

Clasificación de los convertidores DC-AC (inversores) por el tipo de conmutación.

- 1.- Inversores de conmutación brusca. La conmutación se produce en puntos arbitrarios de las formas de onda de corriente y voltaje, a consecuencia de lo cual las pérdidas por conmutación pueden ser elevadas. La frecuencia de conmutación se puede fijar arbitrariamente.
- 2.- Inversores resonantes. Se incluyen en el circuito elementos que causan resonancias en serie o en paralelo, de manera que las conmutaciones se producen en los momentos en los que la forma de onda de tensión o de corriente cruza por cero, anulando las pérdidas por conmutación. La frecuencia de conmutación debe corresponder con la de resonancia.

Conversores de conmutación brusca (Hard Commutation).

Un conversor DC-AC de conmutación brusca (generalmente llamado “inversor”) es un sistema electrónico de potencia que produce una salida AC a partir de una entrada DC.

La forma de onda de salida esta formada por una serie de pulsos rectangulares con transiciones bruscas. El número de fases de la salida esta definido por la topología del conversor, y la frecuencia y amplitud de la variable controlada (voltaje o corriente) están definidas por el control del conversor.

Clasificación de los inversores por el tipo de fuente sintetizada.

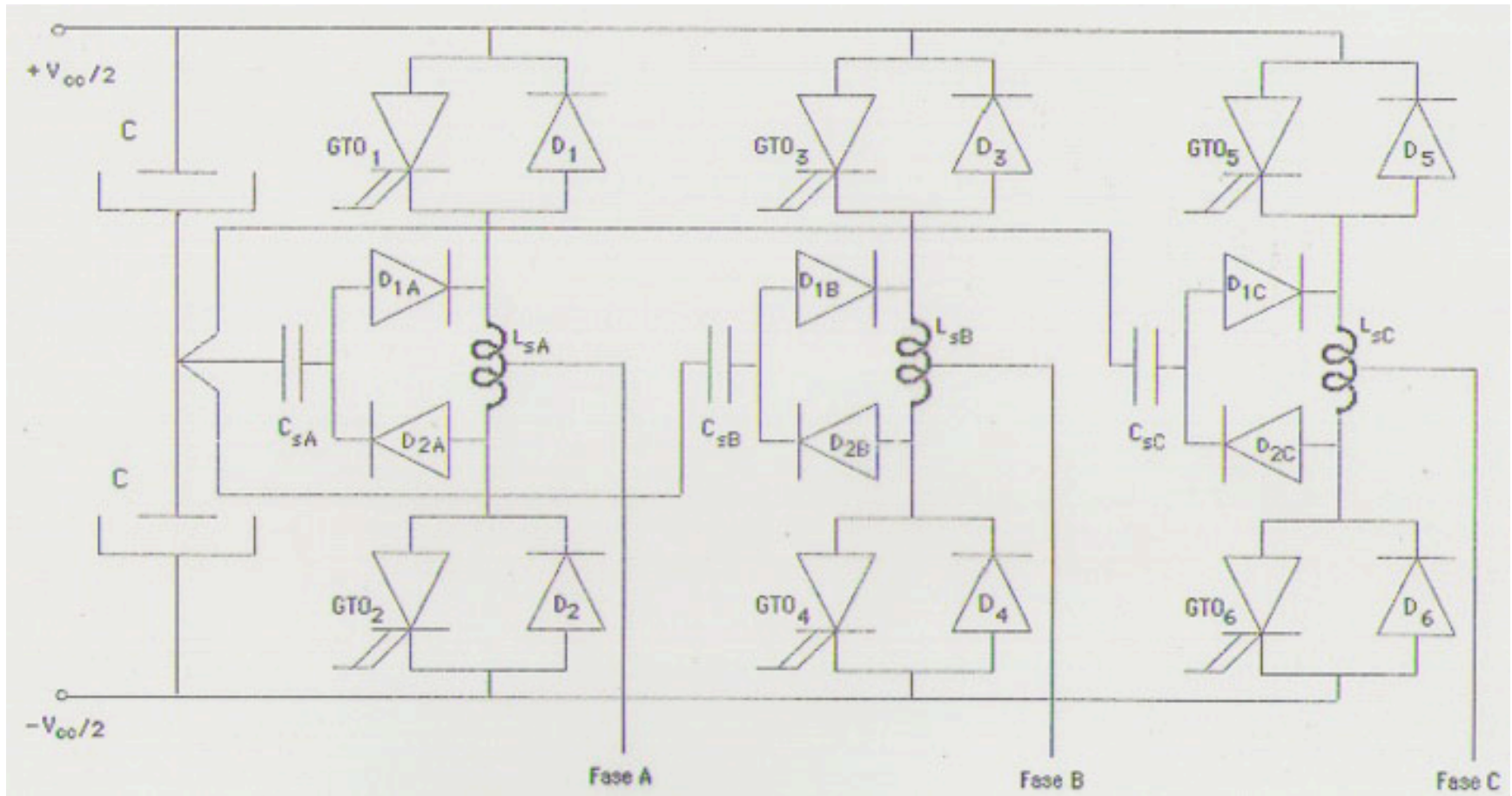
1.-Inversor del tipo "fuente de voltaje", usualmente designado por las siglas VSI (del inglés Voltage Source Inverter).

El conversor se comporta como una fuente de tensión, con una impedancia de salida muy baja (idealmente cero); la corriente de salida depende de la impedancia del circuito externo, y puede estar en cualquier valor entre cero y el máximo nominal de salida del conversor. Para evitar daños en caso de sobrecarga es preciso implementar algún tipo de limitador de corriente de salida.

Un inversor VSI debe ser alimentado con una fuente de tensión DC de baja impedancia de salida (en principio ideal).

El inversor tipo VSI produce una salida formada por un tren de pulsos de voltaje, con dv/dt alto. Por esta razón la impedancia de entrada de la carga debe ser de tipo inductivo para producir una forma de onda de corriente razonable.

Conectar una carga de tipo capacitivo a la frecuencia de interés ocasionará la circulación de picos de corriente muy altos, lo cual es usualmente inaceptable y requiere la inclusión de un filtro inductivo para evitar el problema.



Inversor puente trifásico con salida tipo fuente de voltaje (VSI).

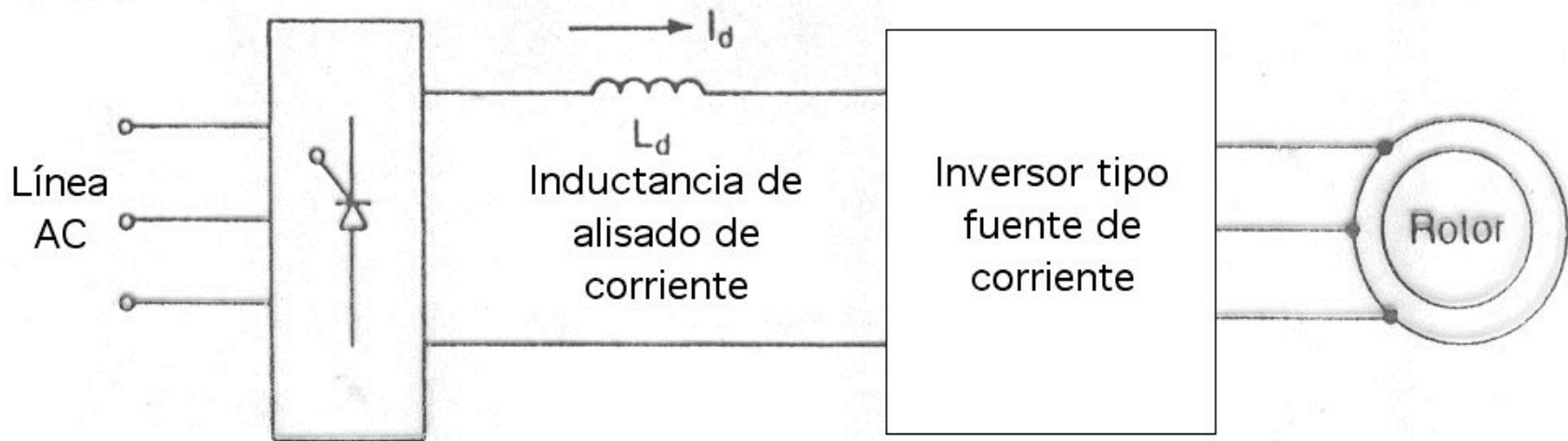
2.- Inversor tipo fuente de corriente, usualmente designado por las siglas CSI (del inglés Current Source Inverter).

El conversor se comporta como una fuente de corriente, con una impedancia de salida muy alta (idealmente infinita); la tensión de salida depende de la impedancia del circuito externo, y puede estar en cualquier valor entre cero y el máximo nominal de salida del conversor. En principio el inversor de este tipo no necesita de un sistema limitador de corriente adicional y puede operar contra un cortocircuito en la salida.

Un inversor tipo CSI debe ser alimentado con una fuente de corriente DC de alta impedancia de salida(en principio ideal).

El inversor tipo CSI produce una salida formada por un tren de pulsos de corriente, con di/dt alto. Por esta razón la impedancia de entrada de la carga debe ser de tipo capacitivo para producir una forma de onda de tensión razonable.

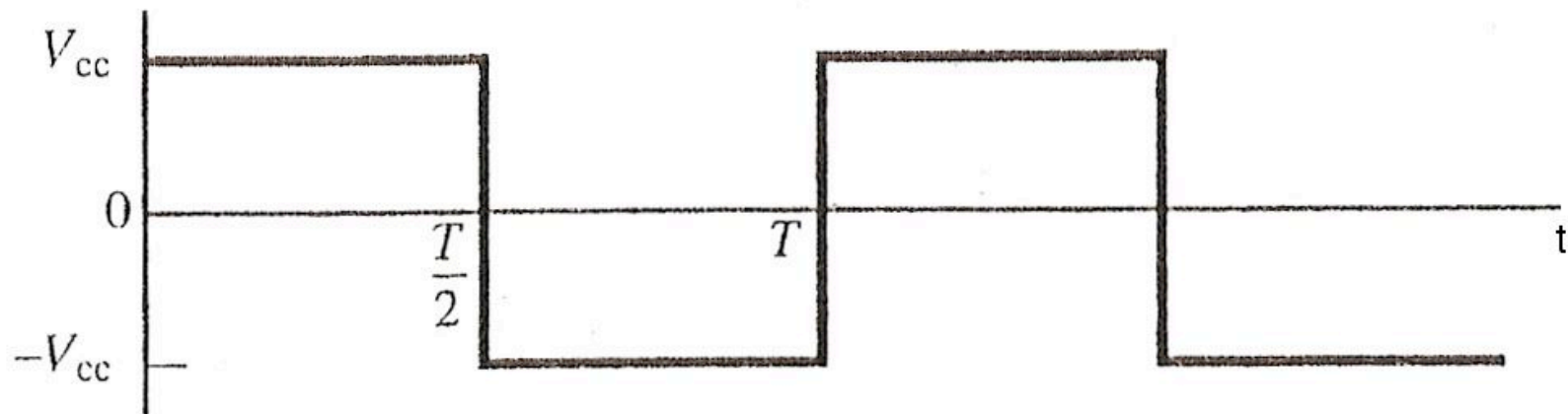
Una carga de tipo inductivo a la frecuencia de interés ocasionará la aparición de picos de voltaje muy altos, lo cual es usualmente inaceptable y requiere de la inclusión de un filtro capacitivo para eliminar el problema.



Sistema inversor con salida tipo fuente de corriente para alimentar un motor AC.

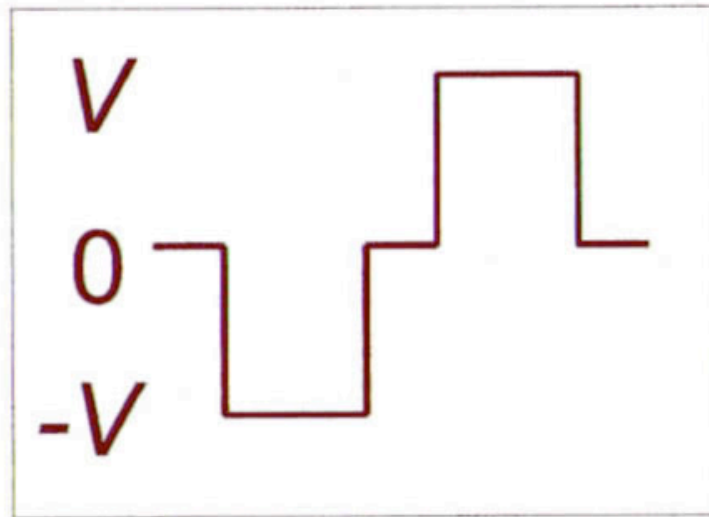
Clasificación de los inversores por el número de niveles a la salida.

1.- De dos niveles. La salida es una onda cuadrada de solo dos niveles: máximo positivo y máximo negativo.



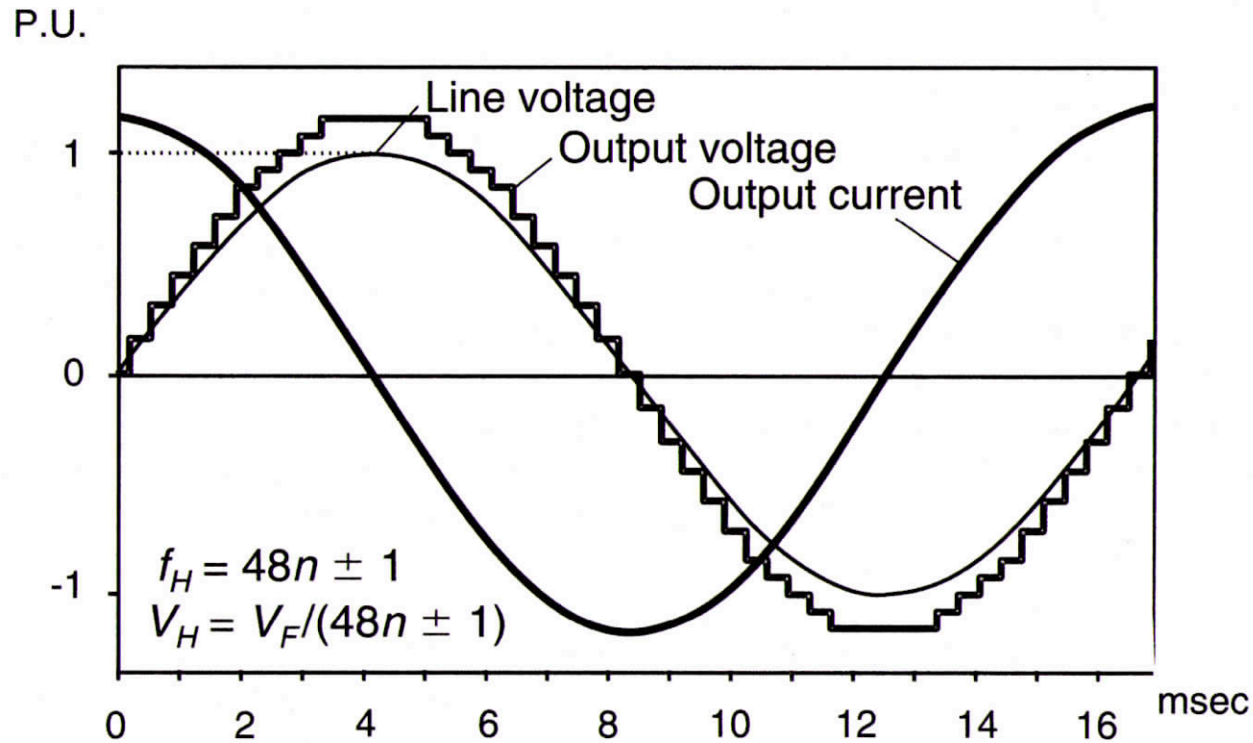
Salida de onda cuadrada de voltaje de dos niveles de un VSI.

2.- De tres niveles. La salida es un tren de pulsos rectangulares de tres niveles: máximo positivo, cero y máximo negativo.



Forma de onda de salida de un inversor tipo VSI de tres niveles.

3.- Multinivel. La salida es un tren de pulsos rectangulares de n niveles entre el máximo positivo y el máximo negativo.

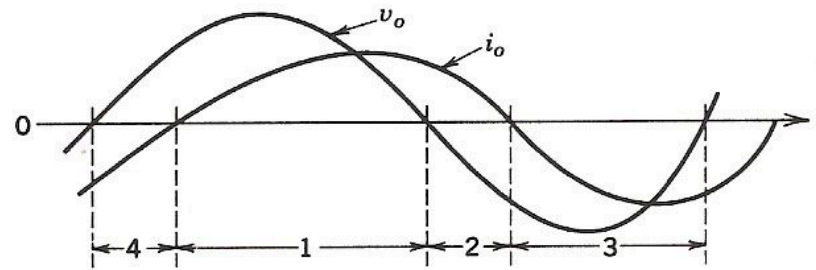
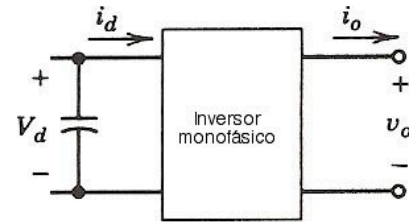


Formas de onda de salida de un inversor tipo VSI con 48 niveles.

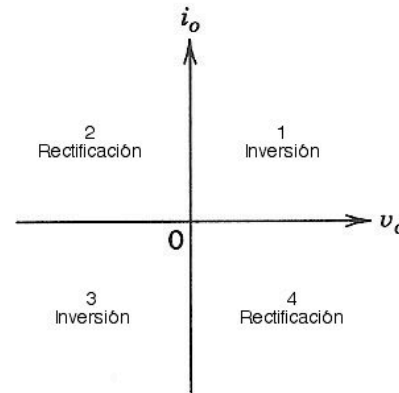
Por razones prácticas los inversores de tipo CSI son usualmente de solo dos niveles.

Manejo de energía en un conversor DC-AC.

En general los conversores DC-AC son completamente bidireccionales en el flujo de energía, de forma que son naturalmente capaces de operar en los cuatro cuadrantes del plano corriente/voltaje.



Formas de onda fundamentales de corriente y tensión en la salida



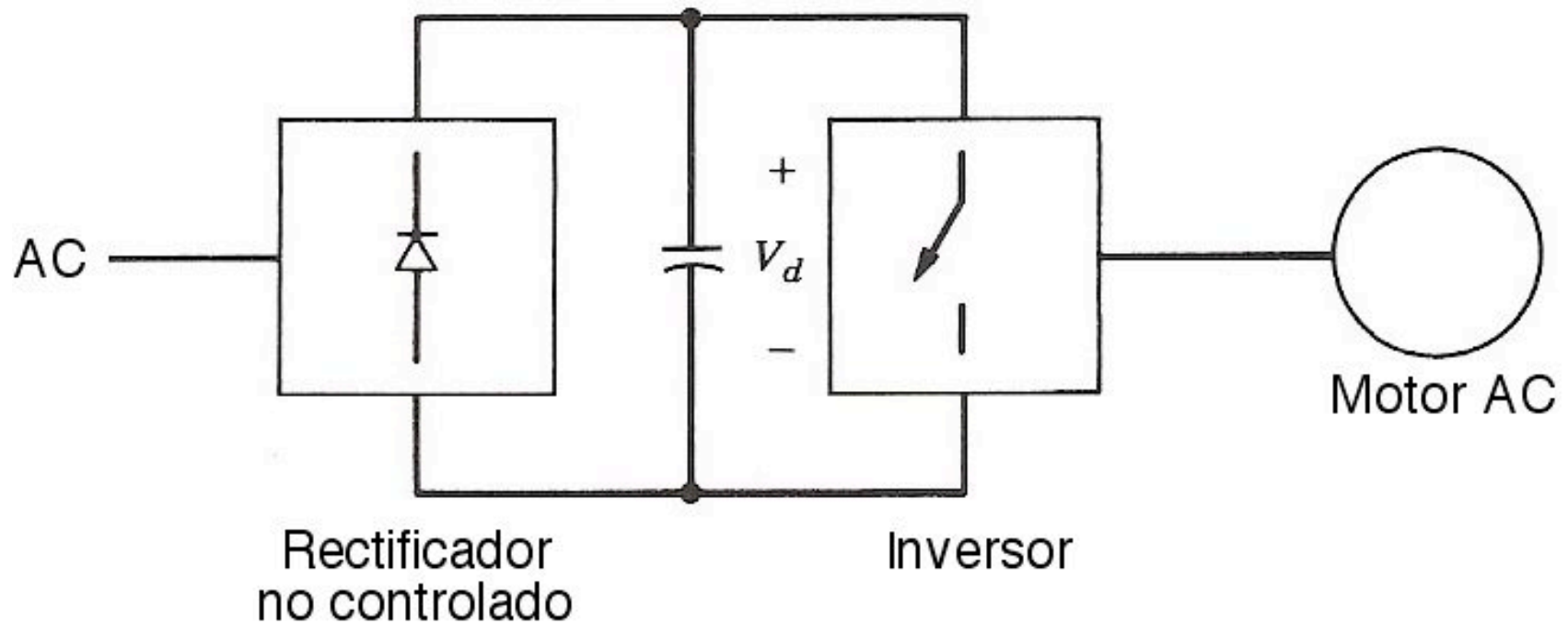
Inversor VSI operando en los cuatro cuadrantes

En la práctica una gran cantidad de inversores tipo VSI son alimentados desde un sistema AC mediante un circuito rectificador.

Esto da origen a dos alternativas.

1.- El rectificador es del tipo no controlado o semi-controlado, por lo que no es posible el paso de energía desde la carga AC a la fuente primaria AC

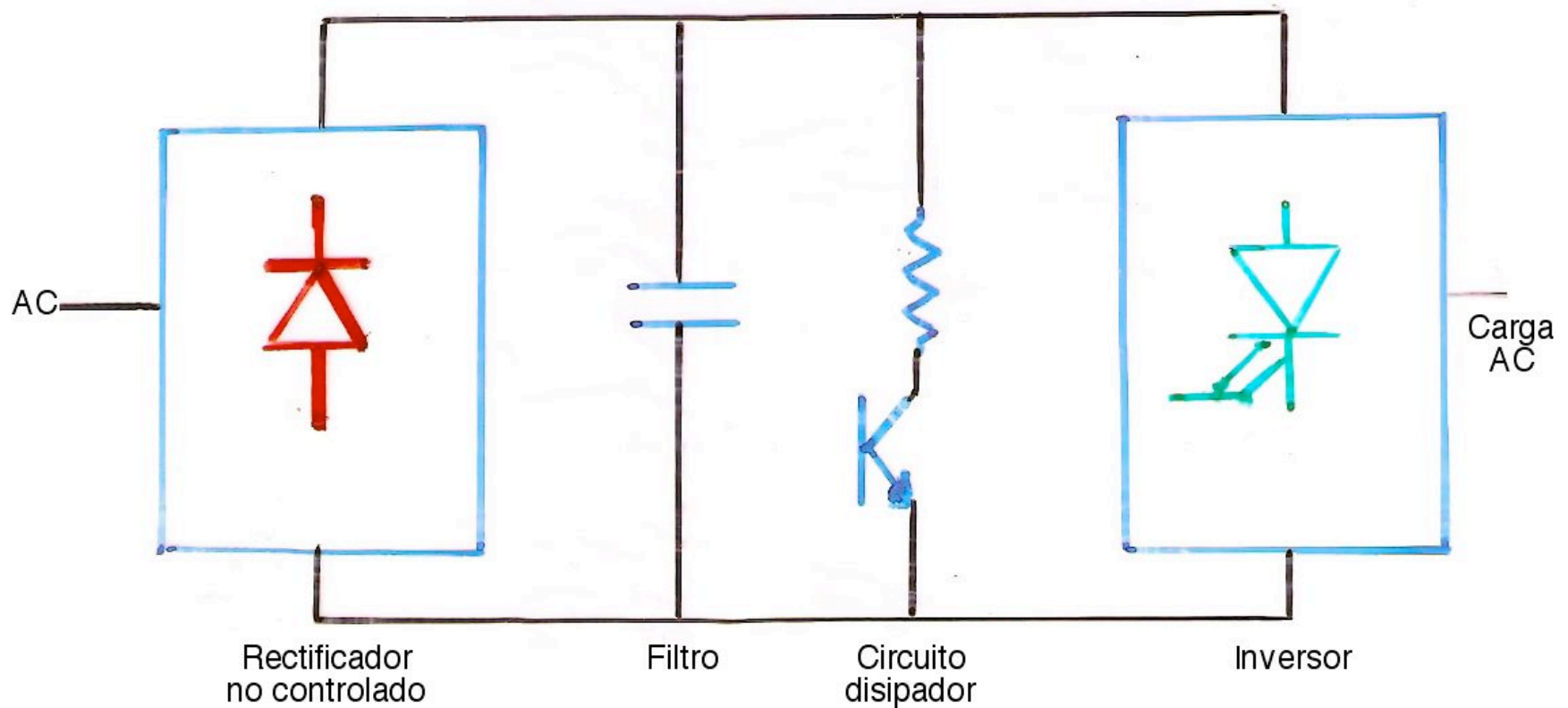
En este caso no es posible la transferencia sostenida de energía de la salida AC al sistema inversor, ya que se producirá una elevación indeseable de la tensión en el filtro capacitivo del enlace DC.



Sistema inversor tipo VSI con alimentación desde un sistema AC con rectificador no controlado.

No es posible la operación indefinida en el modo de recuperación de energía desde la carga AC.

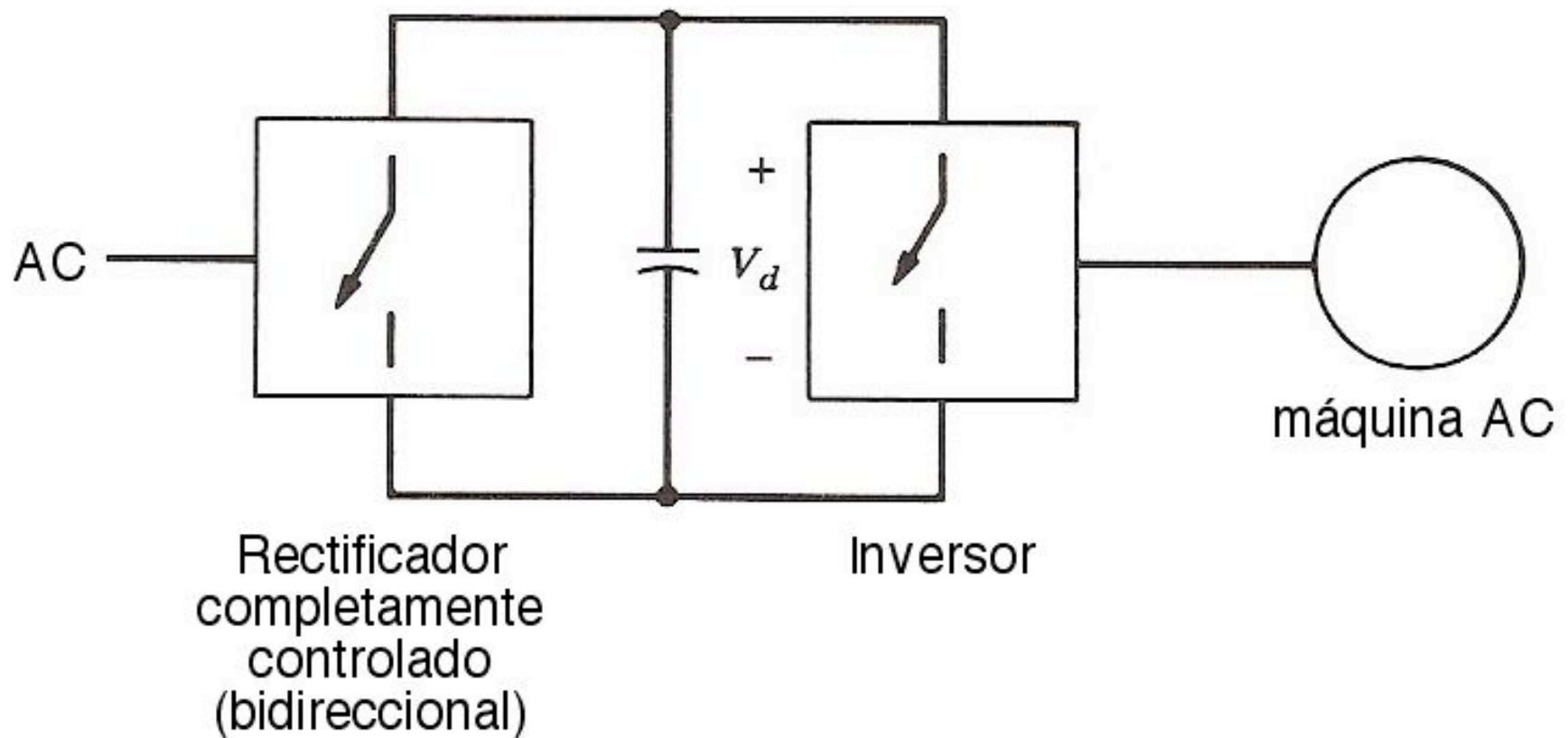
Si se desea operar en el modo de recuperación de energía ("frenado regenerativo") con un inversor alimentado desde un sistema AC a través de un rectificador no controlado, es preciso incluir un circuito auxiliar de limitación de la tensión en el condensador del filtro disipando el exceso de la energía recuperada, para mantener el valor de la tensión del condensador dentro de los límites de diseño.



Sistema inversor tipo VSI con alimentación desde un sistema AC con rectificador no controlado y circuito disipador auxiliar en el enlace DC para permitir la operación indefinida en el modo de recuperación de energía desde la carga AC.

2.- El rectificador es del tipo completamente controlado, por lo que es posible el paso de energía desde la carga AC a la fuente primaria AC

En este caso la transferencia sostenida de energía de la salida AC al sistema inversor es posible, dado que el rectificador completamente controlado puede transferir la energía recuperada desde el enlace DC a la fuente AC primaria.



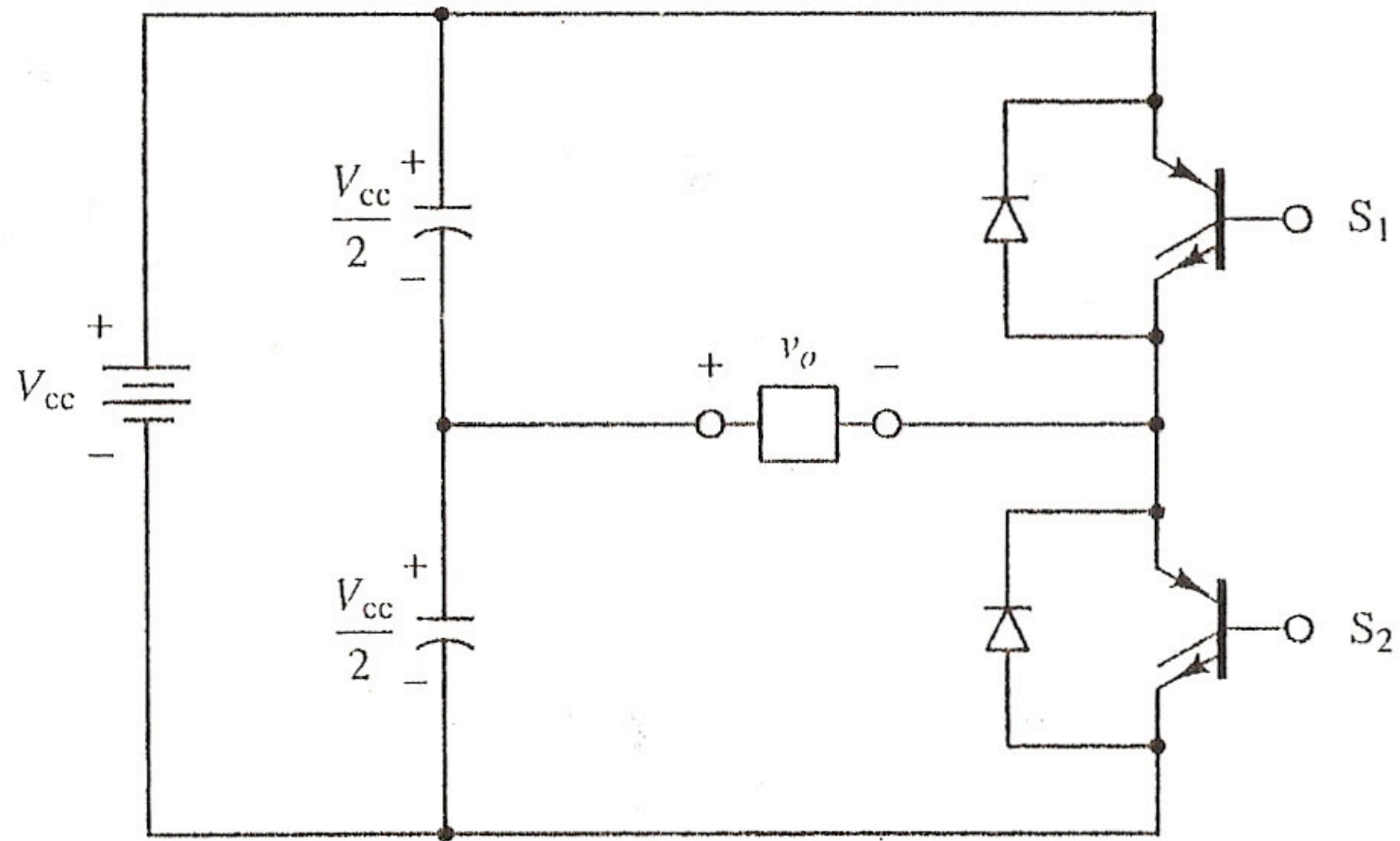
Sistema inversor tipo VSI con alimentación desde un sistema AC con rectificador completamente controlado. Es posible la operación indefinida en el modo de recuperación de energía desde la carga AC.

Convertidores DC-AC tipo VSI

Configuraciones básicas.

I.- Monofásicas.

1.- Inversor medio puente monofásico.



Circuito inversor VSI medio puente monofásico.

Dado que existen dos conmutadores controlados (S1 y S2) cada uno de los cuales puede estar en uno de dos estados (encendido, “ON”, o apagado, “OFF”), en teoría el circuito tiene cuatro estados diferentes.

En la práctica el estado $S1=ON, S2=ON$ es un estado prohibido, ya que aplica un cortocircuito a la fuente DC que producirá la destrucción de los dos conmutadores controlados.

Suponiendo que existe una carga reactiva genérica conectada al inversor, la situación de los tres estados no prohibidos es la indicada en la siguiente tabla

Estados posibles en un inversor monofásico medio puente tipo VSI

Estado	Estado de los conmutadores	Tensión de salida (v_o)	Componentes que conducen la corriente de carga (i_o)
1	S1=ON, S2=OFF	$V_{cc}/2$	S1 si $i_o > 0$ D1 si $i_o < 0$
2	S1=OFF, S2=ON	$-V_{cc}/2$	D2 si $i_o > 0$ S2 si $i_o < 0$
3	S1=OFF, S2=OFF	$-V_{cc}/2$ $V_{cc}/2$	D2 si $i_o > 0$ D1 si $i_o < 0$

En el modo normal de operación la salida del inversor se sintetiza empleando únicamente los estados 1 y 2, que son los que producen valores unívocamente definidos en la salida.

En el tercer estado, con ambos conmutadores controlados apagados, la polaridad de la tensión de salida depende del sentido de la corriente, y por lo tanto no está definida por el estado del conversor. Dado que en general se desea controlar la tensión de salida en función del estado del conversor, este estado ($S1=OFF$, $S2=OFF$) no se emplea en la síntesis de la salida, aunque es alcanzado en forma transitoria durante las conmutaciones de los interruptores controlados, para evitar que se produzca el estado prohibido ($S1=ON$, $S2=ON$).

La forma de onda de salida producida por un inversor monofásico medio puente tipo VSI es una onda cuadrada de dos niveles, $V_{cc}/2$ y $-V_{cc}/2$.

La tensión de bloqueo directo de los conmutadores completamente controlados debe ser por lo menos igual a la tensión máxima de alimentación, V_{ccM} . Los dispositivos deben soportar una tensión inversa igual a la tensión AK en conducción de los diodos.

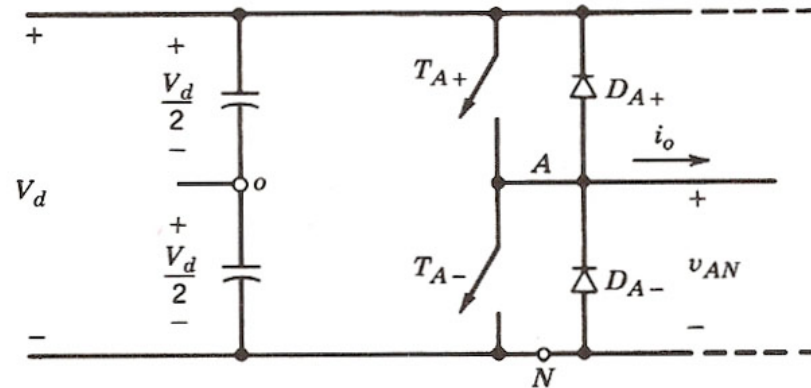
Los diodos deben ser capaces de soportar una tensión inversa por lo menos igual a la tensión máxima de alimentación, V_{ccM} .

El convertidor controla la frecuencia de la onda cuadrada generada en base a la frecuencia de conmutación de los dos dispositivos.

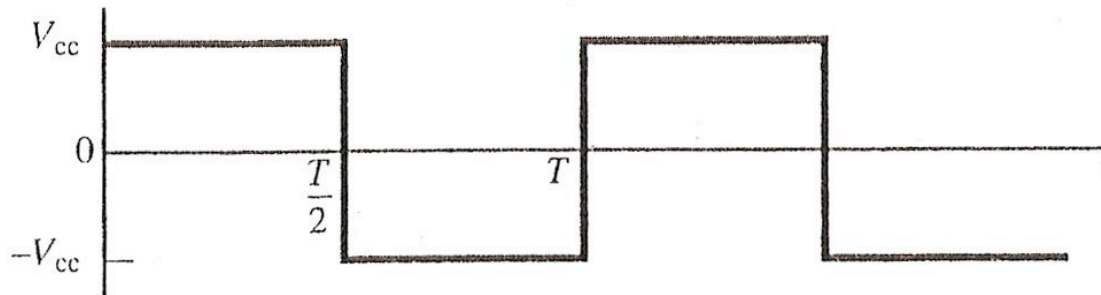
Si la duración de los estados 1 y 2 es la misma, con un ciclo de trabajo del 50%, la salida es una onda cuadrada simétrica y la amplitud de la salida depende exclusivamente del valor de la tensión DC de entrada al convertidor.

Si la duración de los estados 1 y 2 se modula, la salida es del tipo PWM y el espectro armónico de la salida es controlable en composición y amplitud.

Análisis de la forma de onda de salida básica, la onda cuadrada de dos niveles.



Inversor monofásico VSI



Forma de onda de salida de dos niveles del inversor puente monofásico

Dada una tensión DC de entrada al conversor de dos niveles, V_{cc} , el espectro armónico de voltaje de la forma de onda de salida es:

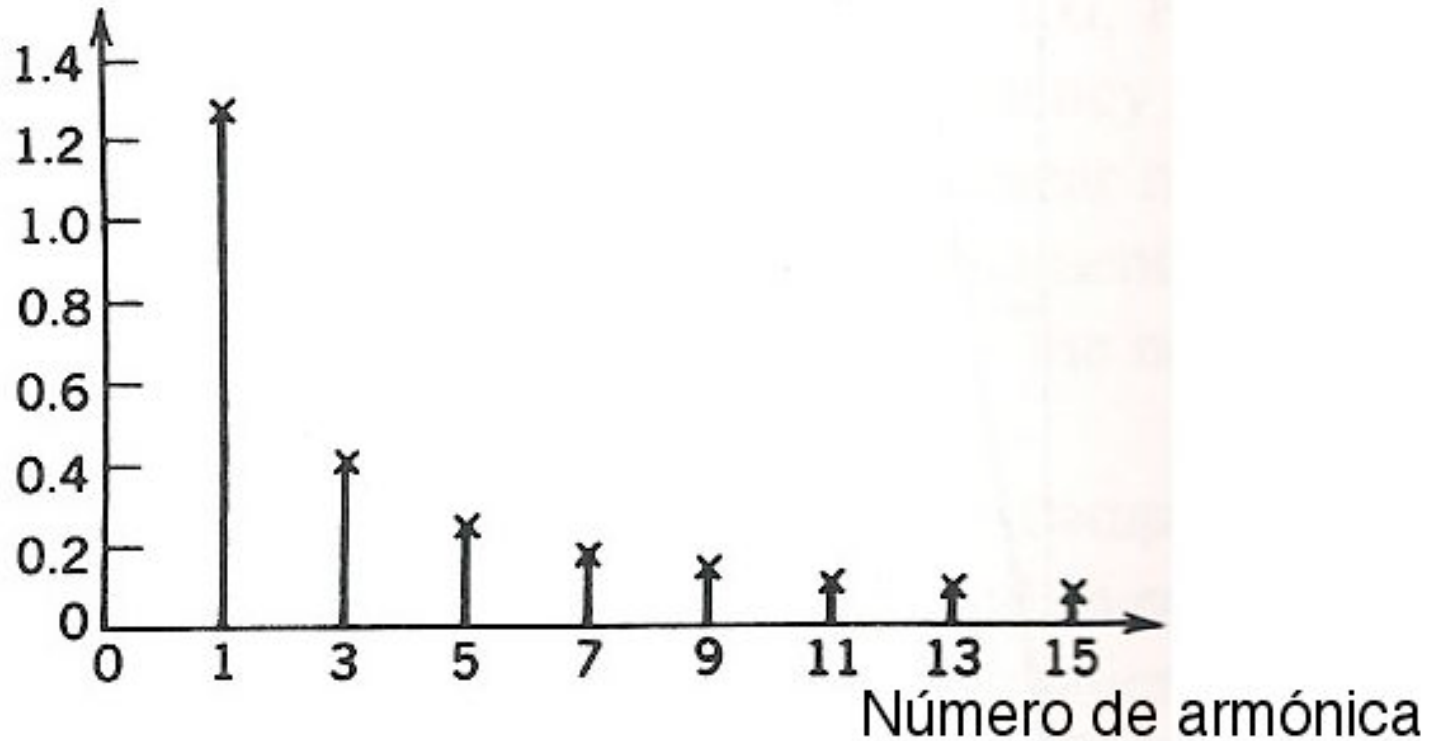
$$V_{ai} = \frac{4V_{cc}}{i\pi} = \frac{V_{a1}}{i}$$

donde $i = 2k + 1$ para $k = 0, 1, 2, 3, \dots$

La armónica de frecuencia fundamental de la forma de onda generada (la que tiene la frecuencia de conmutación del conversor), V_{a1} , es:

$$V_{a1} = \frac{4V_{cc}}{\pi}$$

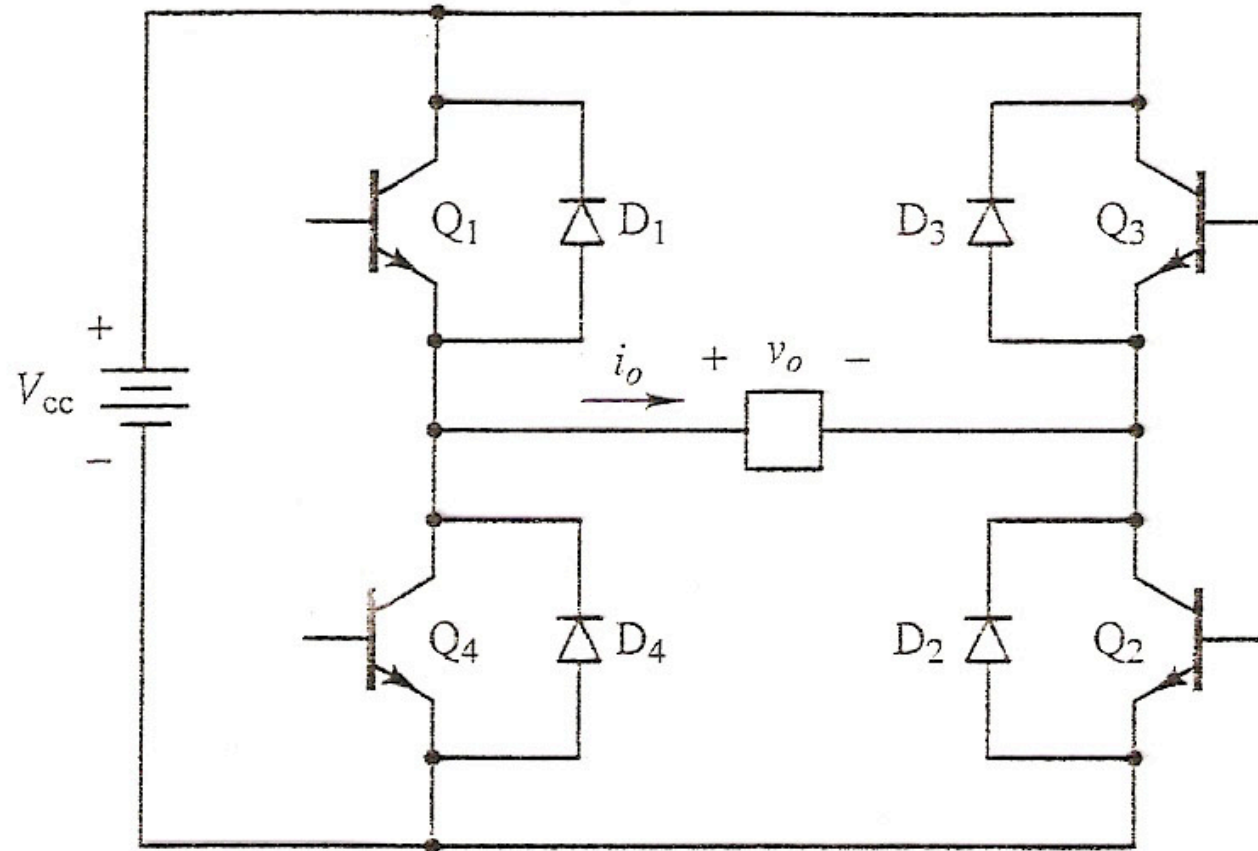
V_{ai}/V_{cc}



Espectro armónico de tensión de la forma de onda de salida del convertidor DC-AC medio puente monofásico VSI operado con la forma de onda básica (onda cuadrada).

El análisis es totalmente equivalente para el inversor puente monofásico CSI, si se intercambian las variables tensión de entrada y tensión de salida del VSI por las variables corriente de entrada y corriente de salida del CSI.

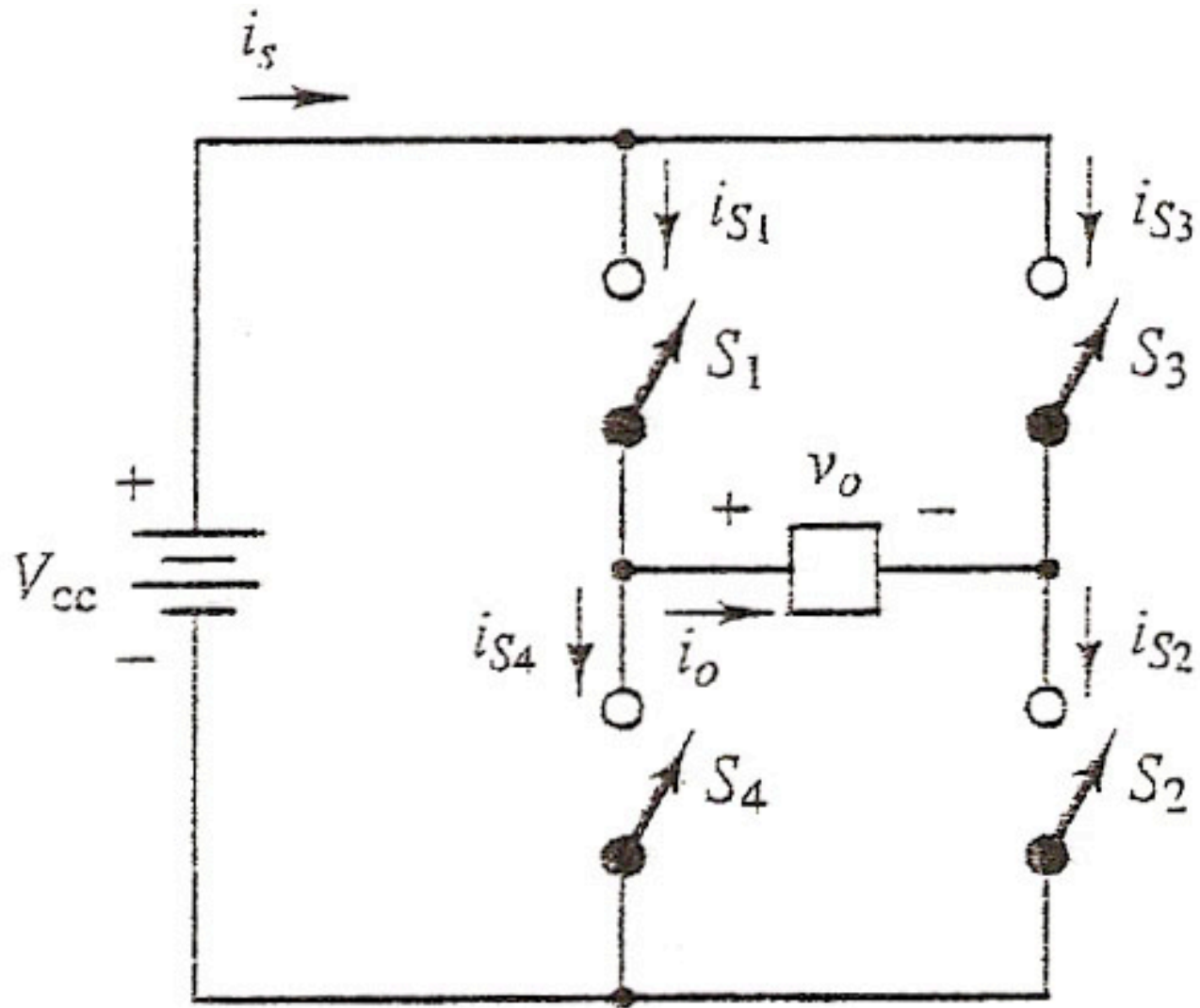
2.- Inversor puente completo monofásico VSI.



Para analizar el comportamiento del circuito, se puede reemplazar los arreglos conmutador principal-diodo antiparalelo con conmutadores ideales bidireccionales, tomando en cuenta que:

- 1.- No es aceptable que dos conmutadores en serie estén encendidos simultáneamente para no cortocircuitar la fuente de alimentación.
- 2.- Para mantener continuidad en la corriente de carga dos conmutadores deben estar encendidos en todo momento.

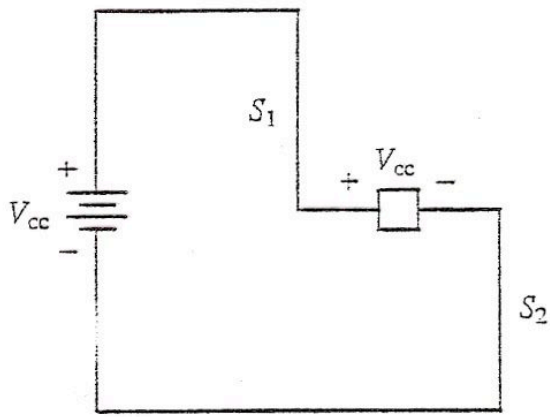
En estas condiciones el circuito tiene cuatro estados posibles.



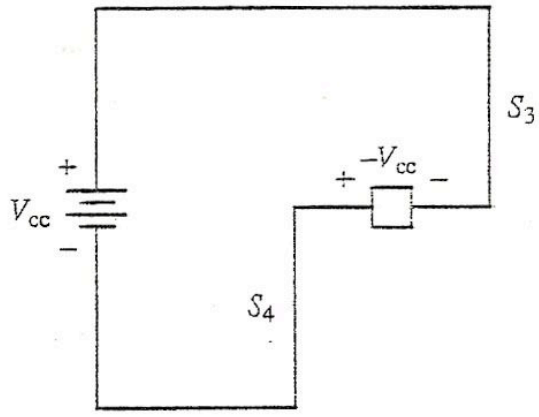
Circuito puente indicando todas las posibles corrientes

Tabla de estados posibles en el inversor puente monofásico

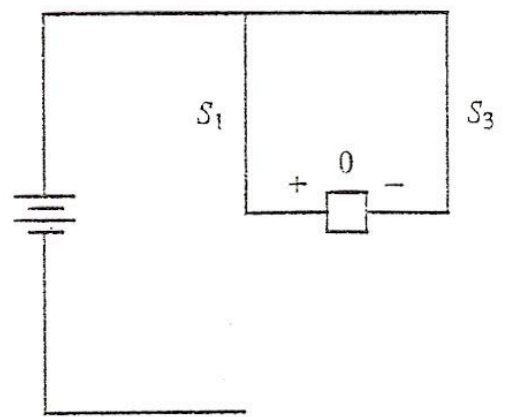
Estado	Interruptores cerrados	Tensión de salida, v_o
1	S_1 y S_2	$+V_{cc}$
2	S_3 y S_4	$-V_{cc}$
3	S_1 y S_3	0
4	S_2 y S_4	0



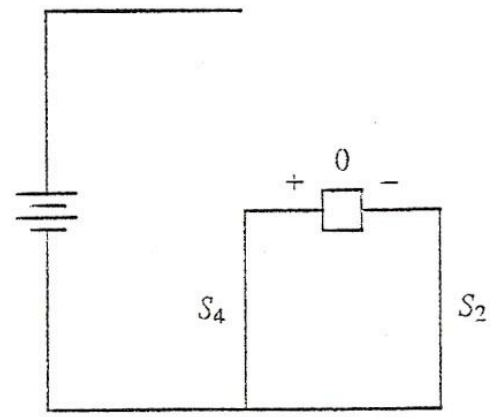
S1 y S2



S3 y S4



S1 y S3



S2 y S4

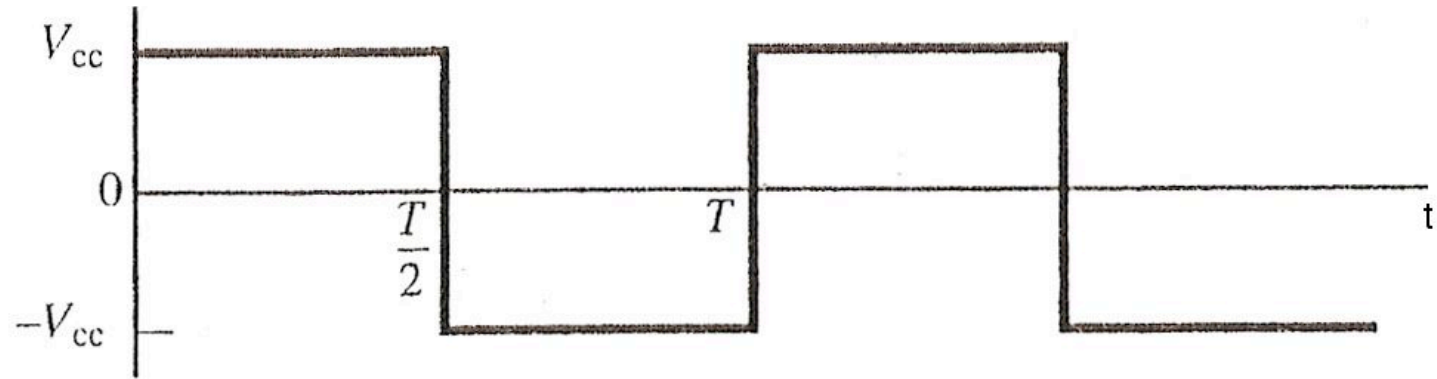
Configuración de conducción en los cuatro estados

Desde el punto de vista de la carga los estados 3 (S_1 y S_3) y 4 (S_2 y S_4) producen la misma tensión de salida y el mismo camino cerrado de conducción de corriente, por lo que son totalmente equivalentes.

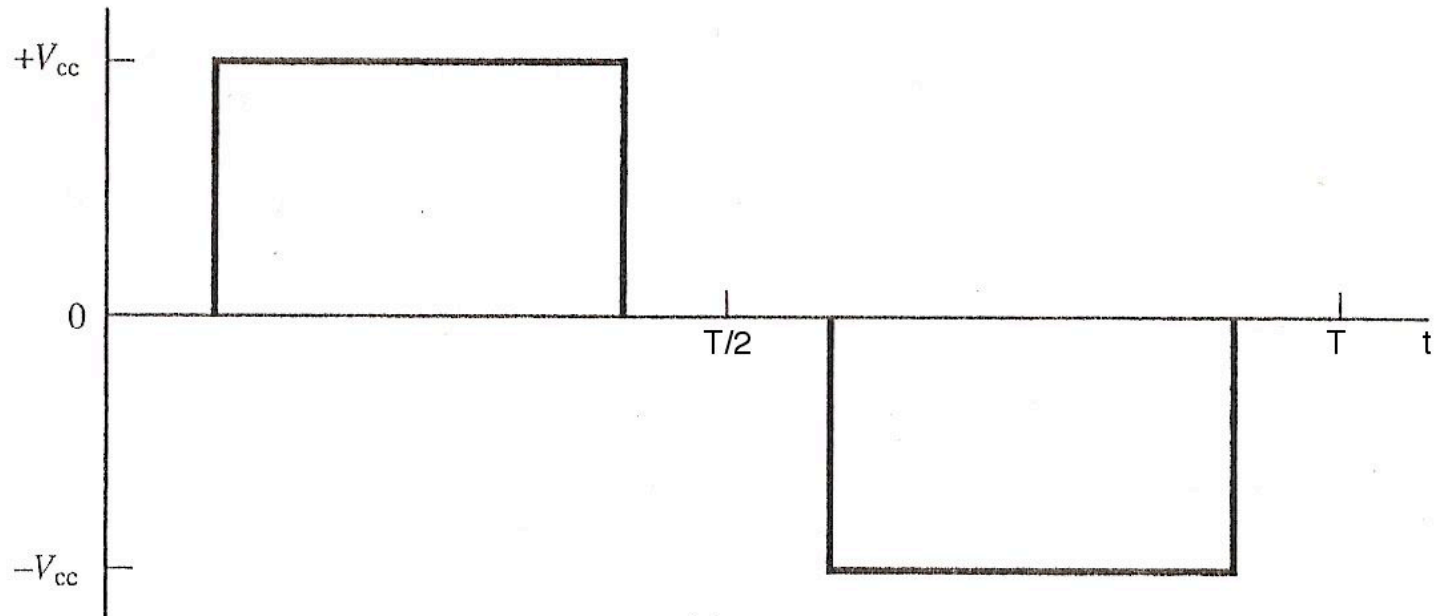
El inversor puente completo monofásico puede operar naturalmente en dos modos distintos.

1.- Modo de dos niveles. Solo se emplean en forma sucesiva los estados 1 (S_1 y S_2) y 2 (S_3 y S_4). La tensión de salida es una onda cuadrada de solo dos niveles, $+V_{cc}$ y $-V_{cc}$.

2.- Modo de tres niveles. Se emplean los estados 1 y 2, intercalando uno de los dos estados de salida nula (3 o 4). La tensión de salida es una onda cuadrada de tres niveles, $+V_{cc}$, 0 y $-V_{cc}$.



Inversor puente, salida a dos niveles



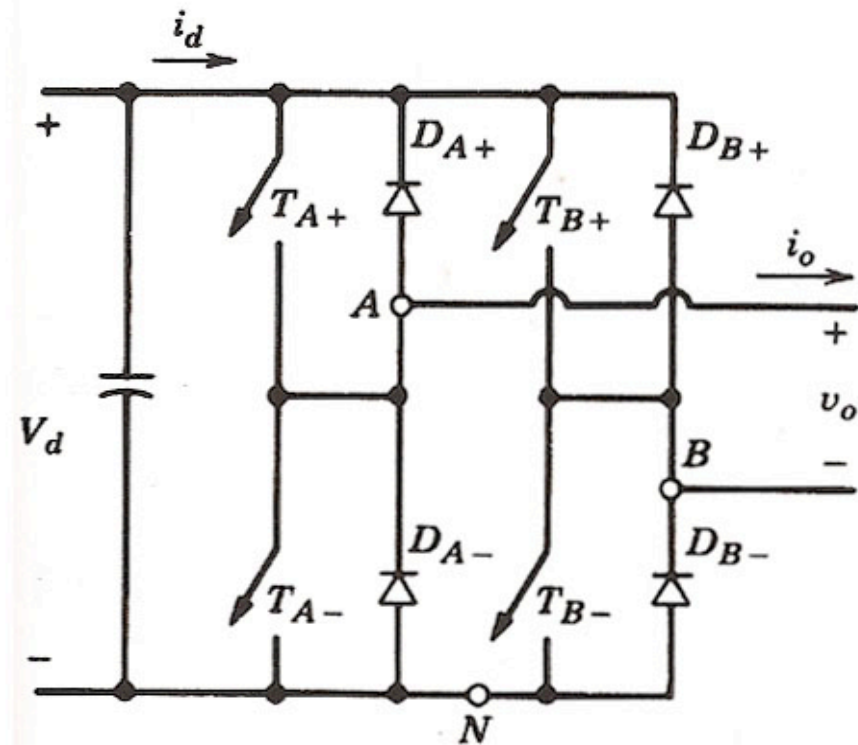
Inversor puente, salida a tres niveles.

La tensión de bloqueo directo de los conmutadores completamente controlados debe ser por lo menos igual a la tensión máxima de alimentación, V_{CCM} . Los dispositivos deben soportar una tensión inversa igual a la tensión AK en conducción de los diodos.

Los diodos deben ser capaces de soportar una tensión inversa por lo menos igual a la tensión máxima de alimentación, V_{CCM} .

La operación del inversor puente completo en el modo de onda cuadrada de dos niveles es idéntica a la analizada para el convertidor medio puente.

Si el inversor puente monofásico se opera en el modo de tres niveles, la forma de onda de salida se puede controlar variando el tiempo de salida nula (salida en estados 3 o 4).

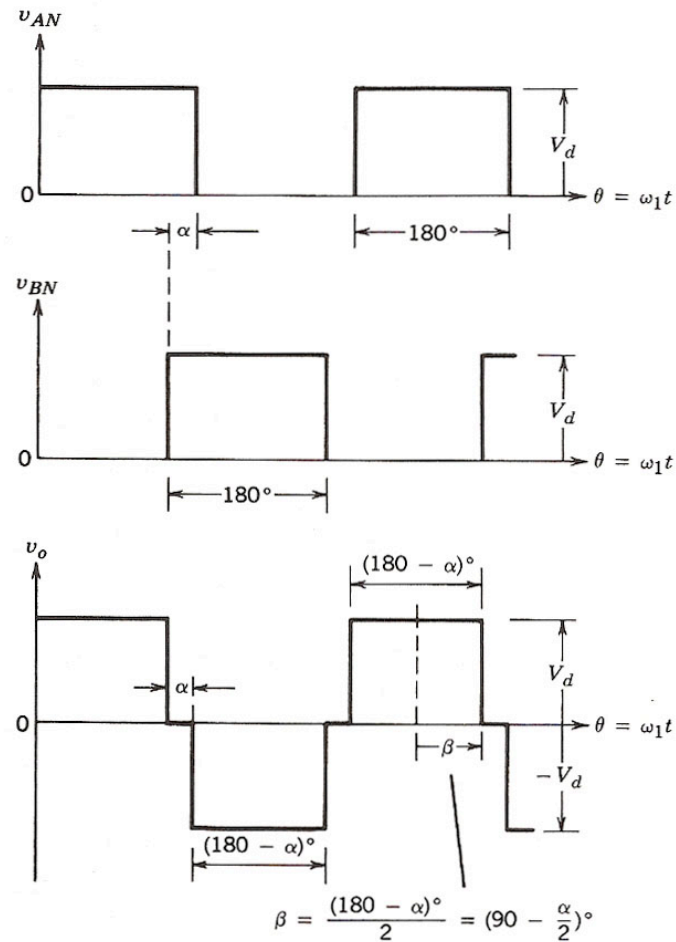


Inversor puente monofásico para el análisis.

Esto se logra haciendo que cada semipunte opere con un ciclo de trabajo del 50% (onda cuadrada) y cambiando la fase relativa de la una de las ondas cuadradas con respecto a la otra, usando como referencia de desfase 0 el que produce la onda cuadrada de dos niveles.

El ángulo de fase de control se denomina α , y se cumple la siguiente relación de control;

- 1.- $\alpha = 0^\circ$, tiempo muerto nulo, salida en onda cuadrada de dos niveles. Tensión de salida máxima.
- 2.- $\alpha = 180^\circ$, salida idénticamente nula.



Forma de onda de salida con control del tiempo muerto mediante el desfase α .

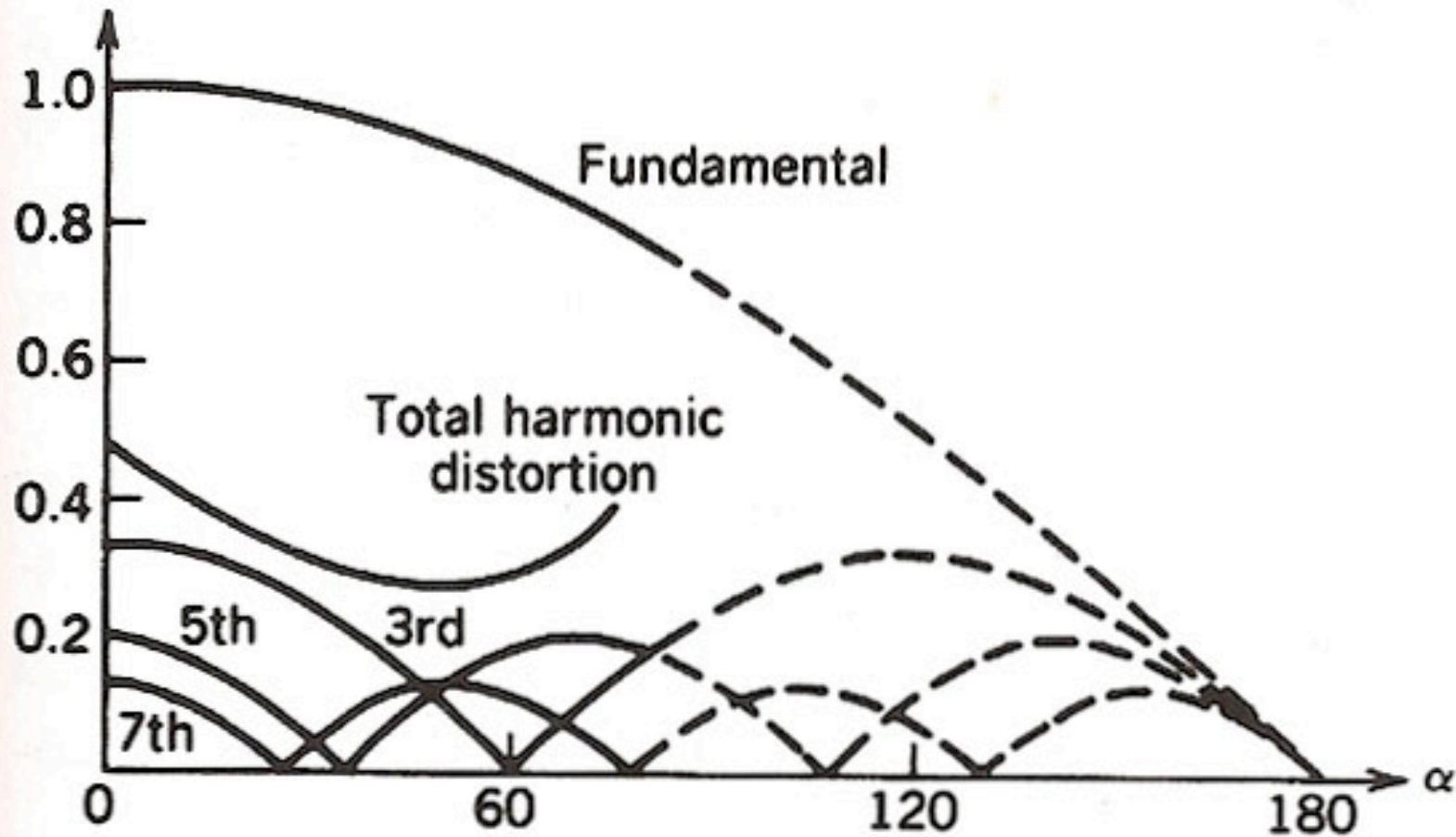
Para valores intermedios, es conveniente definir la variable auxiliar β , cumpliendo con:

$$\beta = 90^\circ - \frac{1}{2}\alpha$$

En estas condiciones, analizando la forma de onda producida a la salida por Fourier, se tiene que la amplitud de la j -ésima armónica es:

$$\hat{V}_j = \frac{2}{\pi} \int_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}} v_o \cos(j\theta) d\theta = \frac{2}{\pi} \int_{-\beta}^{\beta} v_o \cos(j\theta) d\theta = \frac{4}{\pi j} V_d \text{sen}(j\beta)$$

$$j = 2k + 1, \quad k = 0, 1, 2, 3, \dots$$



Espectro armónico de la salida del inversor puente monofásico controlado por tiempo muerto.

Debido al incremento significativo de la distorsión armónica total para valores altos de α , normalmente no se opera con α mayores a unos 60°

II.- Multifásicas.

Las dos configuraciones monofásicas básicas se pueden emplear para generar las correspondientes configuraciones multifásicas, empleando un convertor monofásico básico para generar cada una de las n fases del sistema multifásico; el control del sistema se encarga de generar los desfases adecuados entre las señales de disparo aplicadas a cada convertor monofásico básico para sintetizar las relaciones de fase del sistema multifásico deseado.

En la práctica, con el estado actual de la tecnología la gran mayoría de los inversores multifásicos son inversores trifásicos, como se considera a continuación.

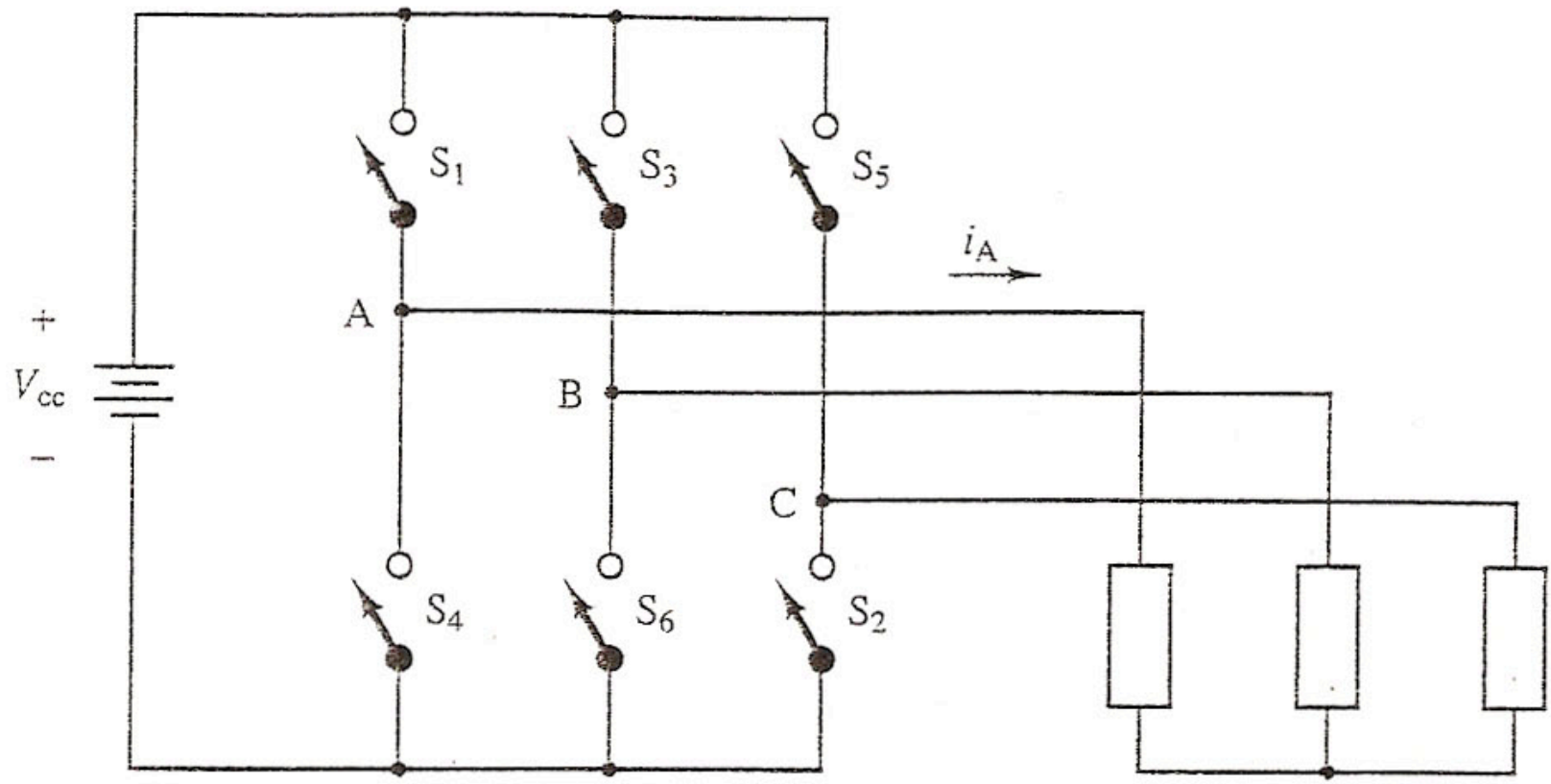
1.- Inversor medio puente trifásico.

El conversor semipuerto trifásico esta formado por tres columnas inversoras medio puente, conectadas a la misma fuente de alimentación y manejadas de forma que cada fase esté desplazada 120° respecto a la que la precede.

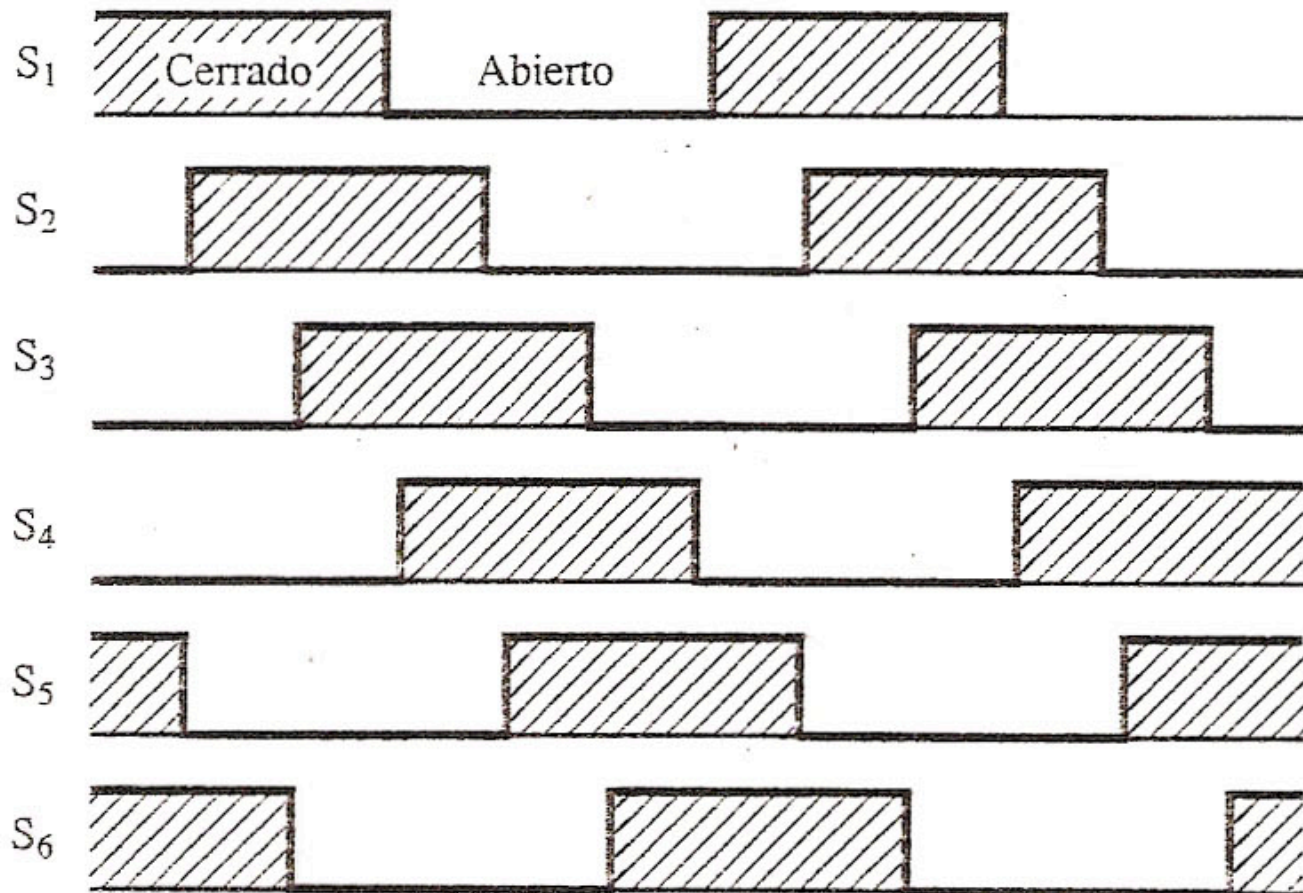
La carga puede estar conectada en estrella (neutro abierto) o en delta.

Cada salida línea-neutro es una onda cuadrada de dos niveles.

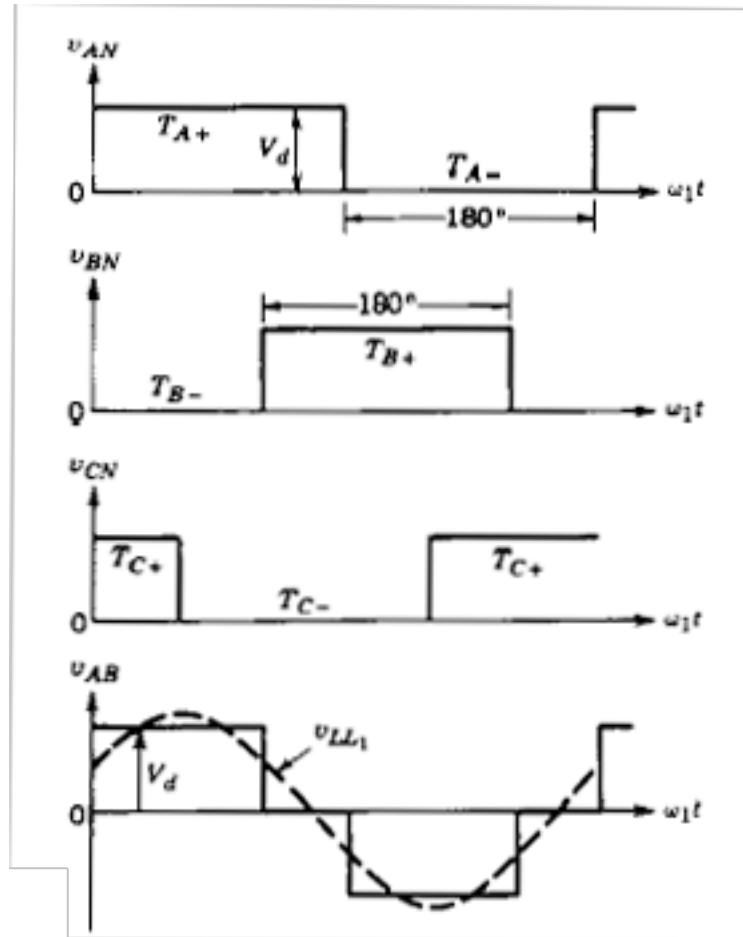
Cada salida línea-línea es una onda cuadrada de tres niveles.



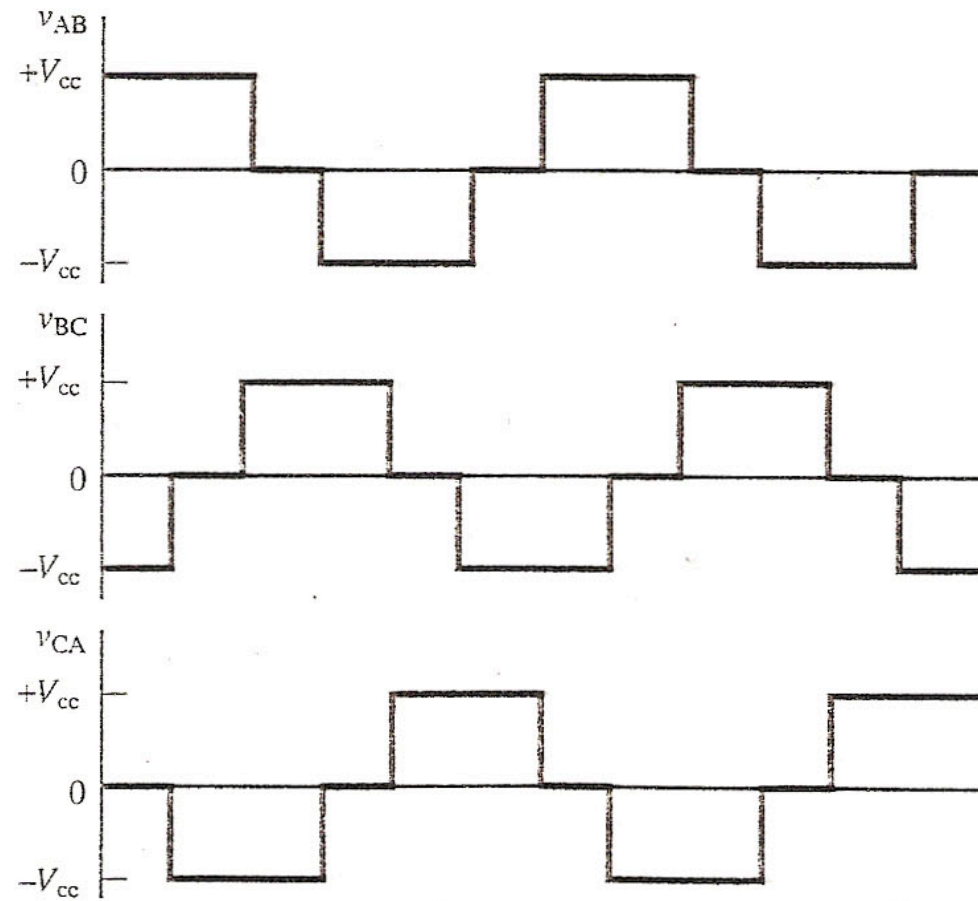
Inversor medio puente trifásico VSI



Secuencia de conmutación en los interruptores del inversor medio puente trifásico trabajando con un ciclo de conducción del 50% (onda cuadrada básica).



Formas de onda de salida del inversor medio puente trifásico: Tensiones línea neutro (V_{AN} , V_{BN} , V_{CN}) y línea-línea (V_{AB}), salida modulada en el modo onda cuadrada básica.



Formas de onda de salida línea-línea del inversor medio puente trifásico VSI con salida modulada en el modo onda cuadrada básica.

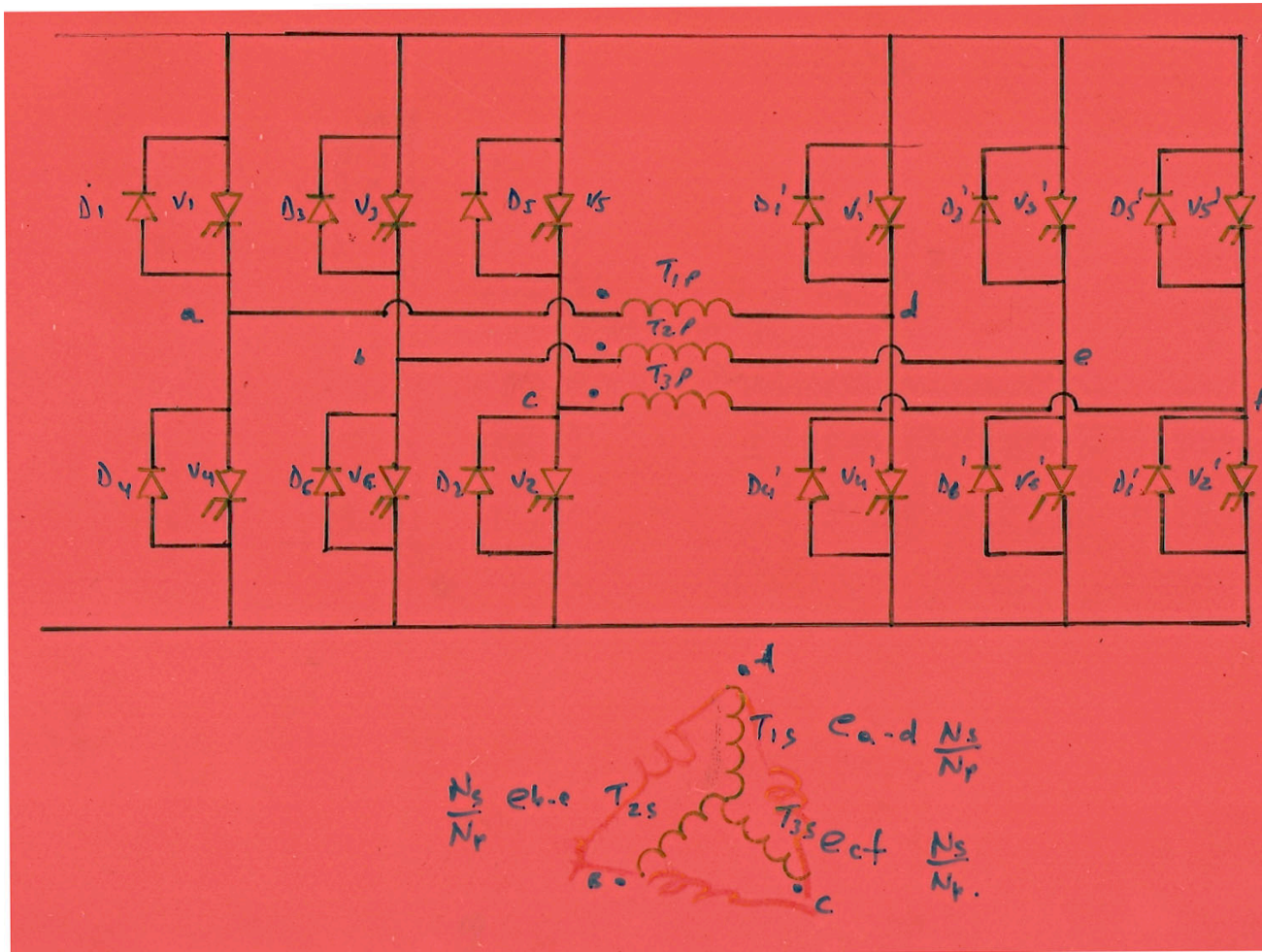
Nótese que en esta configuración los tiempos muertos están prefijados si se desea mantener un sistema de salida trifásico balanceado, por lo que no son una variable que permita controlar la forma de onda de salida.

2.- Inversor puente completo trifásico.

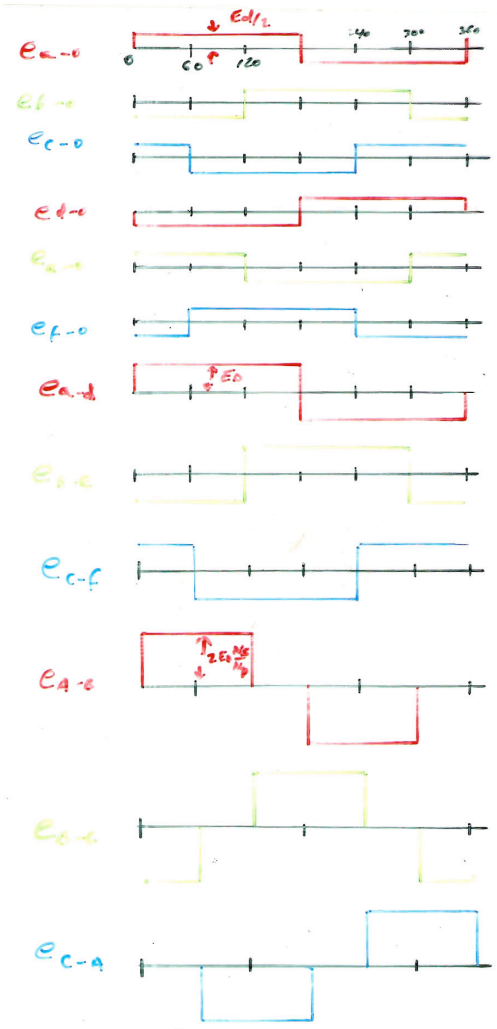
El conversor puente completo trifásico esta formado por tres puentes completos monofásicos (un total de seis columnas inversoras), manejados de forma que las tres salidas línea-línea presenten el desfase deseado.

La carga debe estar conectada en delta abierta.

Cada salida línea-línea es una onda cuadrada de tres niveles.



Inversor trifásico puente completo VSI con salida acoplada por transformador.



Formas de onda de salida, puente trifásico completo.

La forma de onda de salida de cada fase se puede controlar empleando el método de la variación del tiempo muerto.

Dado que en general se desea sintetizar un sistema trifásico balanceado, el ángulo de desfase α introducido en cada una de las tres fases debe ser el mismo.

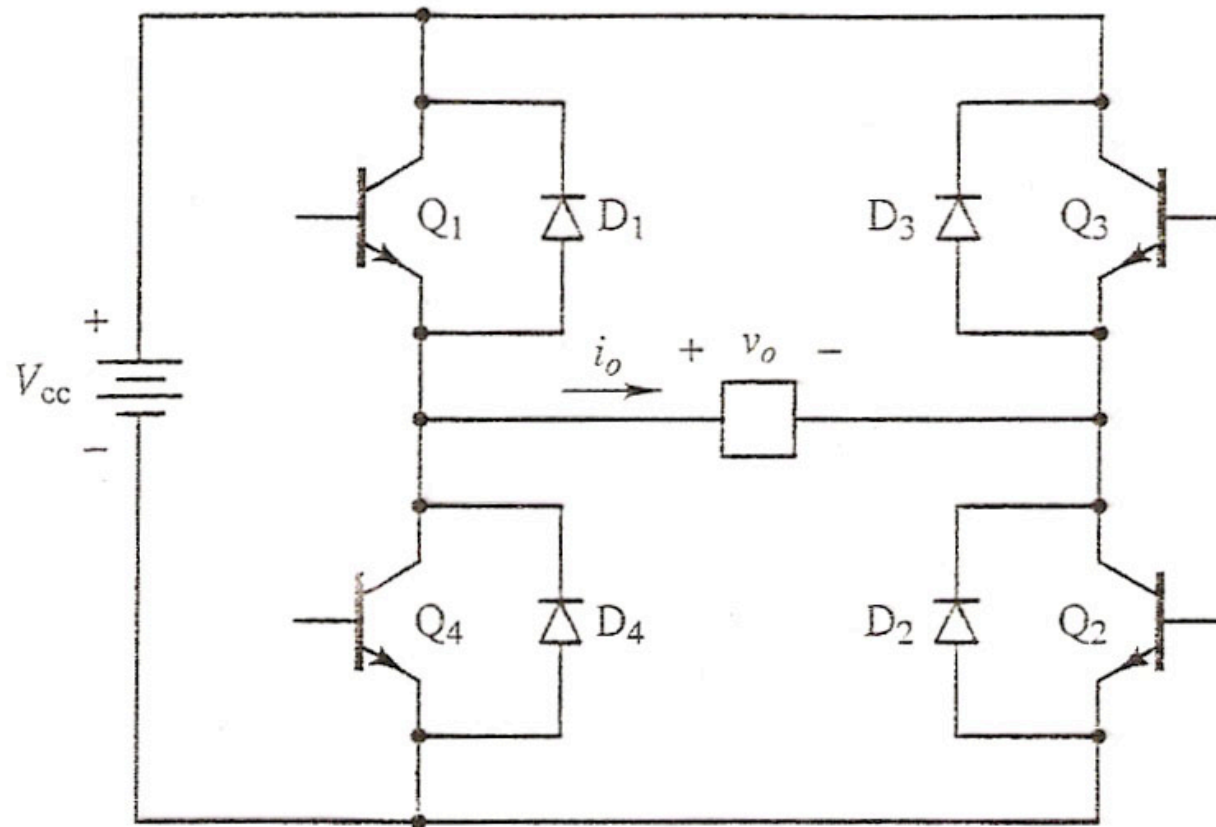
Cálculo de la corriente en un inversor.

Conocido el valor de los componentes armónicos de la forma de onda de voltaje generada a la salida, el valor de cada uno de los componentes armónicos de corriente en la salida se puede calcular en base al correspondiente voltaje armónico y a la impedancia de la carga a la armónica correspondiente.

En el caso general la tensión instantánea de salida de un inversor es un tren de pulsos cuadrados. Dada esta forma de onda, si la carga es reactiva, el cálculo de la corriente instantánea debe realizarse punto a punto, preferiblemente con la ayuda de un programa de simulación circuital, tipo PSPICE o equivalente.

En algunos casos simples es factible desarrollar un análisis que permite obtener soluciones manualmente.

Como ejemplo del procedimiento se presenta el análisis del convertidor DC/AC monofásico VSI puente con salida de dos niveles y modulación en onda cuadrada de dos niveles, carga RL.



Circuito de ejemplo de cálculo.

Inversor puente VSI, salida en onda cuadrada de dos niveles,
carga RL.

A: Cuando Q_1 y Q_2 están cerrados:

$$i_o(t) = i_p(t) + i_t(t) = \frac{V_{cc}}{R} + Ae^{-\frac{t}{\tau}}, \quad 0 \leq t \leq \frac{T}{2}$$

$$\text{donde: } \tau = \frac{L}{R}$$

$i_p(t)$ es la componente permanente de la corriente.

$i_t(t)$ es la componente transitoria de la corriente.

B: Cuando Q_3 y Q_4 están cerrados:

$$i_o(t) = -\frac{V_{cc}}{R} + Be^{-\frac{\left(t - \frac{T}{2}\right)}{\tau}}, \quad \frac{T}{2} \leq t \leq T$$

$$i_o(0) = \frac{V_{cc}}{R} + Ae^0 = I_{\min}$$

$$A = I_{\min} - \frac{V_{cc}}{R}$$

$$i_o\left(\frac{T}{2}\right) = -\frac{V_{cc}}{R} + Be^0 = I_{\max}$$

$$B = I_{\max} + \frac{V_{cc}}{R}$$

$$i_o(t) = \frac{V_{cc}}{R} + \left(I_{\min} - \frac{V_{cc}}{R} \right) e^{-\frac{t}{\tau}} \quad \text{para } 0 \leq t \leq \frac{T}{2}$$

$$i_o(t) = \frac{-V_{cc}}{R} + \left(I_{\max} + \frac{V_{cc}}{R} \right) e^{-\frac{\left(t - \frac{T}{2} \right)}{\tau}} \quad \text{para } \frac{T}{2} \leq t \leq T$$

$$i_o\left(\frac{T}{2}\right) = \frac{V_{cc}}{R} + \left(I_{\min} - \frac{V_{cc}}{R}\right) e^{-\frac{\frac{T}{2}}{\tau}} = I_{\max}$$

$$i_o(T) = \frac{-V_{cc}}{R} + \left(I_{\max} + \frac{V_{cc}}{R}\right) e^{-\frac{\left(T - \frac{T}{2}\right)}{\tau}} = I_{\min}$$

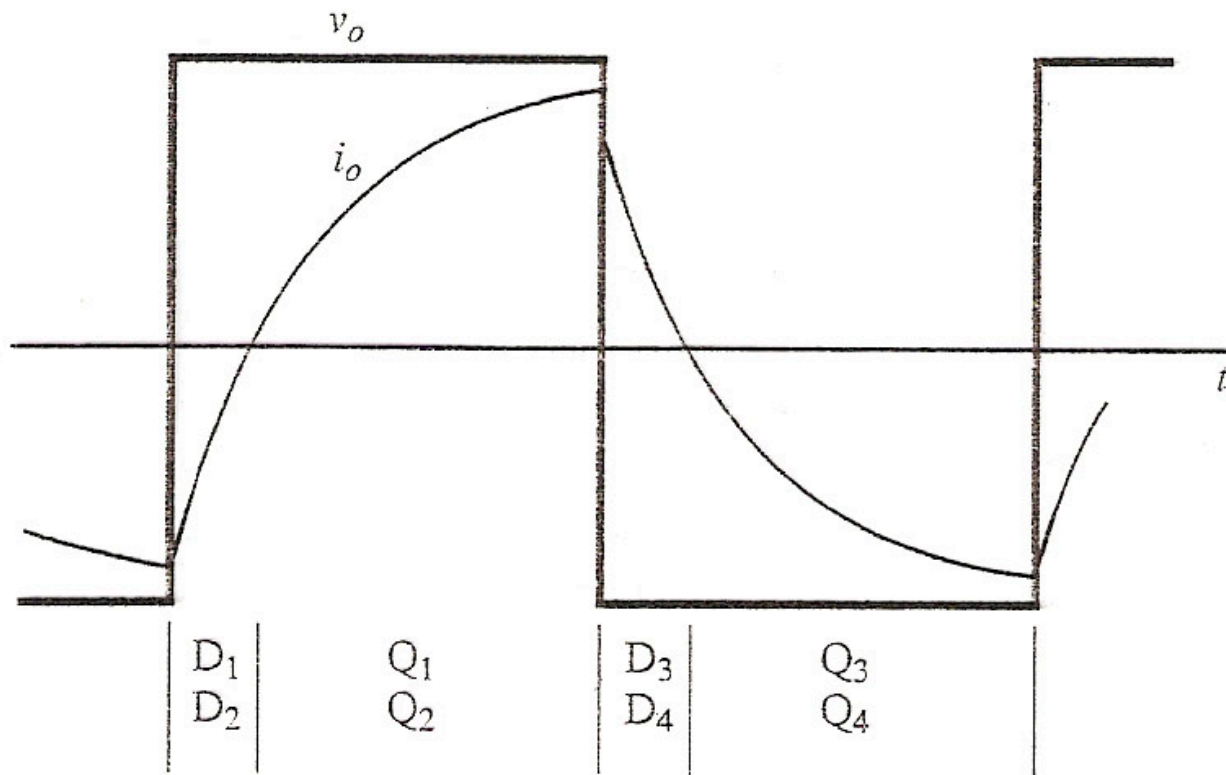
Resolviendo el sistema de dos ecuaciones y dos incognitas:

$$I_{\max} = -I_{\min} = \frac{V_{cc}}{R} \begin{bmatrix} \frac{-T}{1 - e^{\frac{2\tau}{-T}}} \\ \frac{-T}{1 + e^{\frac{2\tau}{-T}}} \end{bmatrix}$$

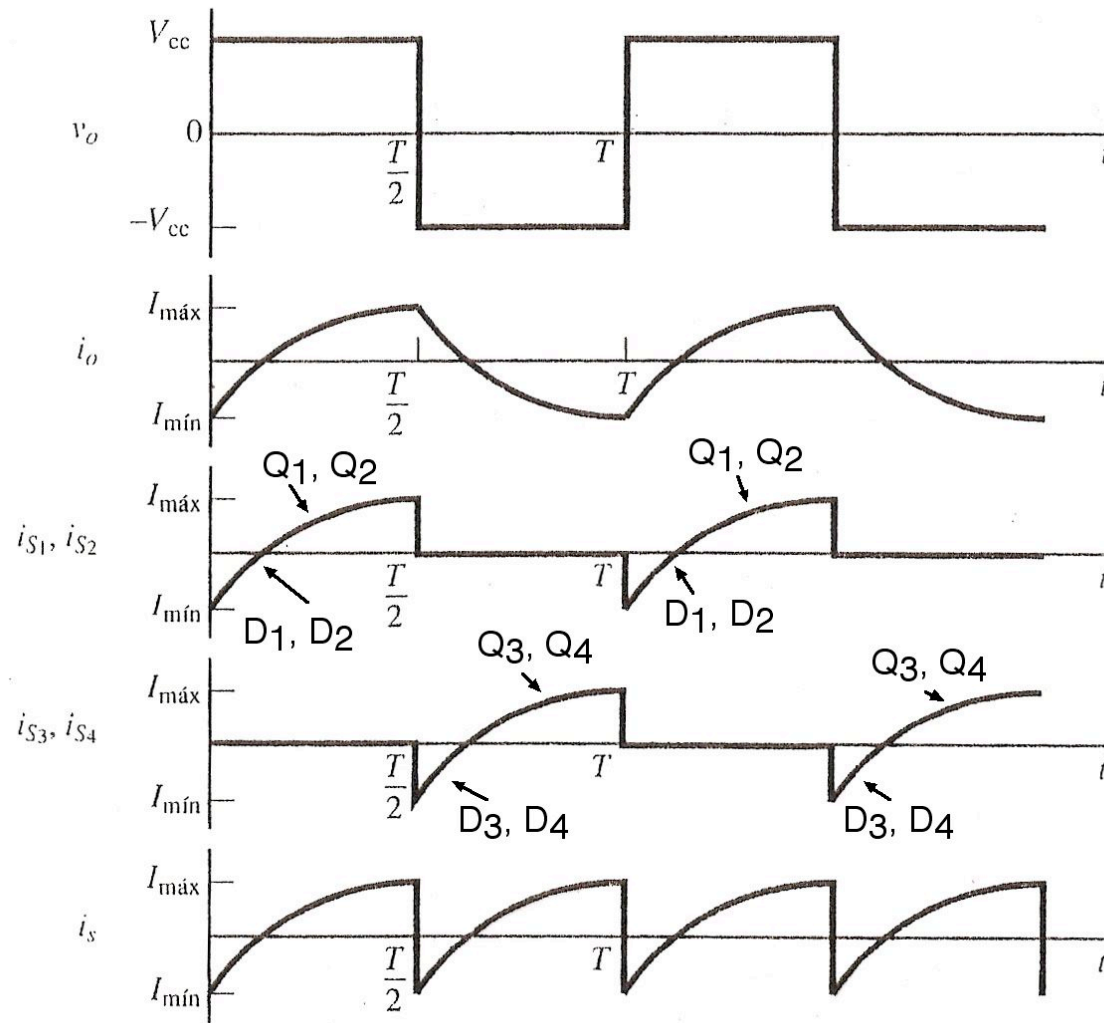
$$i_o(t) = \frac{V_{cc}}{R} - \frac{V_{cc}}{R} \left[\left(\frac{\frac{-T}{1 - e^{\frac{2\tau}{-T}}}}{\frac{-T}{1 + e^{\frac{2\tau}{-T}}}} + 1 \right) e^{-\frac{t}{\tau}} \right] \text{ para } 0 \leq t \leq \frac{T}{2}$$

$$i_o(t) = \frac{-V_{cc}}{R} + \frac{V_{cc}}{R} \left[\left(\frac{1 - e^{\frac{-T}{2\tau}}}{1 + e^{\frac{-T}{2\tau}}} \right) + 1 \right] e^{-\frac{\left(t - \frac{T}{2}\right)}{\tau}}$$

para $\frac{T}{2} \leq t \leq T$



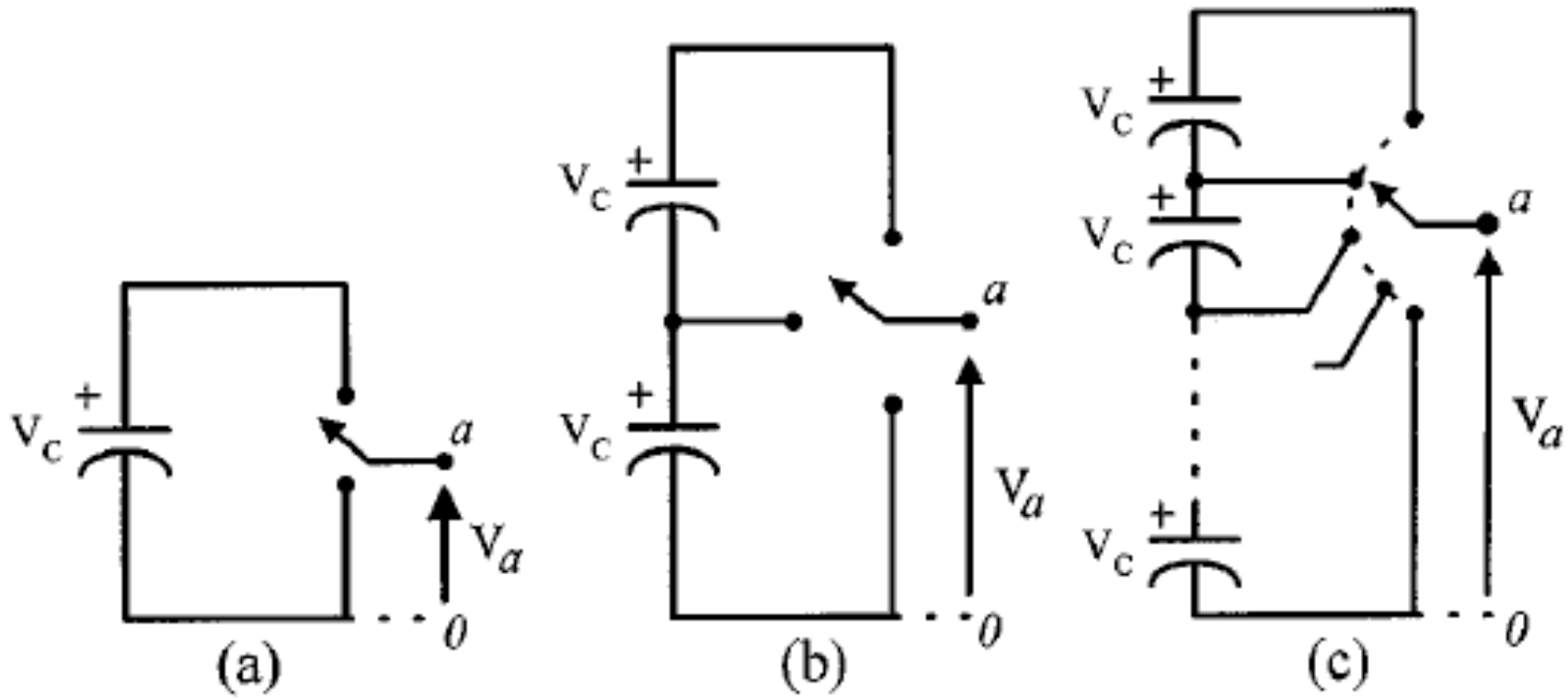
Formas de onda genéricas de corriente y voltaje, inversor puente con salida de dos niveles y carga RL.



Formas de onda en los diferentes componentes del circuito

Inversores multinivel.

Un inversor multinivel es un arreglo inversor en el cual se incluyen n etapas de conmutación para producir una salida discretizada en n niveles de tensión.



- (a) Inversor de dos niveles
- (b) Inversor de tres niveles
- (c) Inversor de n niveles

Esto busca lograr dos objetivos:

- 1.- Permitir que la tensión de salida total sea n veces mayor que la tensión manejada por cada dispositivo conmutador individual.
- 2.- Lograr una forma de onda escalonada a la salida que tenga un contenido armónico reducido sin necesidad de aumentar la frecuencia de conmutación significativamente sobre la frecuencia de salida.
- 3.- Reducir el dv/dt aplicado a los componentes del conversor y a la carga

Estos objetivos se logran aceptando las siguientes desventajas.

1.- Complejidad circuital más elevada.

2.- Mayor complejidad en el sistema de control

3.- Mayores problemas para mantener el balance de tensión en los capacitares que almacenan los n voltajes del arreglo.

Las topologías multinivel más empleadas son:

- 1.- Inversor limitado por diodos (Diode Clamped Inverter)
- 2.- Inversor limitado por condensadores (Capacitor Clamped Inverter)
- 3.- Inversores de celdas en cascada (Cascade Multicell Inverters)

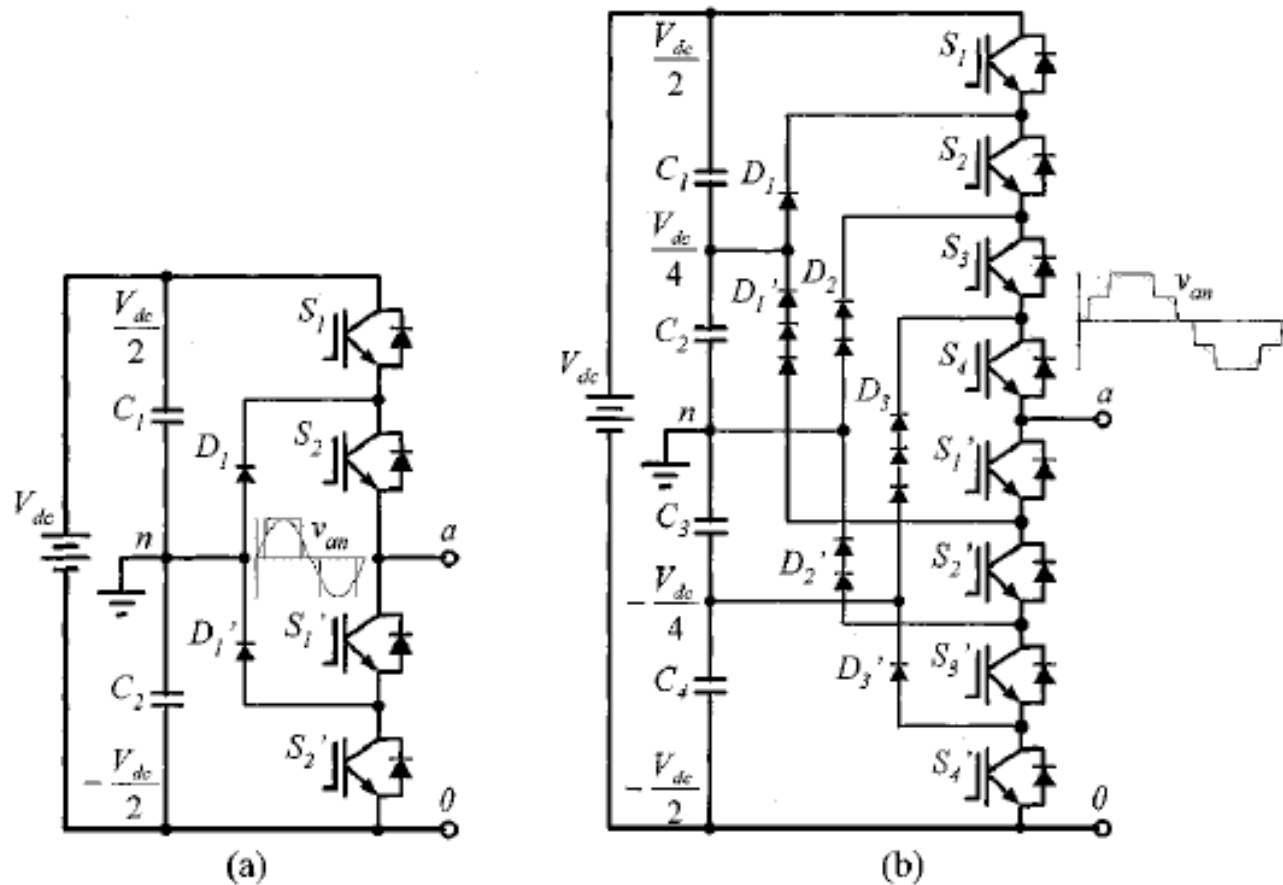
Las configuraciones inversoras multinivel básicas que van a ser consideradas son monofásicas. El arreglo usual, trifásico medio puente, se logra colocando tres convertidores monofásicos operando con el desfase adecuado conectados a una carga en Y sin neutro.

El arreglo trifásico puente completo es también posible, pero requiere 6 columnas inversoras de n niveles y una carga conectada en Δ abierta.

Si m es el número de pasos discretos posibles en la tensión con respecto al neutro en una de las columnas inversoras, entonces el número de niveles k en la tensión línea-línea es:

$$k = 2m + 1$$

Inversor multinivel limitado por diodos (Diode Clamped Multilevel Inverter)

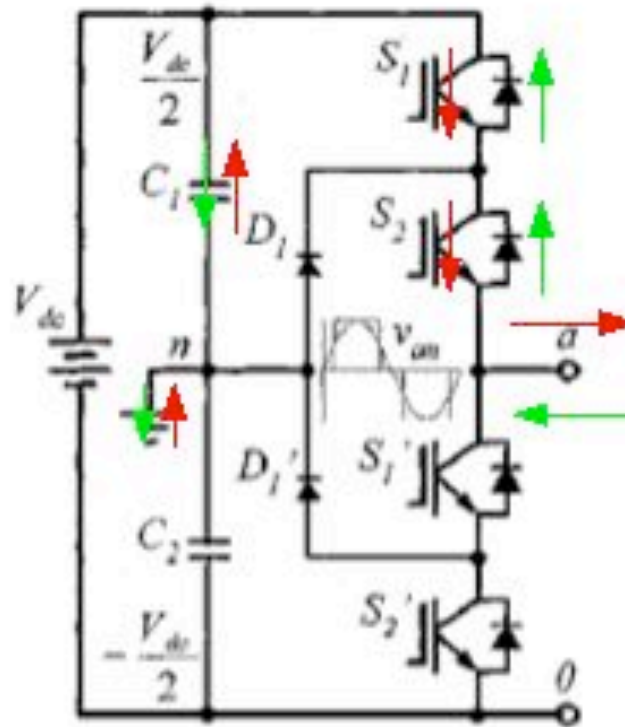


Inversor limitado por diodos (Diode Clamped Inverter)

- (a) De tres niveles.
- (b) De cinco niveles.

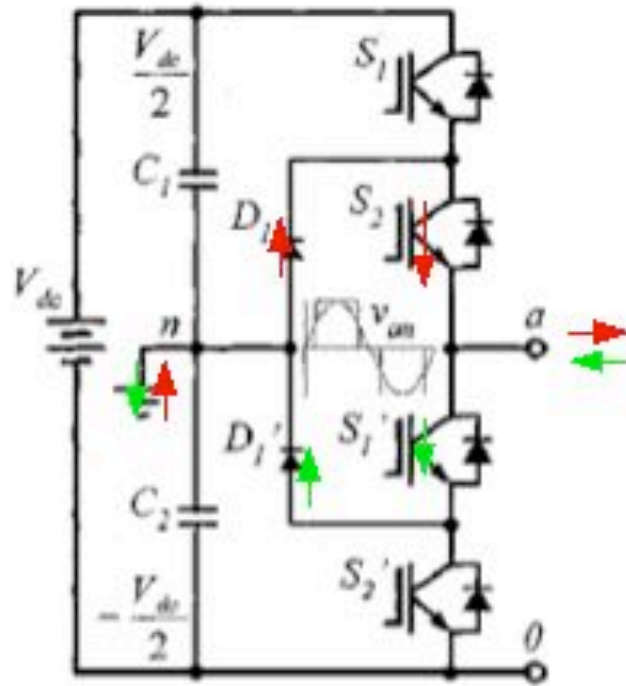
Operación del inversor limitado por diodos de tres niveles

S_1 y S_2 "ON" producen una tensión $V_{an} = \frac{V_{dc}}{2}$



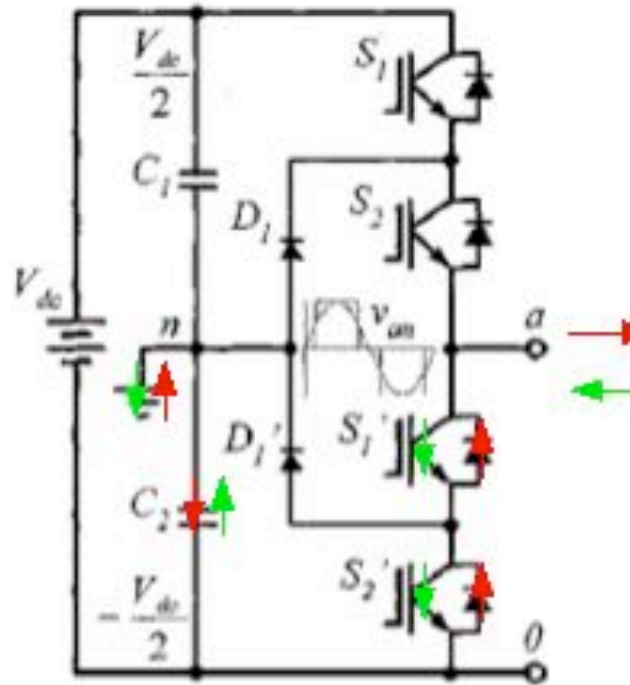
Flechas rojas: Dispositivos por los que circula la corriente saliente.
Flechas verdes: Dispositivos por los que circula la corriente entrante.

S_2 y S'_1 "ON" producen una tensión $V_{an} = 0$



Flechas rojas: Dispositivos por los que circula la corriente saliente.
Flechas verdes: Dispositivos por los que circula la corriente entrante.

S'_1 y S'_2 "ON" producen una tensión $V_{an} = -\frac{V_{dc}}{2}$

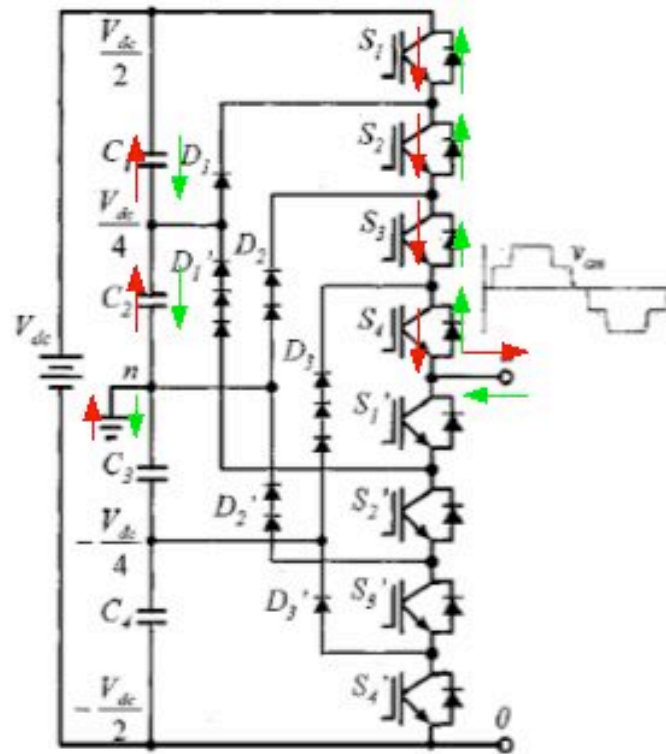


Flechas rojas: Dispositivos por los que circula la corriente saliente.
Flechas verdes: Dispositivos por los que circula la corriente entrante.

La tensión inversa que bloquea cada interruptor controlado
y cada diodo es $\frac{V_{dc}}{2}$

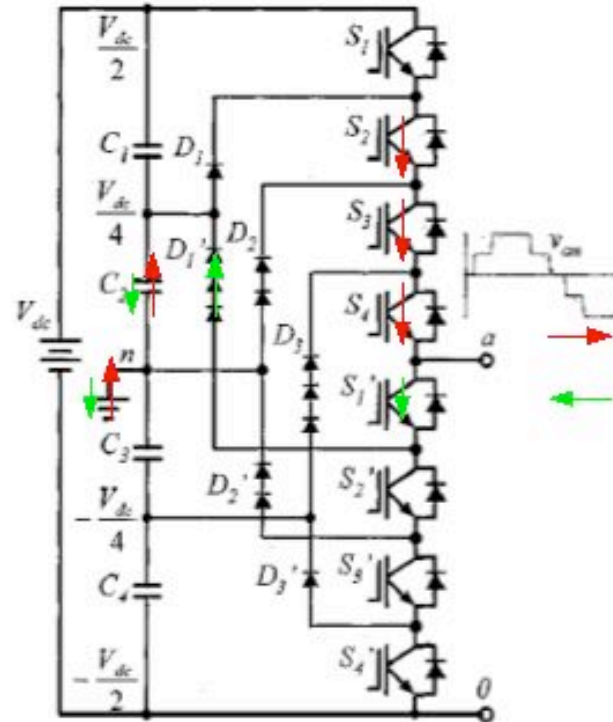
Operación del inversor limitado por diodos de cinco niveles:

$$S_1 \text{ a } S_4 \text{ "ON" produce } V_{an} = \frac{V_{dc}}{2}$$



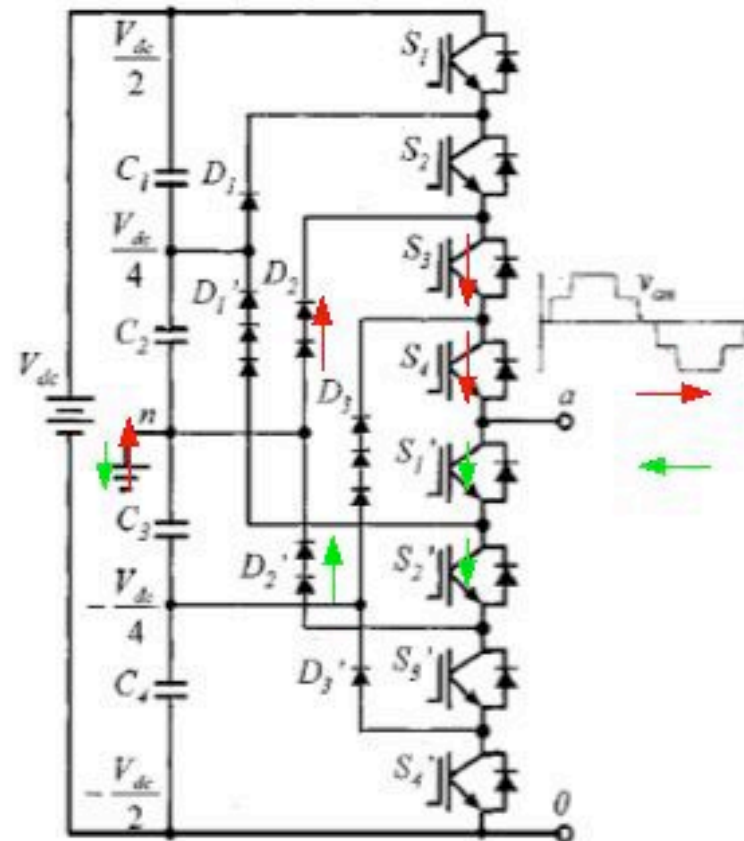
Flechas rojas: Dispositivos por los que circula la corriente saliente.
 Flechas verdes: Dispositivos por los que circula la corriente entrante.

S_2 a S_4 y S'_1 "ON" produce $V_{an} = \frac{V_{dc}}{4}$



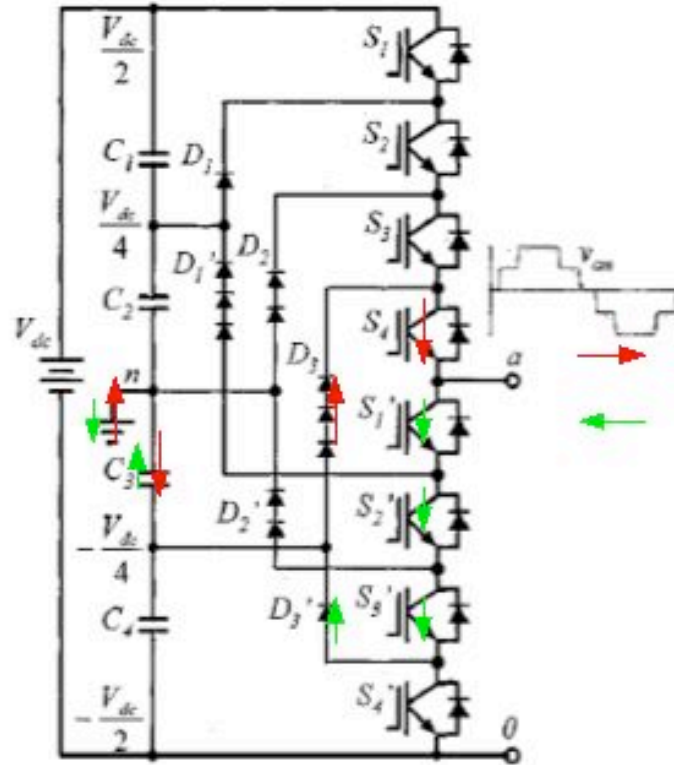
Flechas rojas: Dispositivos por los que circula la corriente saliente.
 Flechas verdes: Dispositivos por los que circula la corriente entrante.

S_3 y S_4 , S'_1 y S'_2 "ON" produce $V_{an} = 0$



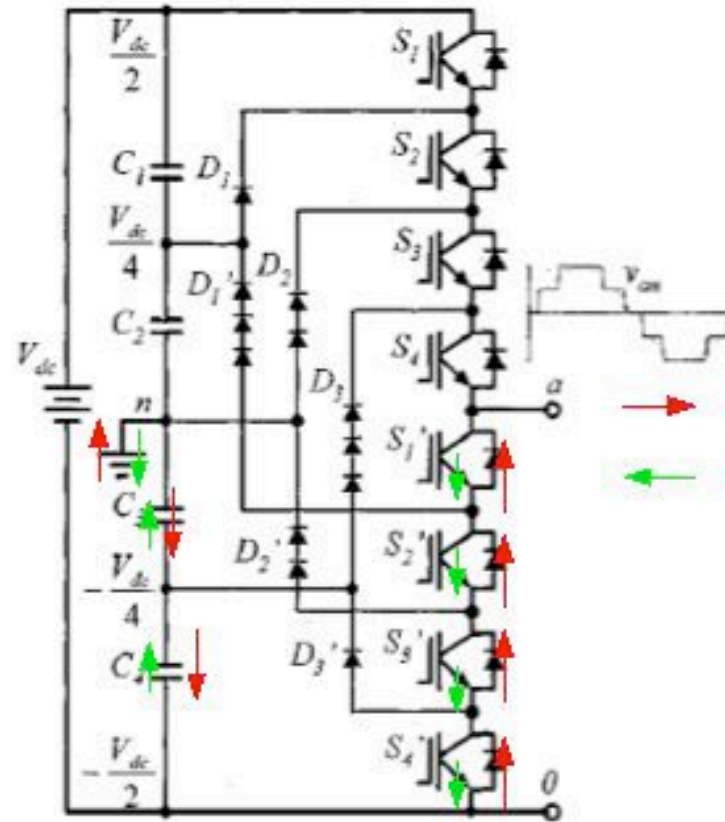
Flechas rojas: Dispositivos por los que circula la corriente saliente.
Flechas verdes: Dispositivos por los que circula la corriente entrante.

S_4 y S'_1 a S'_3 "ON" produce $V_{an} = -\frac{V_{dc}}{4}$



Flechas rojas: Dispositivos por los que circula la corriente saliente.
 Flechas verdes: Dispositivos por los que circula la corriente entrante.

S'_1 a S'_4 "ON" produce $V_{an} = -\frac{V_{dc}}{2}$



Flechas rojas: Dispositivos por los que circula la corriente saliente.
 Flechas verdes: Dispositivos por los que circula la corriente entrante.

En la configuración existen cuatro pares complementarios que no pueden ser encendidos simultáneamente.

Los pares son:

S_1, S'_1

S_2, S'_2

S_3, S'_3

S_4, S'_4

Cada interruptor completamente controlado debe bloquear una tensión inversa igual a $\frac{V_{dc}}{m-1}$ ($\frac{V_{dc}}{4}$ en este ejemplo)

La tensión que deben bloquear los diodos depende de su posición en el arreglo. En la gráfica se asume que los diodos tienen la misma capacidad básica de bloqueo ($\frac{V_{dc}}{m-1}$ en general, $\frac{V_{dc}}{4}$ en este ejemplo), y las tensiones crecientes se bloquean colocando dos o tres diodos en serie, para superar respectivamente las tensiones de $\frac{2V_{dc}}{4}$ y $\frac{3V_{dc}}{4}$.

Si se emplean diodos de capacidad de bloqueo igual a la de los interruptores controlados, el número de diodos requerido en cada columna inversora, N_d , será:

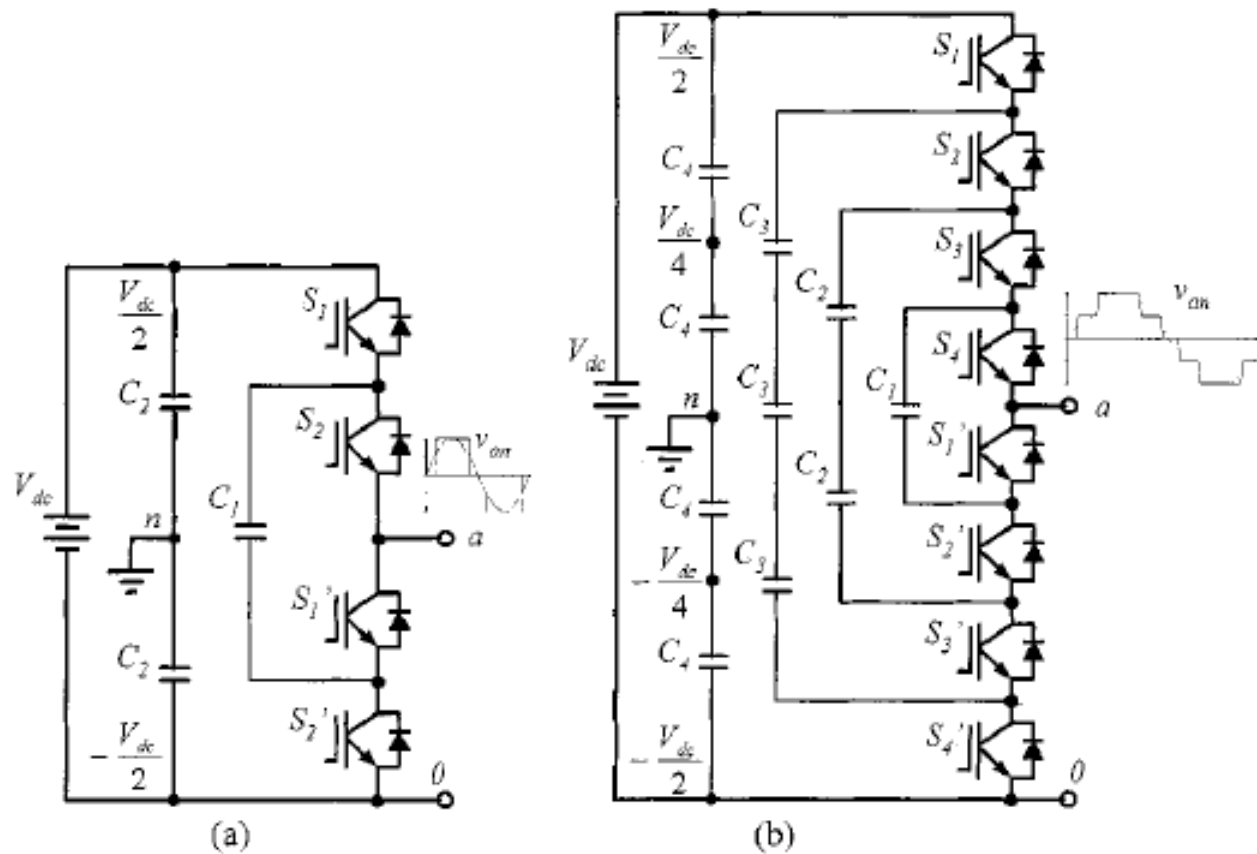
$$N_d = (m - 1)(m - 2) = m^2 - 3m + 2$$

Esto indica que el número de diodos crece cuadráticamente con el número de escalones de tensión, lo que hace impráctica la configuración para m elevados.

Adicionalmente, la gran cantidad de diodos implica que el efecto de las recuperaciones inversas de los mismos será significativo si la frecuencia de conmutación es elevada.

Se requieren $m-1$ condensadores en el arreglo.

Inversor multinivel limitado con condensadores (Capacitor clamped multilevel inverter)

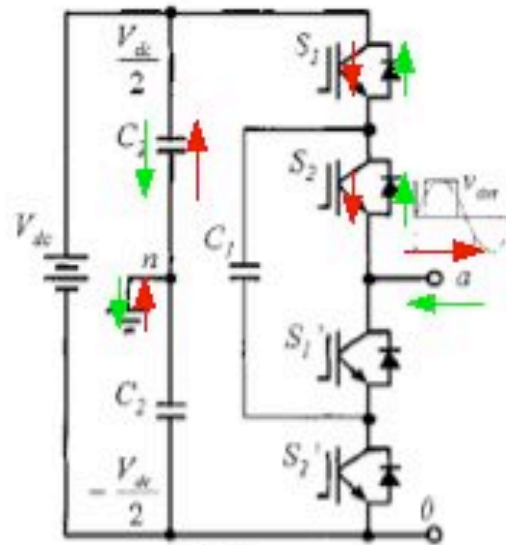


Inversor limitado por condensadores (Capacitor Clamped Inverter)

- (a) De tres niveles.
- (b) De cinco niveles.

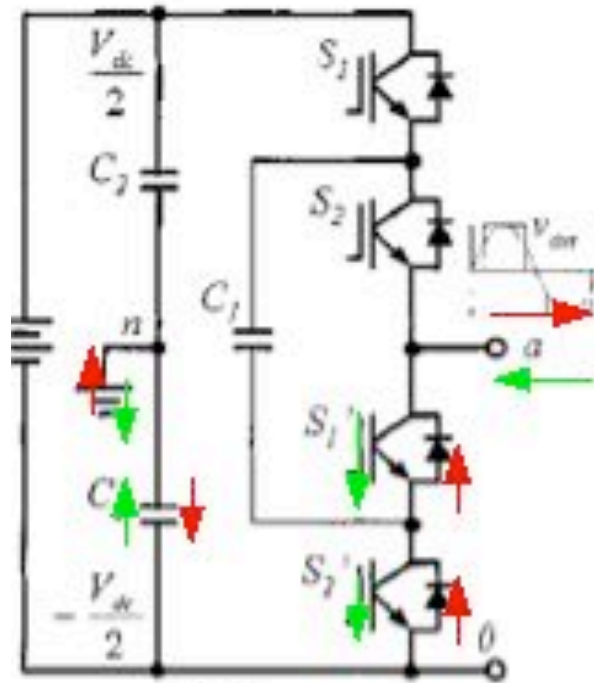
Operación del inversor limitado por condensador (o de condensador flotante) de tres niveles

1.- Para producir $\frac{V_{dc}}{2}$, S_1 y S_2 encendidos



Flechas rojas: Dispositivos por los que circula la corriente saliente.
Flechas verdes: Dispositivos por los que circula la corriente entrante.

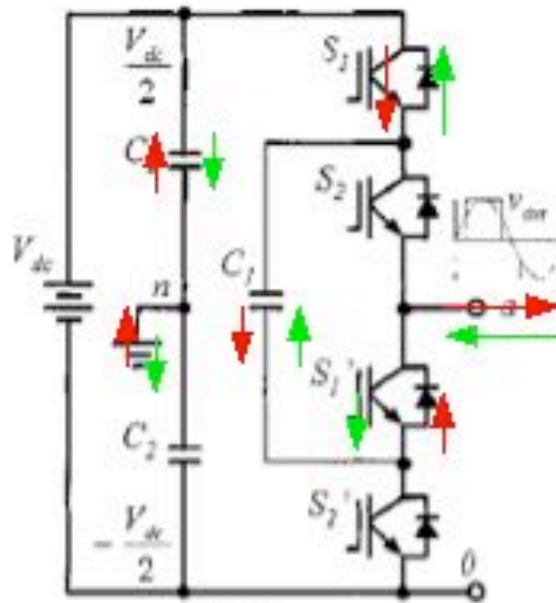
2.- Para producir $-\frac{V_{dc}}{2}$, S'_1 y S'_2 encendidos



Flechas rojas: Dispositivos por los que circula la corriente saliente.
Flechas verdes: Dispositivos por los que circula la corriente entrante.

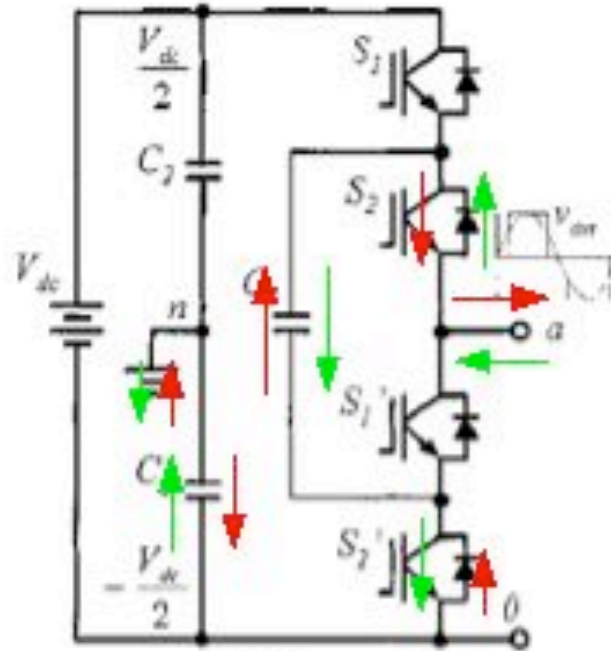
3.- Para producir 0, hay dos combinaciones posibles:

a.- S_1 y S'_1 encendidos



Flechas rojas: Dispositivos por los que circula la corriente saliente.
Flechas verdes: Dispositivos por los que circula la corriente entrante.

b.- S_2 y S'_2 encendidos



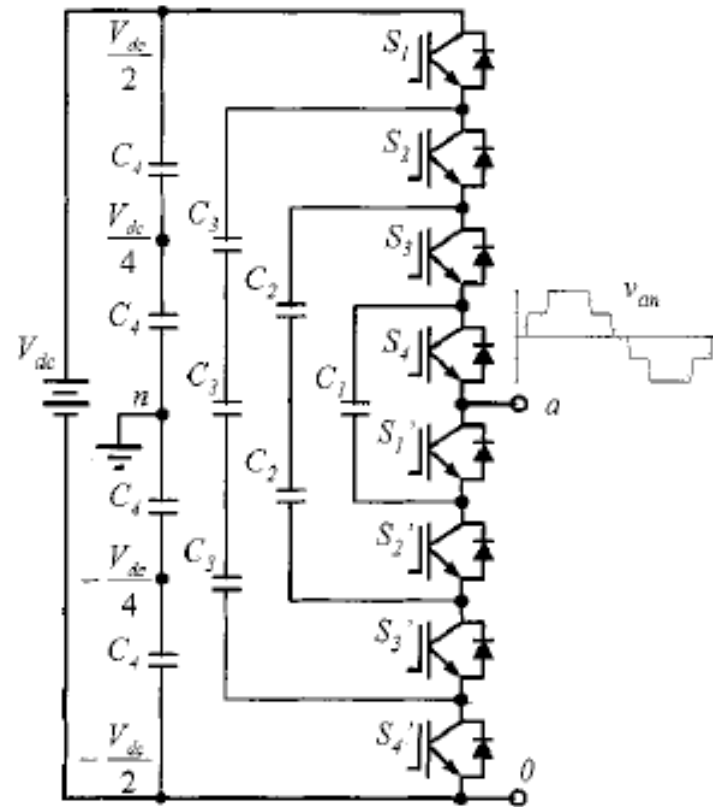
Flechas rojas: Dispositivos por los que circula la corriente saliente.
Flechas verdes: Dispositivos por los que circula la corriente entrante.

El condensador flotante C_1 cambia su estado de carga durante el intervalo de salida 0.

a.- C_1 se carga cuando S_1 y S'_1 están encendidos

b.- C_1 se descarga cuando S_2 y S'_2 están encendidos

Dado que los cambios en la tensión de C_1 deben promediar 0 en un ciclo de trabajo, el sistema de control debe encargarse de regular la duración de los intervalos de salida nula producidos por las dos combinaciones posibles para equilibrar el efecto de los períodos de carga y descarga de C_1



Inversor limitado por condensadores (Capacitor Clamped Inverter) de cinco niveles.

Operación del inversor limitado por condensador (o de condensador flotante) de cinco niveles.

1.- Para producir $\frac{V_{dc}}{2}$, S_1 a S_4 encendidos

2.- Para producir $\frac{V_{dc}}{4}$ hay tres posibilidades:

a.- S_1 a S_3 y S'_1 encendidos, en cuyo caso:
 $V_{an} = V_{dc}/2$ de los C_4 s superiores $-V_{dc}/4$ de C_1

b.- S_2 a S_4 y S'_4 encendidos, en cuyo caso:
 $V_{an} = 3V_{dc}/4$ de los C_3 s $-V_{dc}/2$ de los C_4 s inferiores

c.- S_1, S_3, S_4 y S'_3 , en cuyo caso:

$$V_{an} = V_{dc}/2 \text{ de los } C_4\text{s superiores} - 3V_{dc}/4 \text{ de los } C_3\text{s} + V_{dc}/2 \text{ de } C_2$$

3.- Para producir 0 hay seis posibilidades:

a.- S_1, S_2, S'_1 y S'_2 encendidos, en cuyo caso:

$$V_{an} = V_{dc}/2 \text{ de los } C_4\text{s superiores} - V_{dc}/2 \text{ de los } C_2\text{s}$$

b.- S_3, S_4, S'_3 y S'_4 encendidos, en cuyo caso:

$$V_{an} = V_{dc}/2 \text{ de los } C_2\text{s} - V_{dc}/2 \text{ de los } C_4\text{s inferiores.}$$

c.- S_1, S_3, S'_1 y S'_3 , en cuyo caso:

$$V_{an} = V_{dc}/2 \text{ de los } C_4\text{s superiores} - 3V_{dc}/4 \text{ de los } C_3\text{s} + V_{dc}/2 \\ \text{de los } C_2\text{s} - V_{dc}/4 \text{ de } C_1$$

d.- S_1, S_4, S'_2 y S'_3 encendidos, en cuyo caso:

$$V_{an} = V_{dc}/2 \text{ de los } C_4\text{s superiores} - 3V_{dc}/4 \text{ de los } C_3\text{s} + \\ V_{dc}/4 \text{ de } C_1$$

e.- S_2, S_4, S'_2 y S'_4 encendidos, en cuyo caso:

$$V_{an} = 3V_{dc}/4 \text{ de los } C_3\text{s} - V_{dc}/2 \text{ de los } C_2\text{s} + V_{dc}/4 \text{ de } C_1 - \\ V_{dc}/2 \text{ de los } C_4\text{s inferiores}$$

f.- S_2, S_3, S'_1 y S'_4 encendidos, en cuyo caso:
 $V_{an} = 3V_{dc}/4$ de los C_3 s $-V_{dc}/4$ de C_1 $-V_{dc}/2$ de los C_4 s inferiores

4.- Para producir $-\frac{V_{dc}}{4}$ hay tres combinaciones:

a.- S_1 y S'_1 a S'_3 encendidos, en cuyo caso:
 $V_{an} = V_{dc}/2$ de los C_4 s superiores $-3V_{dc}/4$ de los C_3 s.

b.- S_4 y S'_2 a S'_4 encendidos, en cuyo caso:
 $V_{an} = V_{dc}/4$ de C_1 $-V_{dc}/2$ de los C_4 s inferiores

c.- S_3 y S'_1 , S'_3 y S'_4 encendidos, en cuyo caso:
 $V_{an} = V_{dc}/2$ de los C_2 - $V_{dc}/4$ de C_1 - $V_{dc}/2$ de los C_4 s inferiores.

5.- Para producir $-\frac{V_{dc}}{2}$, S'_1 a S'_4 encendidos.

En la discusión anterior, los capacitares incluidos en las ecuaciones con signo positivo se descargan (la corriente sale del terminal positivo), mientras que los incluidos con signo negativo se cargan (la corriente entra por el terminal positivo).

Dado que en un ciclo es preciso que el flujo de carga neto en los condensadores sea cero, el controlador debe encargarse de equilibrar los procesos de carga y descarga en cada uno de los condensadores a lo largo de cada ciclo de salida, haciendo uso adecuado de las diferentes combinaciones que permiten obtener los distintos estados.

Si se desea que las tensiones nominales de cada condensador empleado en el arreglo sean las mismas e iguales a las que soportan los interruptores controlados principales, cada columna inversora de m niveles requerirá un número N_{cf} de condensadores flotantes igual a:

$$N_{cf} = \frac{(m-1)(m-2)}{2}$$

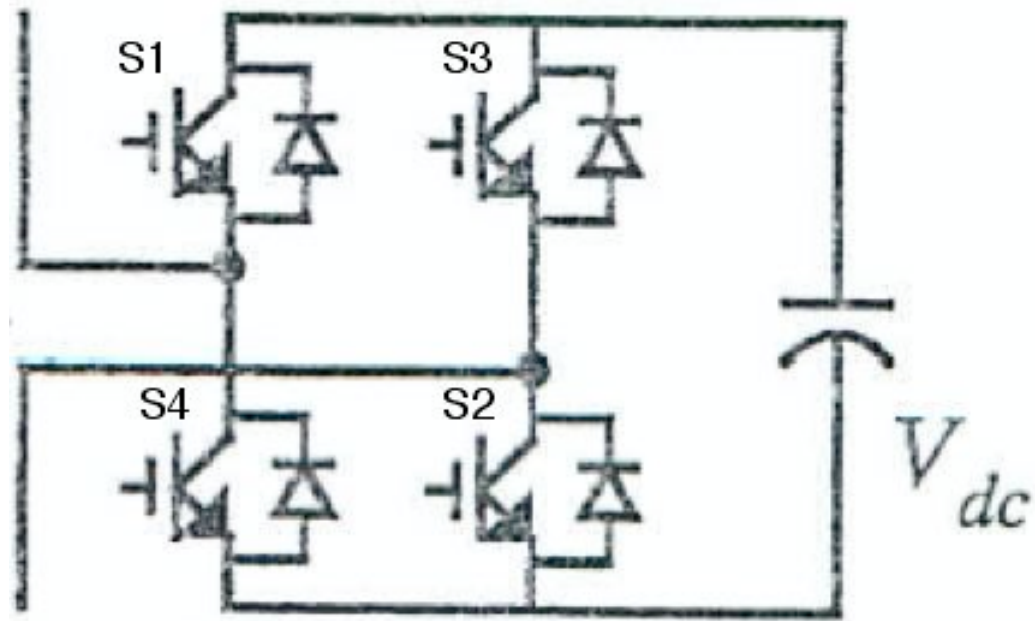
Además se requieren $(m-1)$ condensadores para el divisor principal de tensión del bus DC.

Esto indica que el número de condensadores crece cuadráticamente con el número de escalones de tensión, lo que hace impráctica la configuración para m elevados.

Inversor multinivel de celdas en cascada (Cascade Multicell Inverter)

El inversor multinivel de celdas en cascada esta formado por un arreglo serie de celdas inversoras básicas, cada una de las cuales es un inversor puente H alimentado con un condensador cargado a la tensión nominal de trabajo de la celda, V_{dc} , mediante una alimentación independiente flotante

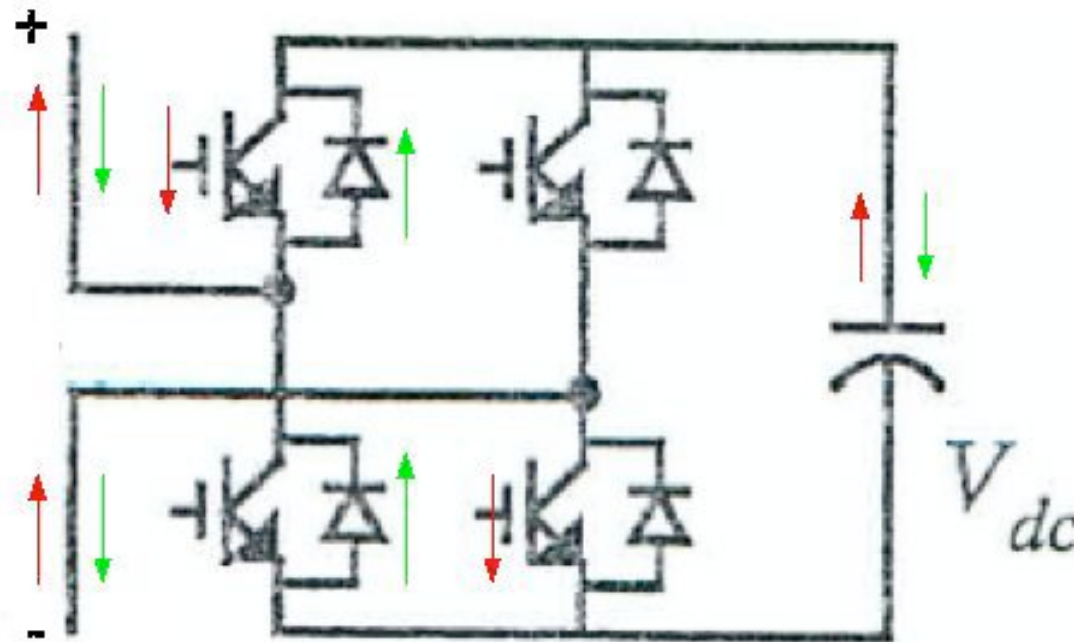
Cada celda inversora básica es capaz de producir una onda de tres niveles: V_{dc} , 0, $-V_{dc}$.



Celda inversora básica (puente H) de un inversor multinivel de celdas en cascada. La figura no muestra la alimentación independiente flotante que carga el condensador del puente a V_{dc} .

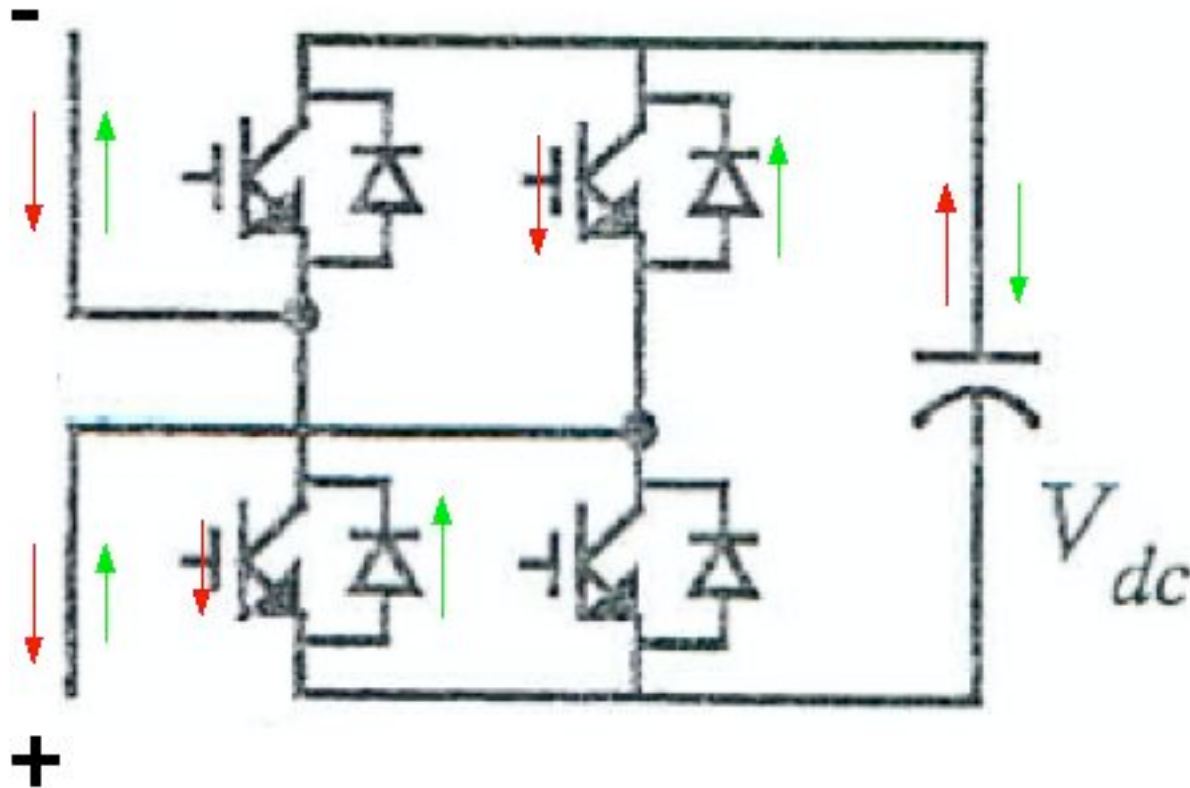
Operación del inversor multinivel de celdas en cascada.

1.- Para producir V_{dc} , S_1 y S_2 encendidos



Flechas rojas: Dispositivos por los que circula la corriente saliente.
Flechas verdes: Dispositivos por los que circula la corriente entrante.

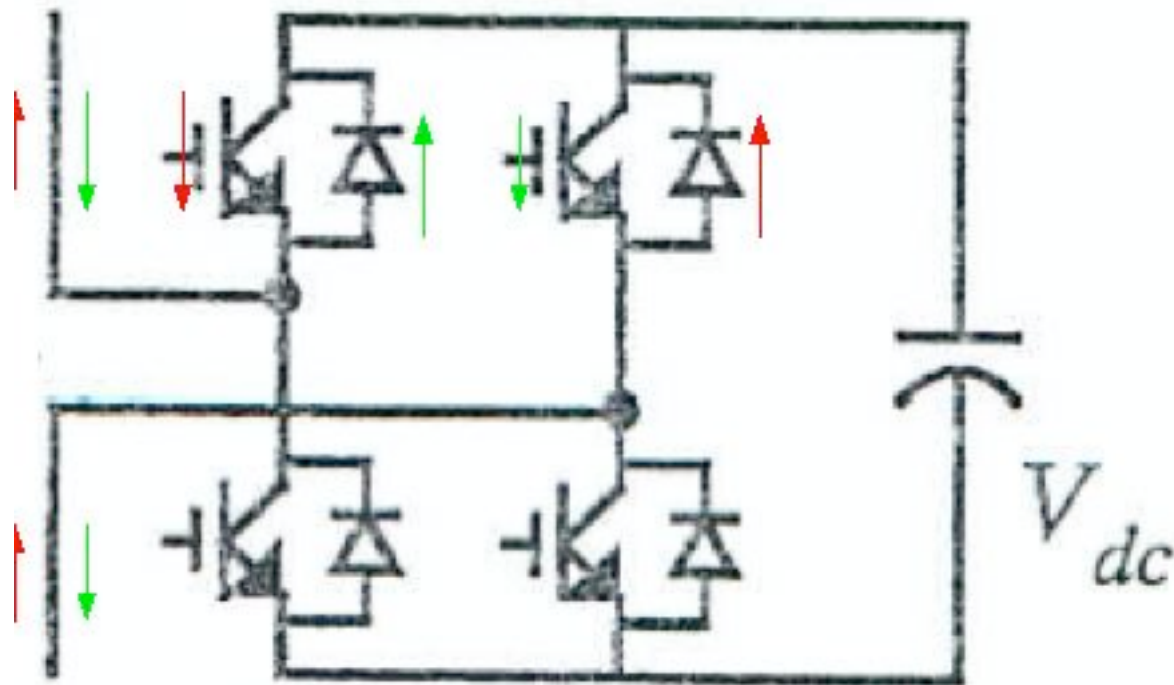
2.- Para producir $-V_{dc}$, S_3 y S_4 encendidos



Flechas rojas: Dispositivos por los que circula la corriente saliente.
Flechas verdes: Dispositivos por los que circula la corriente entrante.

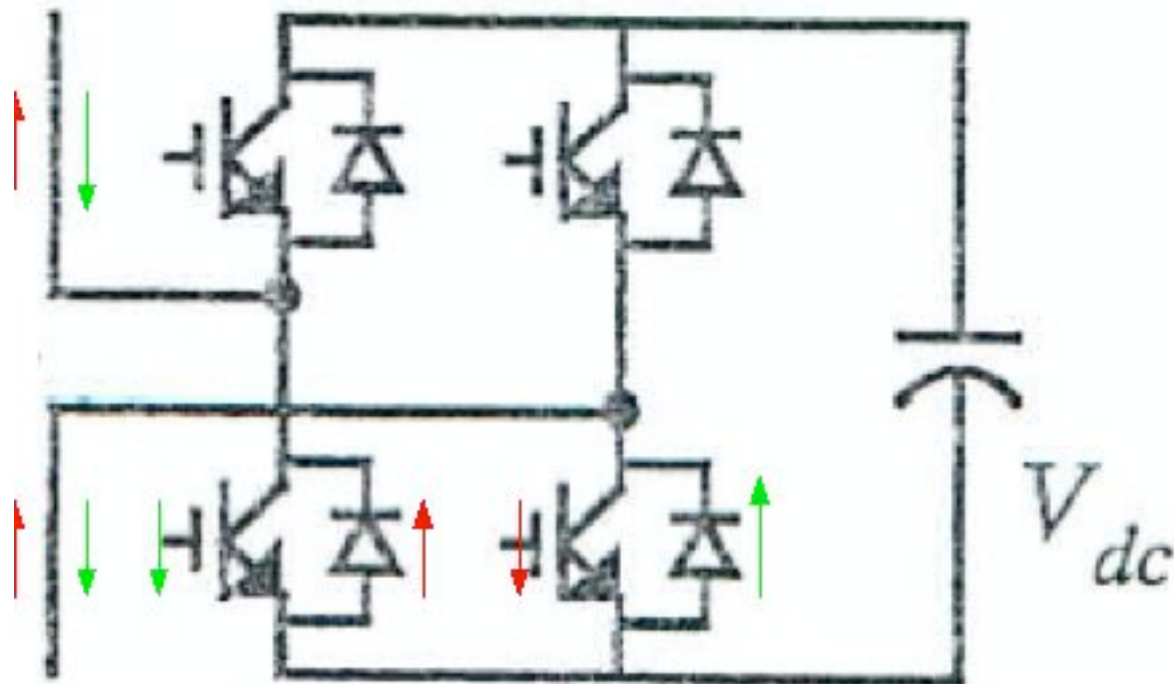
3.- Para producir 0 hay dos combinaciones:

A.- S_1 y S_3 encendidos



Flechas rojas: Dispositivos por los que circula la corriente saliente.
Flechas verdes: Dispositivos por los que circula la corriente entrante.

B.- S_2 y S_4 encendidos



Flechas rojas: Dispositivos por los que circula la corriente saliente.
Flechas verdes: Dispositivos por los que circula la corriente entrante.

El conversor multinivel se construye conectando en serie el número de celdas básicas requerido para alcanzar el número de niveles deseado.

El número de niveles de voltaje de salida, N_n , en función del número de celdas básicas conectadas, N_{ce} , es:

$$N_n = 2N_{ce} + 1$$

Dado el número de niveles requerido, N_n , el número de condensadores requerido, N_{co} , es:

$$N_{co} = \frac{N_n - 1}{2}$$

El número de condensadores es también el número de fuentes independientes necesario para mantener cargados los condensadores.

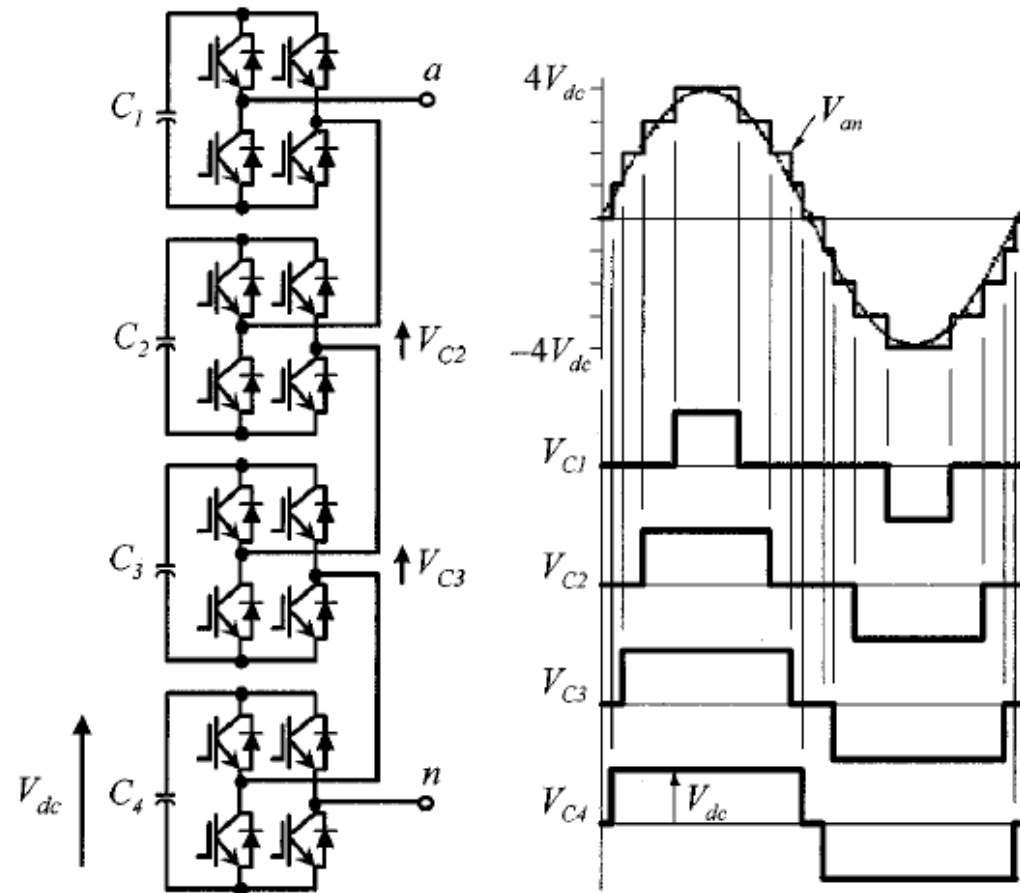
Y el número de "conmutadores" (dispositivo completamente controlado con diodo antiparalelo), N_s , es:

$$N_s = 4 \left(\frac{N_n - 1}{2} \right) = 4N_{co}$$

La forma de onda básica se construye seleccionando una combinación de estados de todos los módulos cuya suma produzca el nivel de tensión de salida requerido en cada momento. En cada intervalo de conmutación el valor de la tensión instantánea de la forma de onda de salida, $V_s(t)$, es:

$$V_s(t) = \sum_{i=1}^{N_{ce}} V_{oi}(t)$$

donde $V_{oi}(t)$ es la tensión de salida entregada por el i -ésimo módulo del convertidor en el intervalo de conmutación correspondiente, valor que el controlador selecciona de entre los tres posibles: V_{dc} , 0 , $-V_{dc}$.



Inversor de celdas en cascada (Cascade Multicell Inverters) de 9 niveles. Izquierda: Configuración del inversor. Derecha: Principio de construcción de la forma de onda de salida.

Salvo cuando el nivel de salida requerido es 0, el máximo positivo o el máximo negativo, cada nivel de salida puede ser producido por mas de una combinación de estados de los módulos.

En cualquier caso, todos los módulos deben estar activos en todo momento, ya que una celda no activada bloquea la operación del conversor al interrumpir el camino de la corriente.

Cuando la corriente atraviesa el condensador de la celda cambia su estado de carga, aumentándola si entra por el terminal positivo, o reduciéndola, si entra por el terminal negativo.

Dado que en un ciclo completo de la forma de onda de salida es preciso que el flujo de carga neto en los condensadores sea cero, el controlador debe encargarse de equilibrar los procesos de carga y descarga en cada uno de los condensadores a lo largo de cada ciclo de salida, haciendo uso adecuado de las diferentes combinaciones que permiten obtener los distintos estados.

Además de alternar la secuencia de activación de las celdas para lograr que los tiempos activos de cada celda se promedien a lo largo de un número de ciclos de la forma de onda de salida, el algoritmo de equilibrio de cargas debe tener en cuenta que, si se considera una pareja (i,k) cualquiera de celdas, la tensión de salida combinada de las dos celdas, $V_{oi,k}$, puede ser cero con tres combinaciones de la tensión de salida de las celdas:

$$V_{oi,k} = V_{oi} + V_{ok} = 0 + 0 = 0$$

$$V_{oi,k} = V_{oi} + V_{ok} = V_{dc} - V_{dc} = 0$$

$$V_{oi,k} = V_{oi} + V_{ok} = -V_{dc} + V_{dc} = 0$$

Esta propiedad se puede aplicar en cualquier intervalo de conmutación al número de parejas de celdas que resulte necesario.