

Capítulo 5

Convertidores CC/CA - Onduladores o Inversores

5.1 Introducción

Los onduladores o inversores son convertidores estáticos de energía que convierten la corriente continua CC en corriente alterna CA, con la posibilidad de alimentar una carga en alterna, regulando la tensión, la frecuencia o bien ambas. Más exactamente, los inversores transfieren potencia desde una fuente de continua a una carga de alterna.

Las aplicaciones típicas de los inversores de potencia pueden ser:

- Accionamientos de motores de CA de velocidad ajustable.
- Sistemas de alimentación ininterrumpida (SAI)
- Dispositivos de corriente alterna que funcionan a partir de una batería.
- Hornos de inducción., etc

5.2 Tipos de onduladores o inversores

Suelen distinguirse tres configuraciones o topologías de inversores: con transformador de toma media (“push-pull”), con batería de toma media (medio puente) y configuración en puente completo. Corresponden a las tres formas más razonables de realizar la función de inversión de tensión o corriente suministrada por la fuente de CC con los medios disponibles hoy día en electrónica de potencia. Cada una de ellas tiene sus ventajas e inconvenientes, independientemente de los semiconductores empleados en su realización y de su circuitería auxiliar de excitación y bloqueo. Las figuras 5.1 y 5.2 muestran las configuraciones push-pull y medio puente, respectivamente. Junto a cada una de las configuraciones se muestra la forma

de onda de salida correspondiente a cada una de ellas. En el caso de la configuración push-pull se debe tener en cuenta la relación de espiras entre cada uno de los primarios (teniendo en cuenta que está en toma media) y el secundario. La topología en medio puente se puede implementar con una batería y dos condensadores en toma media o bien con una batería en toma media. La figura 5.3 muestra la configuración en puente completo cuyo funcionamiento se explicará detalladamente. Del análisis del inversor en puente completo se puede intuir y deducir el funcionamiento de los dos anteriores (push-pull y medio puente).

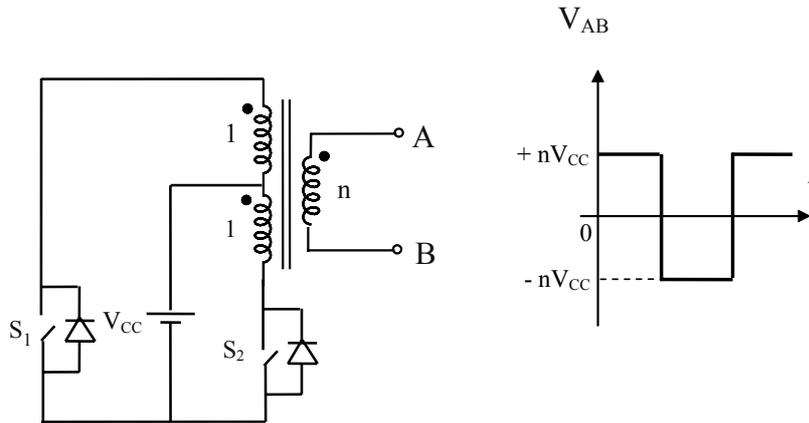


Figura 5.1. Inversor con transformador de toma media o push-pull.

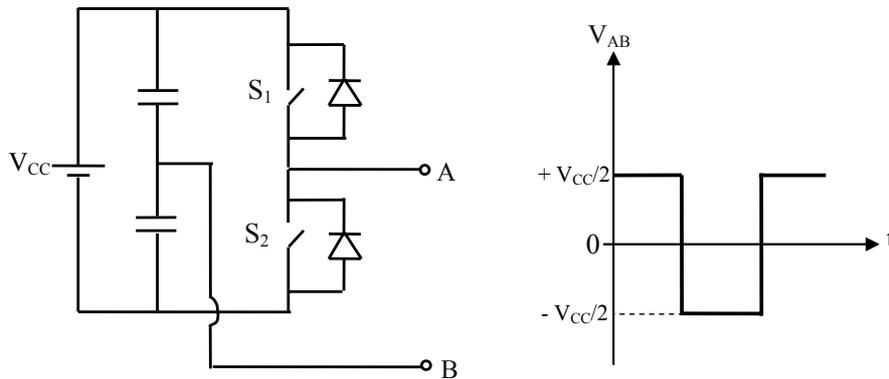


Figura 5.2. Inversor en medio puente

El inversor monofásico en puente completo

El inversor en puente completo está formado por 4 interruptores de potencia totalmente controlados, típicamente transistores MOSFETs o IGBTs, tal y como se muestra en la figura 5.3.

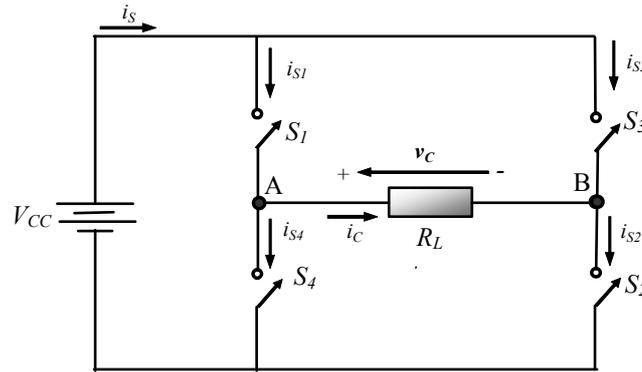


Figura 5.3. Inversor en puente completo.

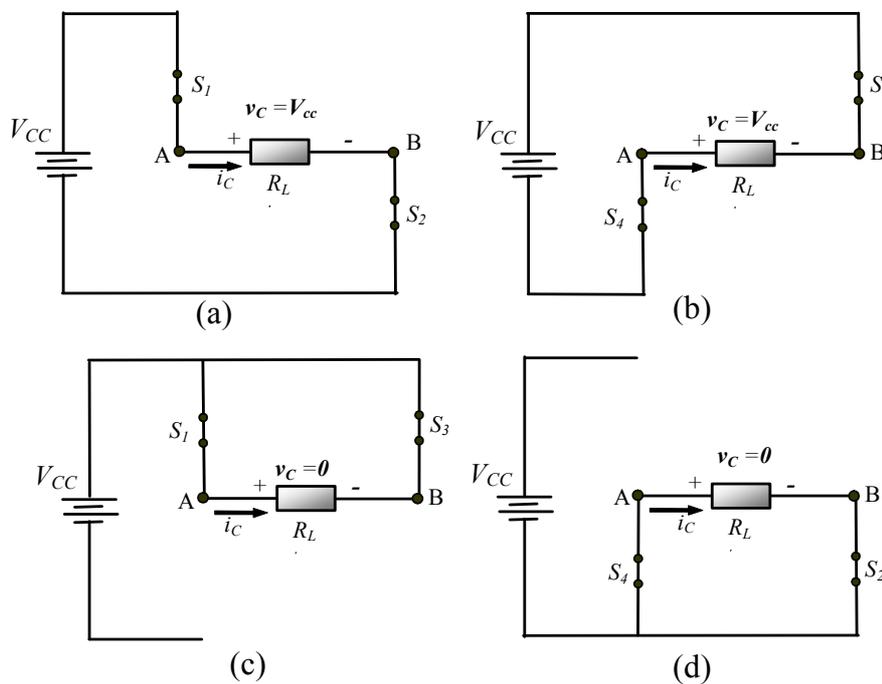


Figura 5.4. Circuitos equivalentes del inversor en puente completo: (a) S_1 y S_2 cerrados. (b) S_3 y S_4 cerrados. (c) S_1 y S_3 cerrados. (d) S_2 y S_4 cerrados.

La tensión de salida v_C puede ser $+V_{CC}$, $-V_{CC}$, ó 0 , dependiendo del estado de los interruptores. Las figuras 5.4a y 5.4d muestran los circuitos equivalentes para algunas de las posibles combinaciones de los interruptores. La tabla siguiente muestra la tensión de salida que se obtiene al cerrar determinadas parejas de interruptores.

Interruptores cerrados	Tensión de salida v_C
S_1 y S_2	$+V_{cc}$
S_3 y S_4	$-V_{cc}$
S_1 y S_3	0
S_2 y S_4	0

Observe que S_1 y S_4 no deberían estar cerrados al mismo tiempo, ni tampoco S_2 y S_3 para evitar un cortocircuito en la fuente de continua. Los interruptores reales no se abren y se cierran instantáneamente, por tanto debe tenerse en cuenta los tiempos de conmutación al diseñar el control de los interruptores. El solapamiento de los tiempos de conducción de los interruptores resultaría en un circuito denominado, en ocasiones, fallo de solapamiento en la fuente de tensión continua. El tiempo permitido para la conmutación se denomina tiempo muerto (“blanking time”). Para obtener una tensión de salida v_C igual a cero se pueden cerrar al mismo tiempo los interruptores S_1 y S_3 o bien S_2 y S_4 . Otra forma de obtener una tensión cero a la salida sería eliminando las señales de control en los interruptores, es decir, manteniendo abiertos todos los interruptores.

El inversor con modulación por onda cuadrada

La técnica de modulación o el esquema de conmutación más sencillo del inversor en puente completo es el que genera una tensión de salida en forma de onda cuadrada. En éste caso los interruptores conectan la carga a $+V_{CC}$ cuando S_1 y S_2 están cerrados (estando S_3 y S_4 abiertos) y a $-V_{CC}$ cuando S_3 y S_4 están cerrados (estando S_1 y S_2 abiertos). La conmutación periódica de la tensión de la carga entre $+V_{CC}$ y $-V_{CC}$ genera en la carga una tensión con forma de onda cuadrada. Aunque esta salida alterna no es senoidal pura, puede ser una onda de alterna adecuada para algunas aplicaciones.

La forma de onda de la corriente en la carga depende de los componentes de la carga. En una carga resistiva, la forma de onda de la corriente se corresponde con la forma de la tensión de salida. Una carga inductiva tendrá una corriente más senoidal que la tensión, a causa de las propiedades de filtrado de las inductancias. Una carga inductiva requiere ciertas consideraciones a la hora de diseñar los interruptores del inversor, ya que las corrientes de los interruptores deben ser bidireccionales. Para ello, se suelen poner diodos en antiparalelo con cada uno de los interruptores. En el caso del ondulator en puente se utilizarían cuatro diodos en antiparalelo con cada uno de los interruptores. Para el caso del medio puente y del push-pull se utilizarían 2 diodos, uno para cada interruptor.

La figura 5.5 muestra la forma de onda de la tensión de salida v_C para un inversor en puente de onda completa con modulación por onda cuadrada. Éste tipo de modulación no permite el control de la amplitud ni del valor eficaz de la tensión de salida, la cual podría variarse solamente si la tensión de entrada V_{CC} fuese ajustable. El espectro de Fourier de una onda cuadrada es conocido y se muestra en la figura 5.6. Como se puede observar, presenta todos los armónicos impares, con una disminución de amplitud proporcional a la frecuencia de los mismos.

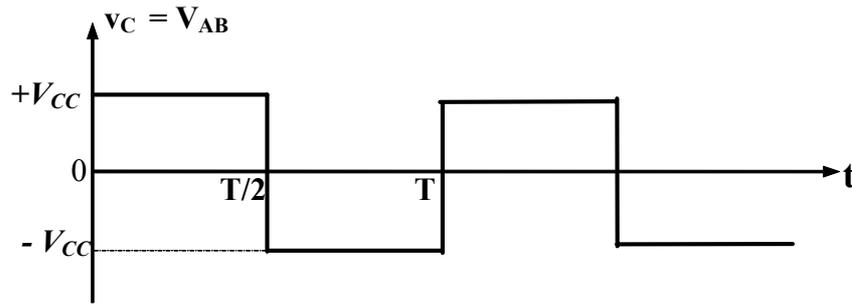


Figura 5.5. Formas de onda de tensión en la carga R_L del inversor en puente controlado por onda cuadrada.

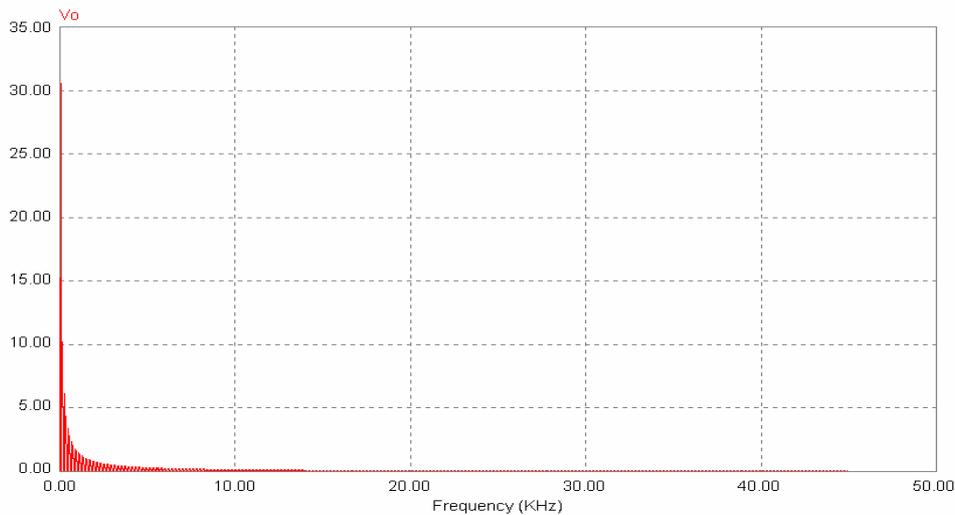


Figura 5.6. Espectro de Fourier de la tensión de salida de un inversor por onda cuadrada.

El inversor con modulación por onda cuasi-cuadrada

En la figura 5.5 se puede observar que aunque a la salida se ha obtenido una tensión alterna, ésta no se parece en absoluto a una senoide pura. De hecho, recordará el lector que una onda cuadrada periódica pura tiene infinitos armónicos sobre la frecuencia fundamental.

Para solucionar estos inconvenientes existen varias alternativas. La primera es añadir un filtro tipo LC a la salida, lo cual es costoso dado el elevado número de armónicos de baja frecuencia que se deben filtrar. La segunda alternativa es mejorar el control de los interruptores de potencia.

Una alternativa que permite ajustar el valor eficaz de la tensión de salida y eliminar los armónicos de baja frecuencia es la llamada onda cuasi-cuadrada o cancelación de tensión, en la cual se mantiene un nivel de tensión nulo sobre la carga durante parte del período. De esta manera, mejoramos el contenido de armónicos de la tensión de salida. La tensión que se obtiene utilizando la modulación por onda cuasi-cuadrada se puede apreciar en la figura 5.7.

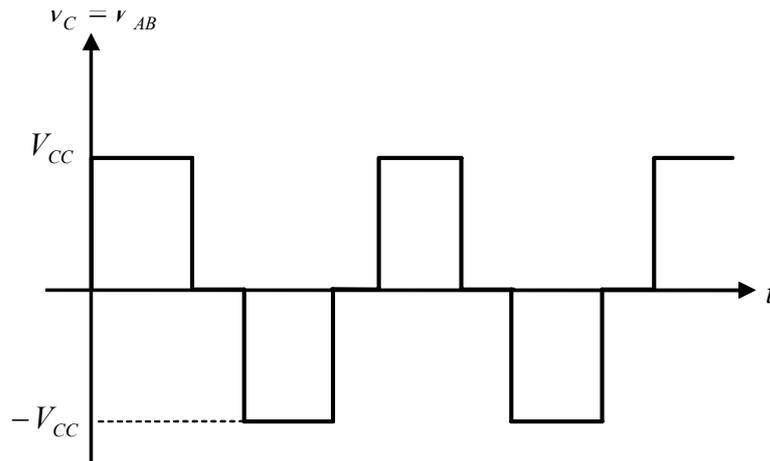


Figura 5.7. Formas de onda de tensión en la carga R_L del inversor en puente completo controlado por cancelación de tensión (modulación por onda casi-cuadrada).

Para obtener éste tipo de onda, una posibilidad sería la siguiente: cuando se desea tensión positiva en la carga se mantienen S_1 y S_2 conduciendo (S_3 y S_4 abiertos). La tensión negativa se obtiene de forma complementaria (S_3 y S_4 cerrados y S_1 y S_2 abiertos). Y, como ya se ha comentado, los intervalos de tensión nula se obtienen cerrando simultáneamente los interruptores S_1 y S_3 manteniendo S_2 y S_4 abiertos o bien cerrando S_2 y S_4 mientras S_1 y S_3 se mantienen abiertos. Otra forma de obtener tensión nula a la salida es manteniendo todos los interruptores abiertos durante el intervalo de tiempo deseado.

Si se efectúa un análisis de Fourier de la forma de onda cuasi-cuadrada, se observaría que están presentes los múltiplos impares de la frecuencia de conmutación, lo que significa que el filtraje de dicha señal para la obtención apenas de la fundamental requiere un filtro con frecuencia de corte muy próxima de la propia frecuencia deseada. Éste espectro varía de acuerdo con el ancho del pulso.

Control por modulación de anchura de pulsos PWM

Si se quiere mejorar aún más el contenido de armónicos en la salida de un inversor, es necesario utilizar lo que se conoce como modulación de anchura de pulsos PWM ("Pulse Width Modulation"). La idea básica es comparar una tensión de referencia senoidal de baja frecuencia (que sea imagen de la tensión de salida buscada) con una señal triangular simétrica de alta frecuencia cuya frecuencia determine la frecuencia de conmutación. La frecuencia de la onda triangular (llamada portadora) debe ser, como mínimo 20 veces superior a la máxima frecuencia de la onda de referencia, para que se obtenga una reproducción aceptable de la forma de onda sobre una carga, después de efectuado el filtraje. La señal resultante de dicha comparación nos generará la lógica para abrir y cerrar los semiconductores de potencia. La figura 5.7 muestra la modulación de una onda senoidal, produciendo en la salida una tensión con 2 niveles, cuya frecuencia es la de la onda triangular. Para una observación más detallada, la figura 5.8 muestra la señal PWM en un cuarto de la senoide completa.

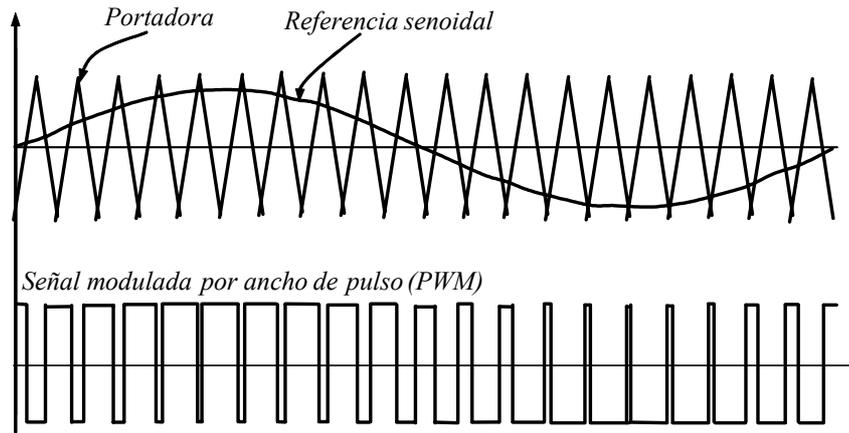


Figura 5.7. Generación de una señal PWM.

A partir de la señal PWM se generan los pulsos de apertura y cierre de los interruptores. Por ejemplo, si la señal PWM tiene un valor alto, se cierran los interruptores S_1 y S_2 . En caso contrario se cierran los interruptores S_3 y S_4 . Por tanto, la tensión de salida, que es aplicada a la carga, está formada por una sucesión de ondas rectangulares de amplitud igual a la tensión de alimentación en continua y duración variable. El contenido de armónicos de la tensión de salida se desplaza hacia las frecuencias elevadas y es más fácil de filtrar.

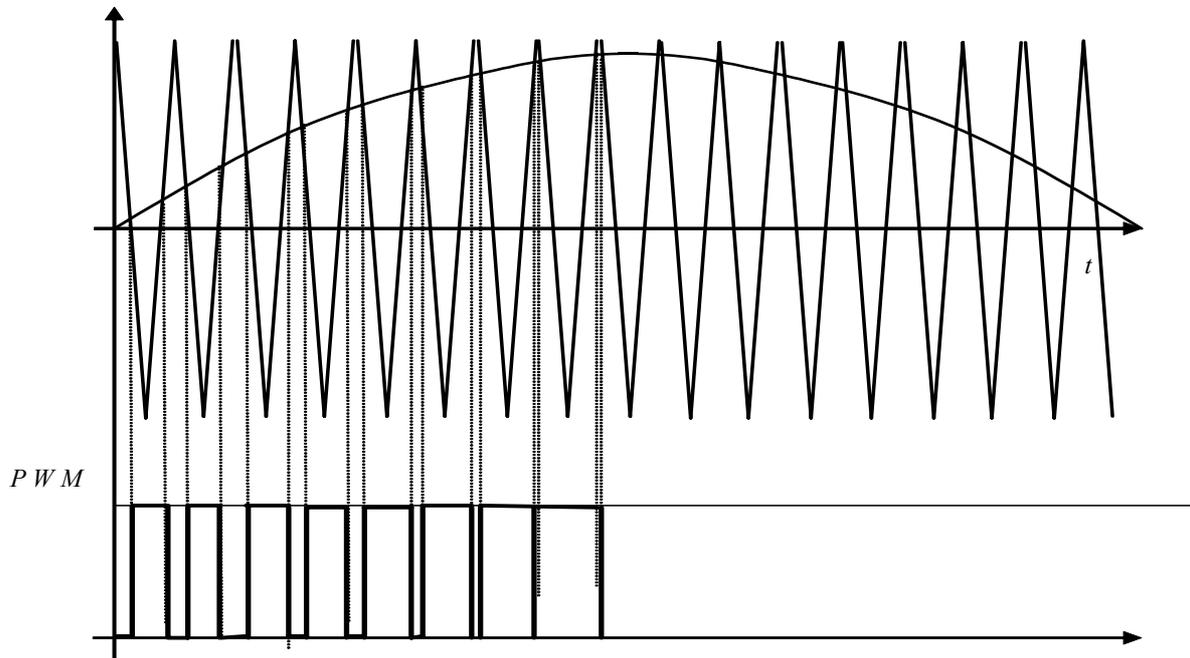


Figura 5.8. Generación de una señal PWM en un cuarto de senoide completa.

Matemáticamente se puede demostrar que el contenido de armónicos de la señal PWM generada es muy bajo en comparación con la onda cuadrada y cuasi-cuadrada. La figura 5.9 muestra el espectro de Fourier de la tensión de salida del inversor monofásico PWM a 10kHz.

Por tanto, un filtro pasa bajos con frecuencia de corte por encima de la frecuencia de referencia es perfectamente capaz de producir una atenuación bastante efectiva en componentes en la banda de los kHz.

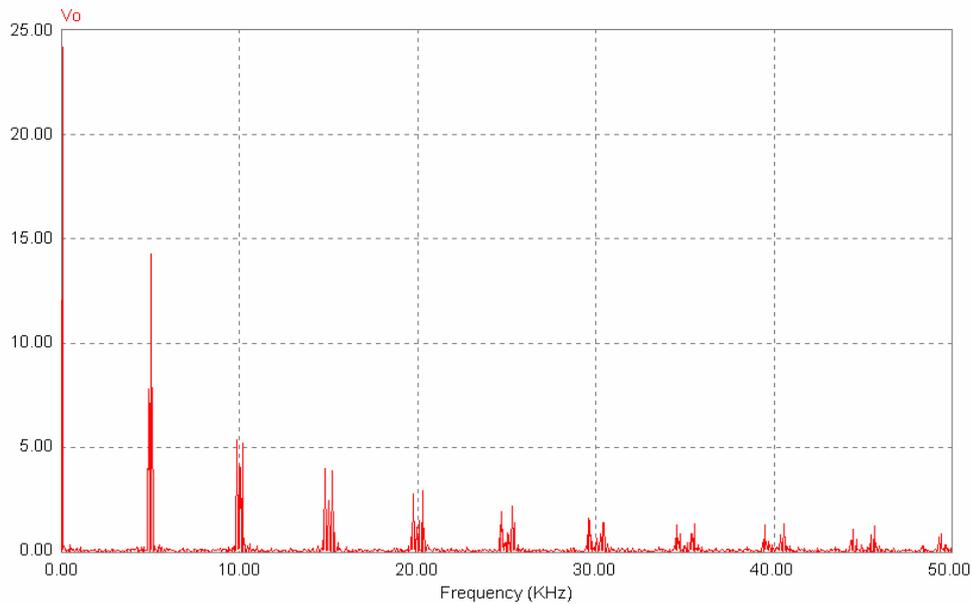


Figura 5.9. Espectro de Fourier de la tensión de salida del inversor monofásico PWM a 10kHz.

Como ya se ha comentado, en el caso de que la carga tenga una cierta componente inductiva, es necesario añadir diodos en antiparalelo con los transistores de potencia, para permitir la circulación de corriente de la carga cuando se abren todos los transistores. Si no se añaden diodos, se crean grandes sobretensiones debido al corte instantáneo de la corriente por la inductancia de la carga, con lo que acaba destruyéndose el convertidor de potencia.

5.3 Sistemas de alimentación ininterrumpida (SAI).

Para alimentar cargas críticas, como son ordenadores que controlan procesos importantes, equipos médicos, etc., es necesario el empleo de sistemas de alimentación ininterrumpida, abreviados por las siglas SAIs (del inglés UPS, “Uninterruptible Power Supply”). Este tipo de sistemas proporciona protecciones frente a cortes de alimentación, así como regulación de tensión frente a fluctuaciones (por encima o por debajo) de los valores nominales. Además, se emplean como supresores de transitorios y de armónicos en la línea de alimentación.

La figura 5.10 muestra un diagrama de bloques de un SAI. En modo normal de operación, la potencia suministrada a la carga proviene de la red de CA de la empresa suministradora. En caso de producirse una fluctuación en la línea (corte, sobretensión, etc.), la potencia es suministrada por el banco de baterías. Un SAI debe incluir un cargador de baterías, para mantener la batería cargada en cualquier momento.

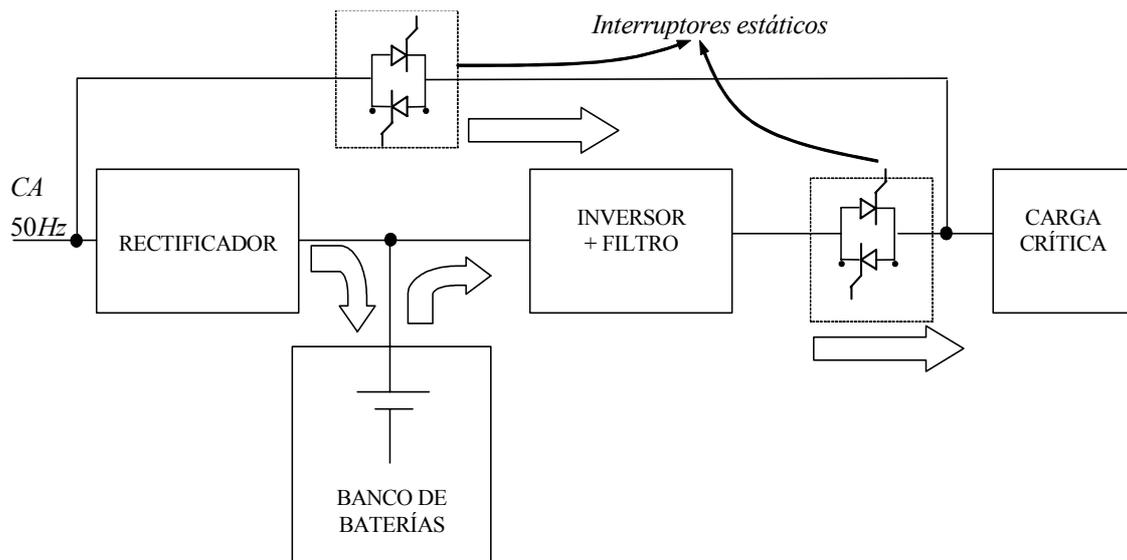


Figura 5.10. Diagrama de bloques de un sistema de alimentación ininterrumpida (SAI)

Los interruptores estáticos, también denominados interruptores de “by-pass”, permiten alimentar la carga a través del inversor en menos de $\frac{1}{4}$ ciclo cuando ocurre un fallo en la red eléctrica,. Otra función de los interruptores estáticos es la de aislar el inversor cuando se desea efectuar su mantenimiento. Básicamente existen dos posibilidades de implementar los interruptores estáticos: utilizando tiristores o relés electromecánicos. Soluciones de bajo coste emplean, en general, relés. Su conmutación debe ser rápida, de modo que no interrumpan la alimentación durante más de $\frac{1}{2}$ ciclo. Cuando la potencia aumenta, el uso de tiristores es lo más habitual.

5.4 Control de motores.

Uno de los grandes campos de aplicación de la Electrónica de Potencia se encuentra en la regulación de velocidad de máquinas eléctricas, típicamente motores. Usualmente, al sistema electrónico que alimenta un motor se suele denominar accionamiento, y éste incluye no sólo la parte de potencia sino también los circuitos de protección y control que gobiernan los convertidores de potencia.

En función del tipo de motor, se suelen clasificar en accionamientos de alterna y accionamiento de continua. Dependiendo de la aplicación, se puede controlar la velocidad, la posición, o el par de un motor eléctrico. Desde el punto de vista energético, el empleo de accionamientos para motores mejora substancialmente el rendimiento del sistema que se está controlando. Existen infinidad de aplicaciones en las que actualmente se emplean accionamientos, desde sistemas de aire acondicionado, bombas, grúas, etc. hasta máquinas de control numérico, donde se requiere un control preciso de la velocidad y posición de los motores utilizados.

Accionamiento de corriente alterna

De forma análoga a los accionamientos de corriente continua, los accionamientos de corriente alterna, permiten regular distintas magnitudes en un motor de CA, ya sea velocidad, posición, par, etc. Dependiendo de la aplicación, se utilizan distintos convertidores de potencia. En aquellas en las que la precisión no es crítica, se utilizan convertidores CA/CA, del tipo directo, normalmente basados en tiristores (reguladores de CA y cicloconvertidores). A pesar de su sencillez, estos convertidores generan un gran número de armónicos.

Para aplicaciones donde se requiere mayor precisión o mejor calidad de energía, se utilizan convertidores del tipo indirecto. La estructura más empleada es la de un rectificador en cascada con un inversor PWM tal como se muestra en la figura 5.11. Hoy en día, el empleo de este tipo de convertidores está desbancando el empleo masivo que en el pasado se hacía con los motores de CC.

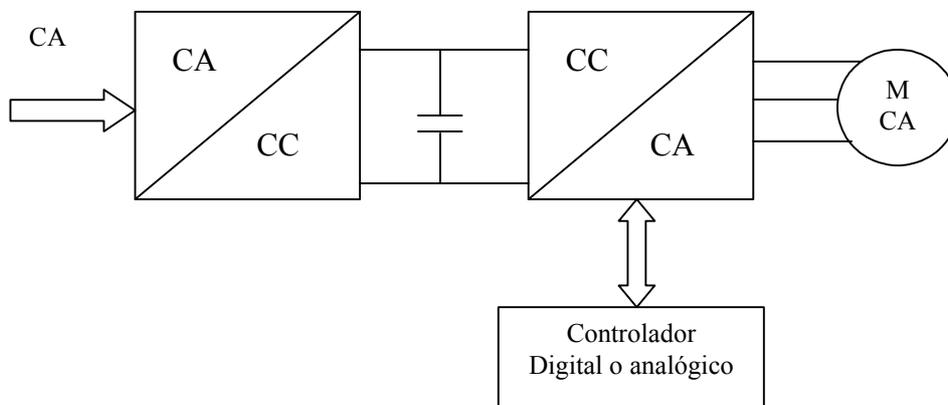


Figura 5.11. Esquema de un sistema de control electrónico de un motor de CA.

5.5 Bibliografía

- Power Electronics. Converters, Applications, and Design (2ª edición). N. Mohan, T. M. Undeland, W. P. Robbins, Editorial: John Wiley & Sons, 1995.
- Electrónica Industrial: Técnicas de Potencia (2ª edición). Editorial: Marcombo-Boixareu Editores, 1992
- Electrónica de Potencia - Circuitos, Dispositivos y Aplicaciones. Muhammad H. Rashid, Prentice Hall Hispanoamericana, S.A., 1993.
- Análise e Projeto de Fontes Chaveadas, Luiz Fernando Pereira de Mello, Editora Érica Ltda, 1996.