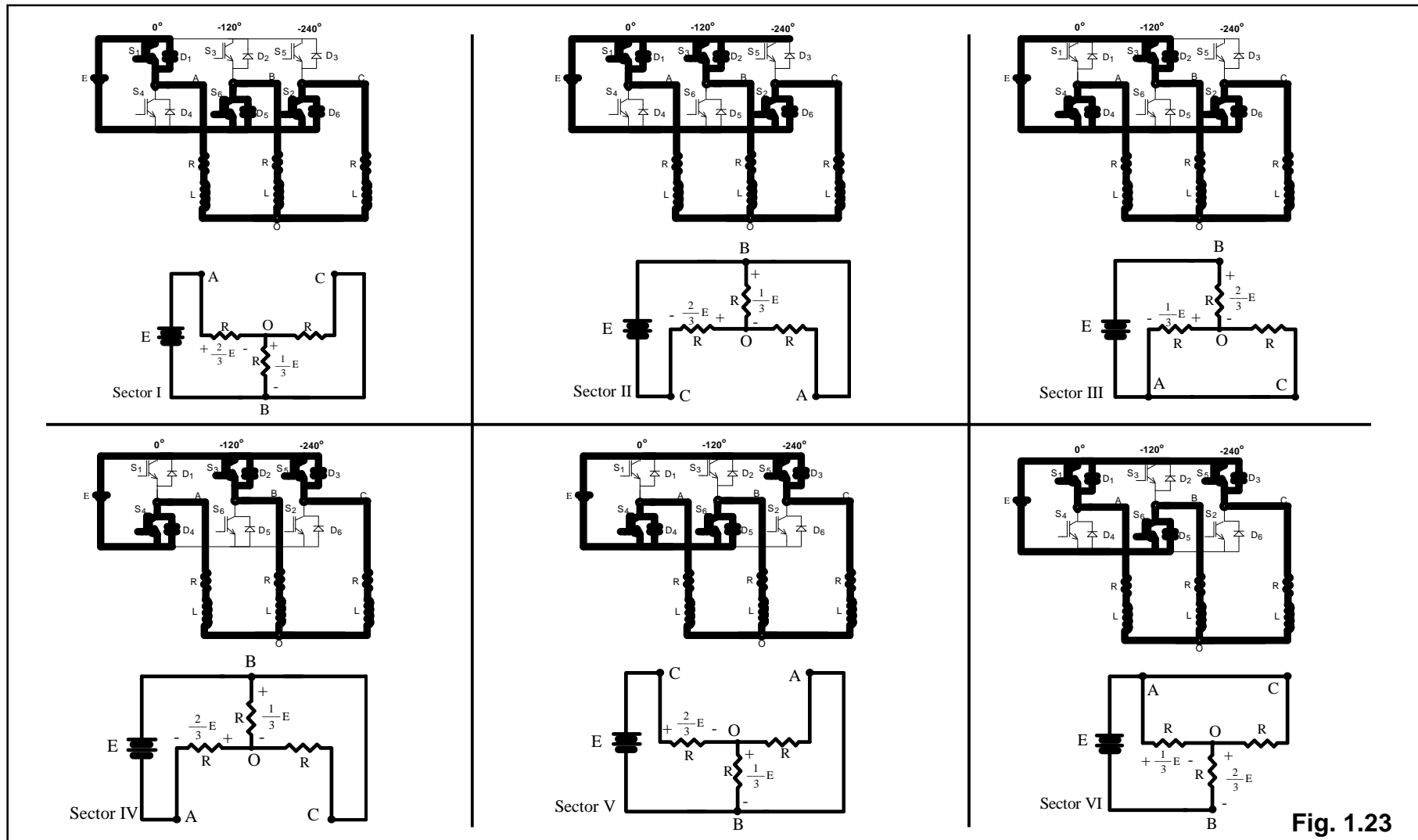


Fig. 1.23

Capítulo 1

Fundamentos de electrónica de potencia

- Estructura de los convertidores estáticos usados como FACTS

- Análisis

Sean las tensiones de línea:

$$\begin{aligned}V_{RS} &= V_{RO} - V_{SO} \\V_{ST} &= V_{SO} - V_{TO} \\V_{TR} &= V_{TO} - V_{RO}\end{aligned}\tag{1.27}$$

Aplicando LKV se tienen las siguientes relaciones:

$$\begin{aligned}V_{RN} &= V_{RO} - V_{NO} \\V_{SN} &= V_{SO} - V_{NO} \\V_{TN} &= V_{TO} - V_{NO}\end{aligned}$$

Así:

$$V_{RO} + V_{SO} + V_{TO} = V_{RN} + V_{SN} + V_{TN} + 3V_{NO}\tag{1.28}$$

Para un sistema trifásico balanceado. La siguiente relación es válida:

$$V_{RN} + V_{SN} + V_{TN} = 0\tag{1.29}$$

Donde las tensiones V_{RN} , V_{SN} , V_{TN} son las tensiones fase neutro en la carga.

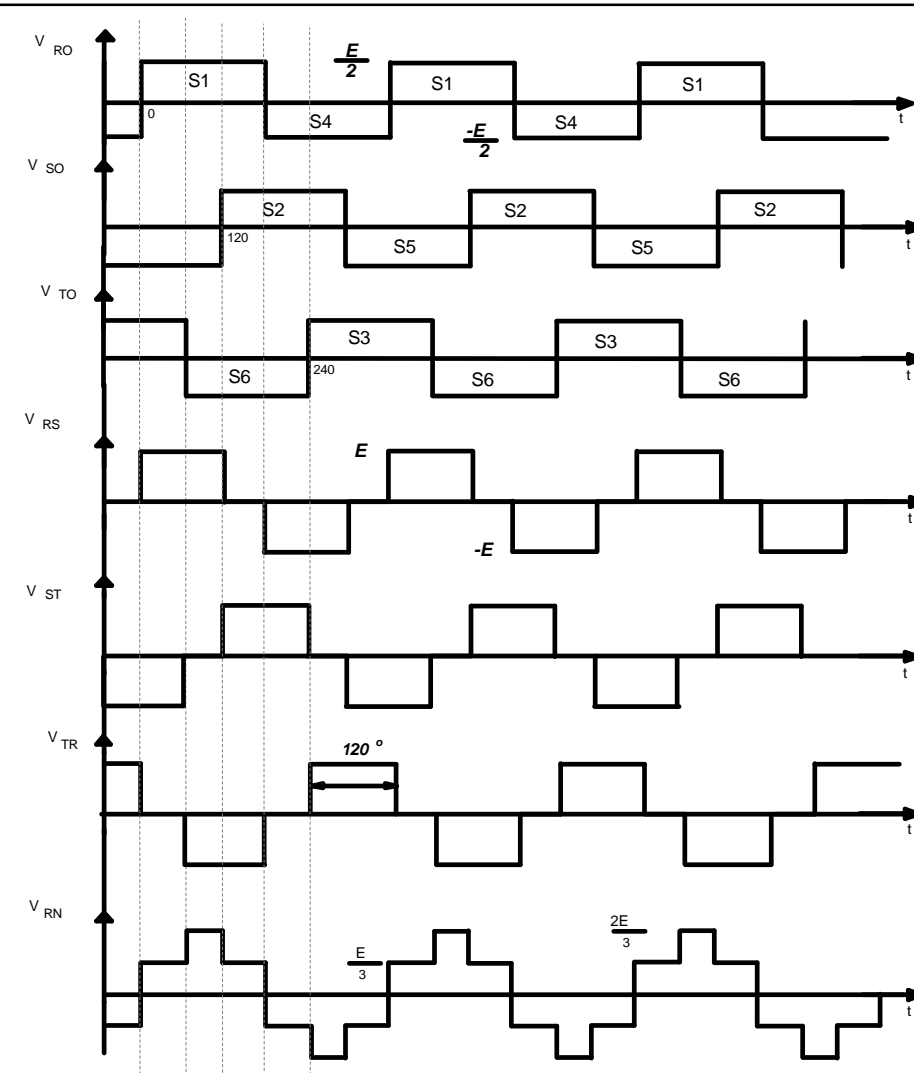
Por tanto, asumiendo que la impedancia de neutro (Z_{NO}) es infinita, la tensión modo común para este inversor es dada por:

$$V_{NO} = \frac{V_{RO} + V_{SO} + V_{TO}}{3}\tag{1.30}$$

Capítulo 1

Fundamentos de electrónica de potencia

- Estructura de los convertidores estáticos usados como FACTS



Las tensiones de carga se obtienen de las tensiones de fase representado por la relaciones siguientes:

$$V_{RN} = \frac{2}{3}V_{RO} - \frac{V_{SO} + V_{TO}}{3}$$

$$V_{SN} = \frac{2}{3}V_{SO} - \frac{V_{TO} + V_{RO}}{3} \quad (1.31)$$

$$V_{TN} = \frac{2}{3}V_{TO} - \frac{V_{RO} + V_{SO}}{3}$$

La construcción gráfica de los voltajes esta representado en la Fig. 1.24. En la figura solo es mostrada V_{RN} , pero se sabe que las tensiones V_{SN} y V_{TN} son iguales a V_{RN} desfasado de ella en 120° y 240° respectivamente.

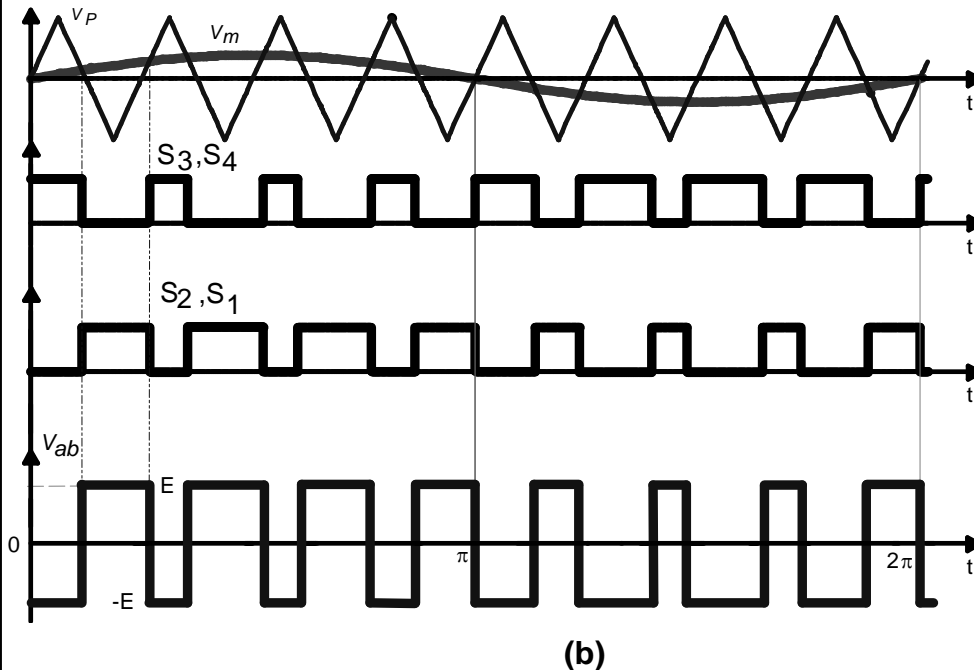
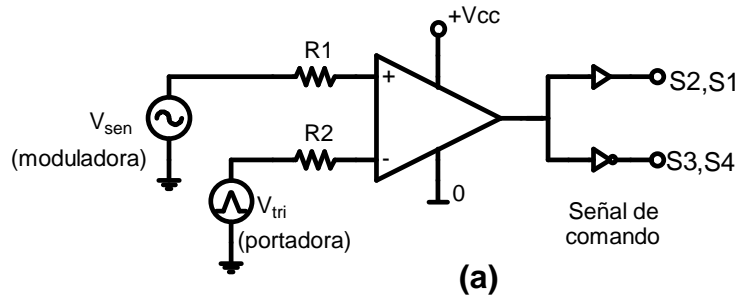
Fig. 1.24

Capítulo 1

Fundamentos de electrónica de potencia

- Estructura de los convertidores estáticos usados como FACTS

1.2.4 - Control de tensión en los inversores: Modulación PWM sinusoidal



Esta modulación consiste en la comparación de una referencia sinusoidal (o moduladora) con una señal triangular (o portadora) donde la referencia determina la frecuencia y la tensión que se desea para las formas de onda de salida del inversor (Fig. 1.25a).

Con este tipo de modulación es posible reducir significativamente el contenido armónico (distorsión) de la tensión alterna generada por el inversor.

Existen dos tipos de modulaciones sinusoidales para este inversor; la modulación a dos niveles y la modulación a tres niveles.

La Fig. 1.25b nos muestra las diferentes formas de onda para la modulación sinusoidal de dos niveles.

a) Operación a dos niveles de tensión

En la operación a dos niveles la tensión V_{ab} puede ser igual a $+E$ o $-E$.

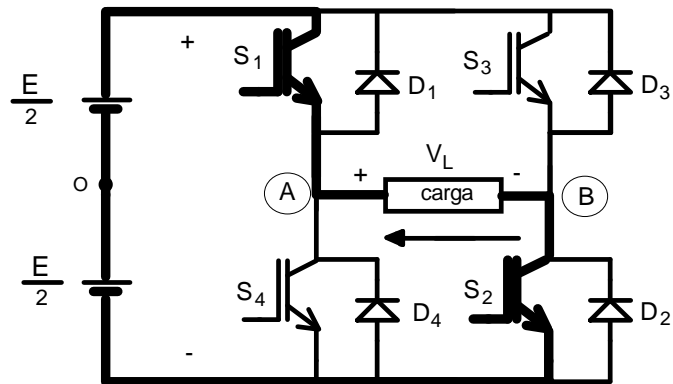
Los comandos para los interruptores son generados a través de la comparación de una señal moduladora V_m con una señal portadora triangular V_P , como muestra la Fig. 1.25.

Fig. 1.25

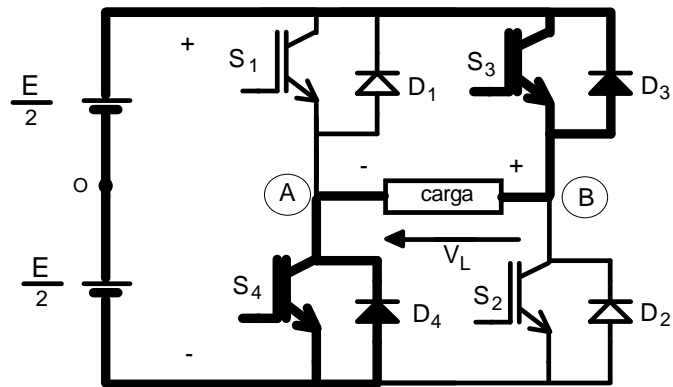
Capítulo 1

Fundamentos de electrónica de potencia

- Estructura de los convertidores estáticos usados como FACTS



Primera etapa



Segunda etapa

Fig. 1.26

Los interruptores S_1 y S_3 son comandados de manera complementaria a los interruptores S_2 y S_4 . Es necesario que exista un tiempo muerto entre el bloqueo de un par de interruptores y la entrada en conducción del otro par, caso contrario se producirá un corto-circuito de brazo, destruyendo el inversor.

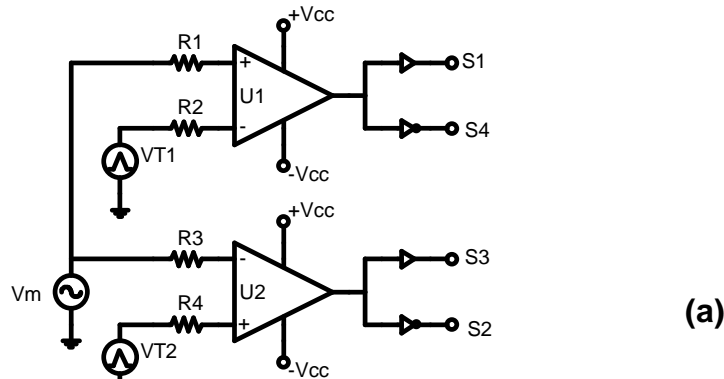
En la Fig. 1.26 son presentadas las etapas de operación cuando el inversor trabaja a dos niveles. Cuando los interruptores S_1 y S_2 conducen, la tensión V_{ab} es igual a 'E' y cuando los interruptores S_3 y S_4 conducen, el tensión V_{ab} es igual a $-E$.

Al igual que en el caso no modulado, dependiendo de la carga del inversor los interruptores o los diodos en anti-paralelo conducen. Por ejemplo si la carga es inductiva habrá intervalos donde conducen los diodos.

Capítulo 1

Fundamentos de electrónica de potencia

- Estructura de los convertidores estáticos usados como FACTS



(a)

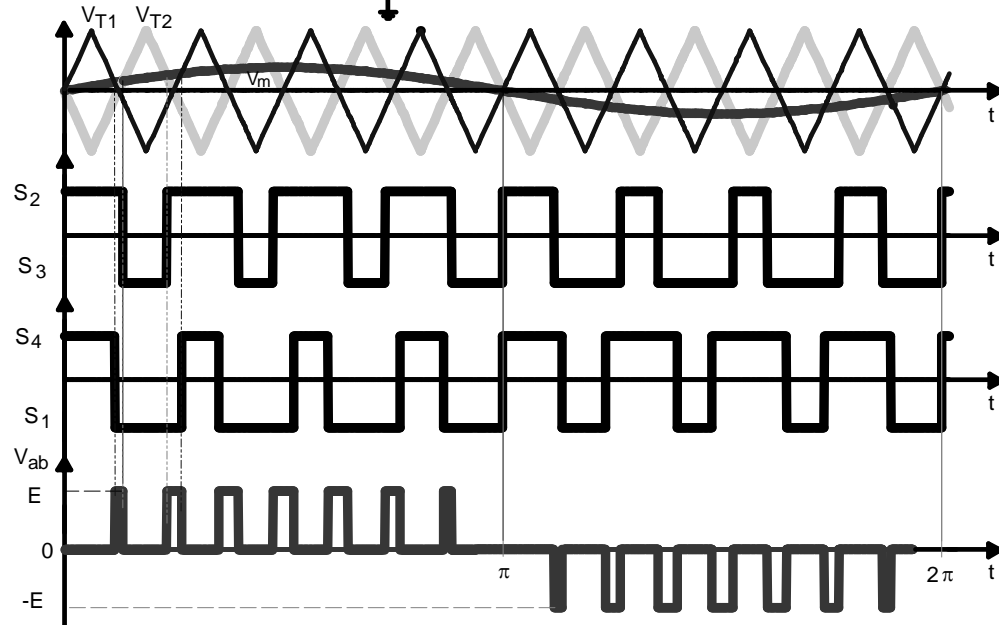


Fig. 1.27

(b)

- Operación a tres niveles de tensión

En la operación a tres niveles la tensión V_{ab} puede ser igual a $+E$, $-E$ o cero.

Las señales de comando para los interruptores son generadas a través de la comparación de una señal moduladora V_m con dos señales portadoras triangulares V_{T1} y V_{T2} , desfasadas en 180° , como muestra la Fig. 1.27a.

El interruptor S_1 es comandado complementariamente a S_4 y el interruptor S_3 es comandado complementariamente a S_2 .

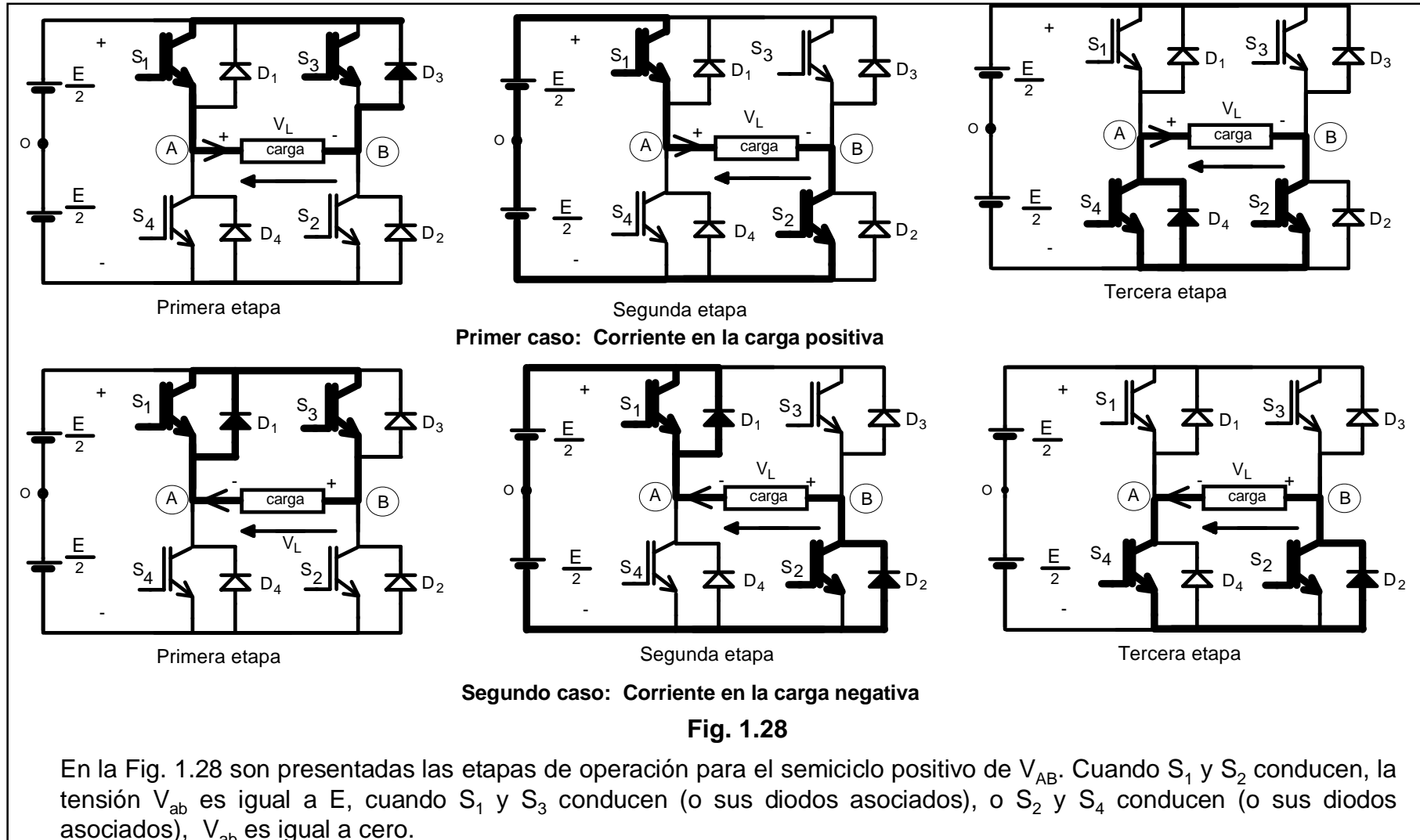
Se hace necesario un tiempo muerto entre el bloqueo de un interruptor y la entrada en conducción del otro para evitar un cortocircuito de brazo.

Una ventaja de la modulación a tres niveles es que la tensión de salida V_{ab} posee una frecuencia que es el doble de la frecuencia de conmutación, por lo tanto dobla la de dos niveles (Fig. 1.27b).

Capítulo 1

Fundamentos de electrónica de potencia

- Estructura de los convertidores estáticos usados como FACTS



Capítulo 1

Fundamentos de electrónica de potencia

- Estructura de los convertidores estáticos usados como FACTS

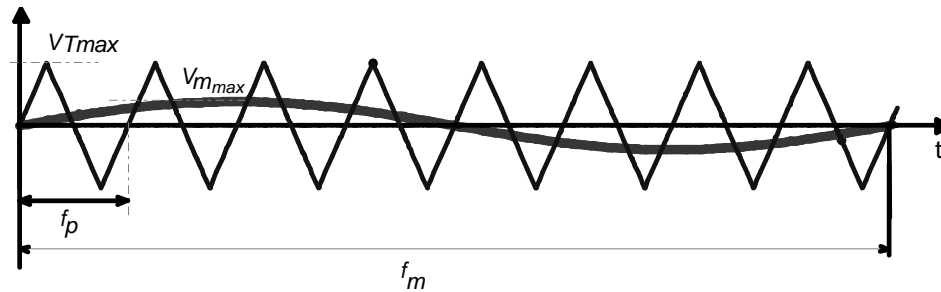


Fig. 1.29

c) - Índices de modulación y de razón de frecuencia

Como las dos señales, moduladora y portadora, son sincronizadas se hace necesario definir dos parámetros que se incluyen en esta sincronización. Como son el índice de modulación (m_i) y la razón de frecuencia (m_f).

El índice de modulación (m_i) es definido como la relación de la amplitud de la señal de referencia sinusoidal (o moduladora) con la amplitud de la triangular (portadora), es decir:

$$m_i = \frac{V_{mmax}}{V_{Tmax}} < \text{que } 1. \quad (1.32)$$

con V_{mmax} = Amplitud de la moduladora
y V_{Tmax} = Amplitud de la portadora.

La razón de frecuencia es definida como la relación de la frecuencia de la triangular a la señal de referencia, es decir, (Ver Fig. 1.29 donde $m_f = 8$)

$$m_f = \frac{f_p}{f_m} > \text{que } 1. \quad (1.33)$$

donde: f_p = frecuencia de la triangular
 f_m = frecuencia de la referencia

Capítulo 1

Fundamentos de electrónica de potencia

- Estructura de los convertidores estáticos usados como FACTS

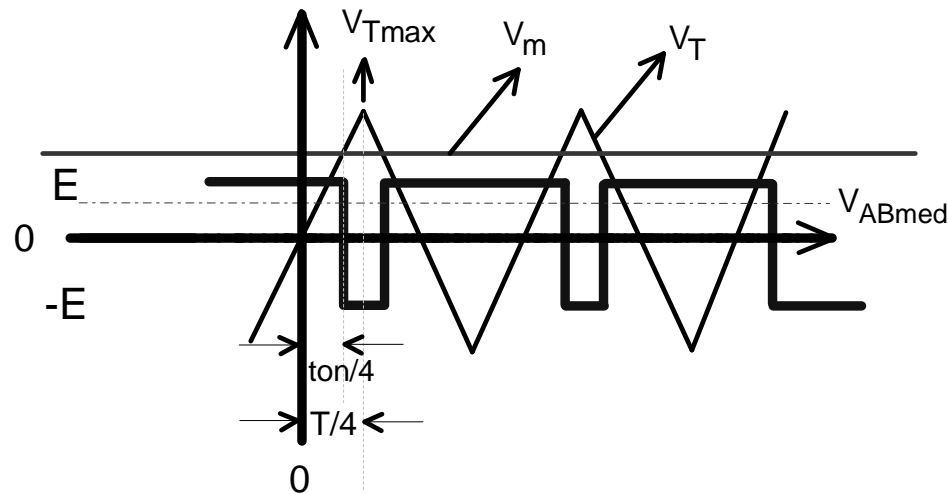


Fig. 1.30

d) Contenidos armónicos para 2 niveles de tensión

Con la modulación a dos niveles se tiene el formato de onda (V_{AB}) mostrado por la Fig. 1.25b, la cual es determinada por la comparación de V_m y V_T , teniéndose que V_{AB} varía entre E y $-E$.

Analizando esta forma de onda se tiene que:

1- La amplitud máxima de la fundamental ($V_{AB1}(t)$) de salida es ' m_i ' veces ' E '. Esto puede ser entendido considerando para el instante de conmutación que V_m es constante.

Entonces el valor medio de la tensión de salida, V_{ABmed} , para un ciclo de conmutación depende de la razón V_m a V_{Tmax} , para un dado ' E '.

$$V_{ABmed} = \frac{V_m(\omega_1 t)}{V_{Tmax}} \cdot E, \quad V_m \leq V_{Tmax} \quad (1.34)$$

Por lo tanto, asumiendo que V_m es constante para un ciclo de conmutación la ecuación anterior indica como la **tensión media instantánea de V_{AB}** varía desde un ciclo de conmutación a otro.

Capítulo 1

Fundamentos de electrónica de potencia

- Estructura de los convertidores estáticos usados como FACTS

Donde la tensión media instantánea es idéntica a la componente fundamental de V_{AB} (V_{AB1}), es decir de igual forma que V_m , sabiendo que:

$$V_{ABmed}(\omega_1 t) = \frac{V_m(\omega_1 t)}{V_{Tmax}} \cdot E, \quad V_m \leq V_{Tmax} \quad (1.35)$$

Con:

$$V_{mMAX} \leq V_{Tmax} \quad (1.36)$$

Sustituyendo V_m en la ecuación de V_{ABmed} , se tiene:

$$V_{ABmed} = \frac{V_{mMAX}}{V_{Tmax}} \cdot E \cdot \text{sen}(\omega_1 t) \quad (1.37)$$

Es decir:

$$V_{AB1} = V_{ABmed} \quad E \cdot m_i \cdot \text{sen}(\omega_i t) \quad (1.38)$$

Por lo tanto:

$$V_{AB1MAX} = V_{ABmedMAX} \quad E \cdot m_i \quad \text{Para } m_i \leq 1,0$$

Y,

$$E \leq V_{ABmedMAX} \leq \frac{4}{\pi} \cdot E \quad \text{Para } m_i \geq 1,0 \quad (1.39)$$

Mostrando que en una modulación PWM sinusoidal, la amplitud de la componente fundamental de la tensión de salida varía linealmente con ' m_i '. Por tanto el rango de ' m_i ' desde 0 a 1 es referido como rango lineal, a un rango mayor que 1 se le denomina de sobremodulación.

Capítulo 1

Fundamentos de electrónica de potencia

- Estructura de los convertidores estáticos usados como FACTS

2- Las armónicas en la tensión de salida del inversor (V_{AB}) aparecen por grupos centrados alrededor de la frecuencia de conmutación y sus múltiplos, esto es, armónicas alrededor de ' m_f ', ' $2m_f$ ', ' $3m_f$ ' y así por delante.

Siendo estos validos donde ' m_f ' esta entre 0 y 1.

Teóricamente, las frecuencias en el cual las tensiones armónicas ocurren, pueden ser indicadas como:

$$f_n = (jm_f \pm k) \cdot f_1 \quad (1.40)$$

Esto es, la armónica de orden ' n ' corresponde a:

$$n = jm_f \pm k \quad (1.41)$$

Donde la correspondiente frecuencia fundamental es $n=1$.

Para valores impares de ' j ' las armónicas existen solo para valores pares de ' k ' (incluyendo el cero).

Para valores pares de ' j ', las armónicas existen solo para valores impares de ' k '.

Observación: Para m_f par no se cumple simetría de media onda, luego ' n ' toma valores pares e impares y para m_f impar cumple simetría de media, por tanto aparecen solamente ' n ' impares.

Luego para modulación de dos niveles de tensión, m_f siempre es forzado a ser impar.

Capítulo 1

Fundamentos de electrónica de potencia

- Estructura de los convertidores estáticos usados como FACTS

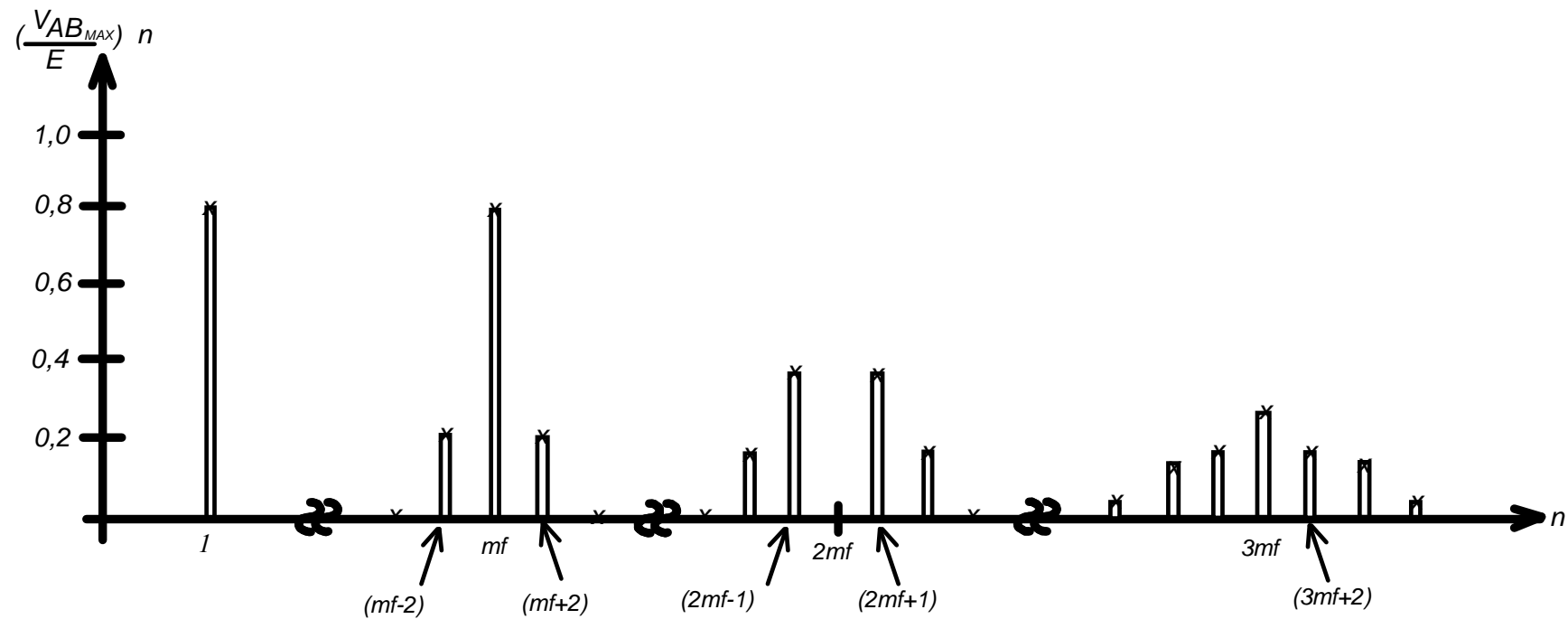


Fig. 1.31

Capítulo 1

Fundamentos de electrónica de potencia

- Estructura de los convertidores estáticos usados como FACTS

e) Contenidos armónicos para 3 niveles de tensión

Para 3 niveles de tensión los brazos inversores A y B del inversor son controlados independientemente comparando la tensión moduladora (V_m) con dos portadoras (V_{T1} y V_{T2}) tal como muestra la Fig. 1.27b.

Este esquema de modulación tiene la ventaja de 'efectivamente' doblar la frecuencia de conmutación en la carga, por tanto, los armónicos más bajos reflejados en la salida aparecen en el doble de la frecuencia de conmutación, comparado con el de dos niveles de tensión.

Para este caso también se cumple que:

$$V_{AB1_{MAX}} = E \cdot m_i \quad \text{Para } m_i \leq 1,0 \quad (1.42)$$

Y,

$$E \leq V_{ABmed_{MAX}} \leq \frac{4}{\pi} \cdot E \quad \text{Para } m_i \geq 1,0 \quad (1.43)$$

Debido a que la frecuencia de salida dobla a la de conmutación, las armónicas existen en grupos alrededor de $2m_f$ y los múltiplos de $2m_f$, los armónicos de orden ' n ' pueden ser obtenidos como:

$$n = j2m_f \pm k \quad (1.44)$$

Puesto que ' n ' siempre es impar (debido a la simetría de media onda en V_{AB}), k puede solo ser de valor impar como muestra la figura 1.32, nuevamente para un espectro con índices $m_i = 0,8$ y m_f genérico y que $2 \cdot m_f$ siempre es par.

Capítulo 1

Fundamentos de electrónica de potencia

- Estructura de los convertidores estáticos usados como FACTS

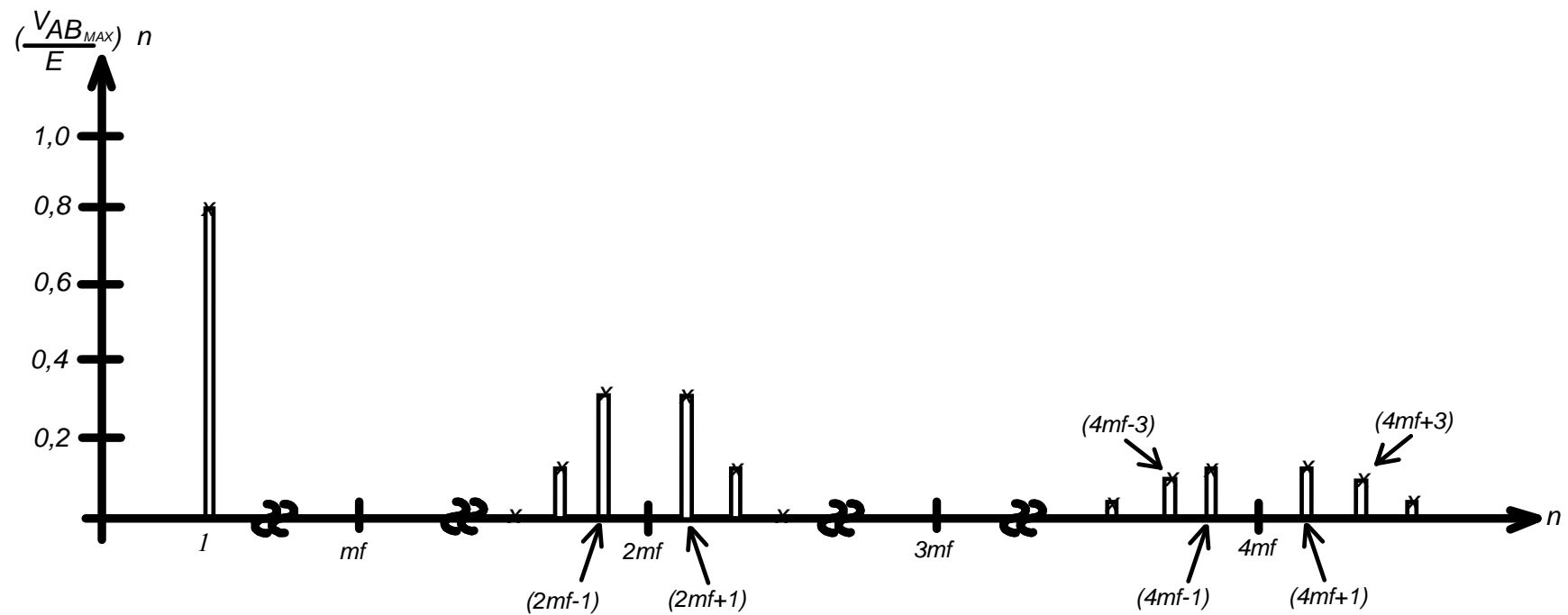


Fig. 1.32