

# CONVERTIDORES MULTINIVEL: SU MODULACIÓN Y CONTROL EN APLICACIONES DE GENERACIÓN DE ENERGÍAS RENOVABLES

*María Inés Valla, Santiago A. Verne y Sergio A. González*

Instituto de Investigaciones en Electrónica, Control y Procesamiento de Señales (LEICI)  
Depto. Electrotecnia, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de La Plata, Consejo Nacional de  
Investigaciones Científicas y Técnicas  
48 y 116, 1900 La Plata, Argentina  
(E-mail: mvalla@ing.unlp.edu.ar)

## Resumen

En las últimas décadas los convertidores multinivel se han desarrollado enormemente, fundamentalmente impulsados por los nuevos paradigmas en la generación, transmisión y distribución de energía eléctrica. Hoy se presentan como una solución en múltiples aplicaciones tales como energías renovables, mejora de la calidad de energía, accionamientos eléctricos y otras aplicaciones industriales. En este trabajo hacemos una revisión de las principales topologías y sus métodos de modulación y control, principalmente enfocados a la interfaz de fuentes de energía alternativa con el sistema eléctrico.

*Palabras claves:* Electrónica de potencia, convertidores electrónicos, energías renovables.

## Abstract

**Multilevel converters: its modulation and control in applications in generation of renewable energies.** The multilevel converters have been evolving along the last decades in different high-power applications. They have been greatly impulse by the new paradigms for electric power generation and distribution. Now they appear as a mature solution in various applications such as renewable energies, power quality improvements, motor drives and other industrial applications. In this paper we make a review of main topologies and their modulation and control techniques, focused on the interphase of renewable energy sources and the electrical system.

*Keywords:* Power electronics, power converters, renewable energies.

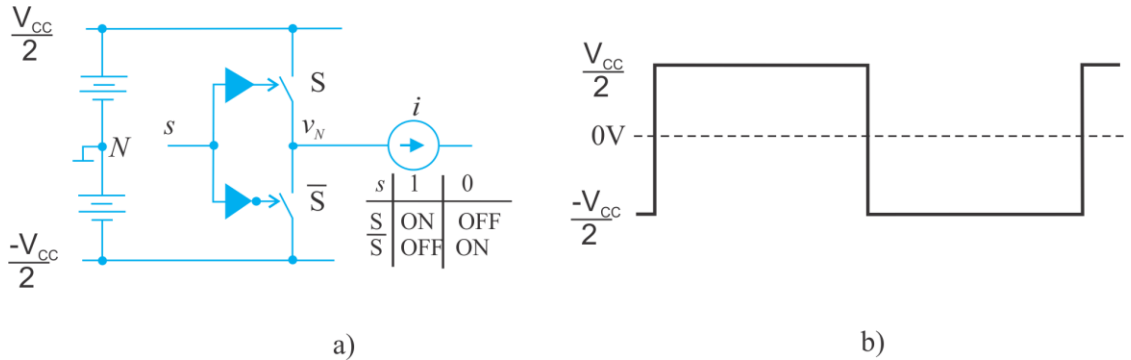
## 1. Introducción

La Energía y el medio-ambiente son dos temas que están recibiendo mucha atención en estos días. Entre fines del siglo XX e inicios del XXI se han incorporado nuevas fuentes de energías alternativas, como el viento, el sol y el mar. Se han agregado nuevos elementos de almacenamiento masivo de energía eléctrica. Se ha avanzado mucho en el desarrollo de autos eléctricos. Hoy existe una preocupación en la mejora de la eficiencia

energética de todo el sistema eléctrico desde la generación al consumo; como las líneas de transmisión en continua, los sistemas de mejora de la calidad de energía entregada, o fuentes de energía ininterrumpida en cargas críticas. En todas estas aplicaciones, el rol de los convertidores electrónicos de potencia es fundamental. Ellos son un componente básico en las nuevas “redes inteligentes” y en la generación distribuida. Son los encargados de vincular dispositivos con distintos niveles de tensión, corriente y potencia [1,2].

El componente básico en la conversión de corriente continua a corriente alterna, indispensable para vincular fuentes alternativas o elementos de almacenamiento a las redes eléctricas, es el convertidor con fuente de tensión (VSC, *Voltage source converter*). La tecnología de conversión VSC toma cada vez mayor impulso con el desarrollo de nuevos dispositivos de potencia más rápidos y capaces de manejar mayor potencia [3]. El valor de la potencia nominal que pueden manejar los convertidores electrónicos depende de los rangos de tensión y corriente de los dispositivos electrónicos disponibles. Estos rangos están en continua evolución, pero aun así, se necesitan conexiones serie y/o paralelo de convertidores para manejar toda la potencia requerida. En los últimos 50 años los ingenieros especialistas en Electrónica de Potencia se han enfocado en desarrollar nuevas topologías tendientes a superar los límites de los convertidores aun trabajando con los mismos dispositivos. Esto se logra conectando inteligentemente un número mayor de dispositivos activos y pasivos, dando lugar a los llamados convertidores multinivel [4-6]. Estos convertidores permiten reducir el filtro de salida necesario, mejorar las formas de onda y mejorar su capacidad de tolerar fallas. Como contrapartida requieren de un control más complejo que involucra además de las variables externas deseadas, el balance de tensión en los distintos dispositivos que los constituyen. En los últimos años se han desarrollado diferentes topologías de convertidores multinivel. Cada una de ellas puede ser la óptima según el tipo de aplicación que se utilice. Entre las topologías más utilizadas podemos mencionar:

- Convertidor multinivel con enclavamiento por diodos (DCMC *Diode Clamped Multilevel Converter*), fue introducido a inicios de los 80s en su versión de tres niveles (NPC *Neutral Point Clamped*) [7]. Este es probablemente el primer convertidor multinivel comercializado mundialmente y empleado en un gran número de aplicaciones.
- Convertidor con capacitores flotantes (FCMC *Flying Capacitor Multilevel Converter*) es utilizado en sistemas de tracción eléctrica [8].
- Convertidor con puentes H en cascada (CMC *Cascaded Multilevel Converter*) [10]. Es un candidato ideal para el acondicionamiento de redes eléctricas con filtros activos o compensadores estáticos (STATCOM)
- El convertidor en cascada asimétrico (CAMC *Cascaded Asymmetric Multilevel Converter*) es una combinación en cascada de una estructura de semi puente con una celda FCMC [9],
- Convertidor modular (MMC *Modular Multilevel Converter*) Es muy usado en las líneas de transmisión de continua que conectan granjas eólicas Off-shore, o contribuyen a crear la gran línea de interconexión europea [11-13].



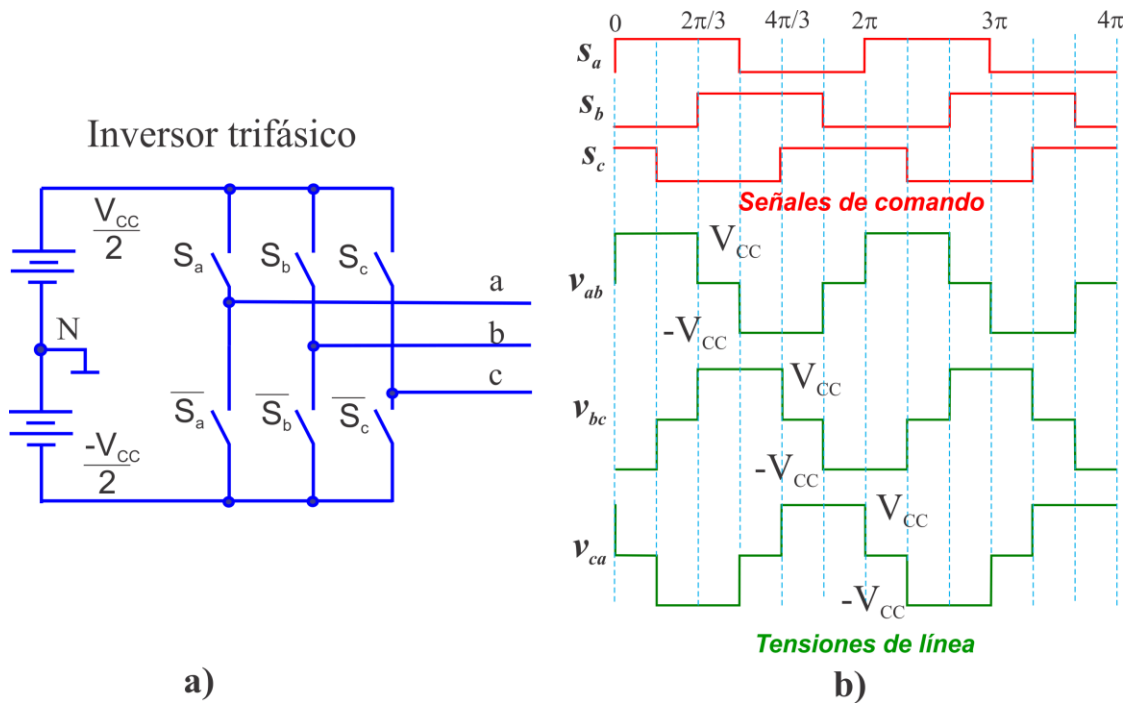
**Fig.1.** a) Unidad de conversión o inversora, b) Tensión alternada de salida

Todas estas topologías son más complejas que el convertidor básico de dos niveles, en lo que respecta a cantidad de elementos activos y pasivos como a potenciales desbalances de tensiones interiores del convertidor. Cada una de estas topologías requiere el desarrollo de estrategias de modulación y control particulares que se analizarán en las próximas secciones. Finalmente se muestran aplicaciones de algunos de estos convertidores.

## 2. Topologías Inversores de tensión continua a alterna

Los convertidores con fuente de tensión continua (VSC) son capaces de sintetizar una tensión alterna a partir de una tensión continua. La combinación adecuada de cierres y aperturas de llaves semiconductoras da origen a diferentes calidades de la forma de onda. La Fig.1 muestra el inversor básico que permite convertir la tensión continua provista por las baterías a una forma de tensión alternada obtenida entre el punto de salida ( $v_N$ ) y el punto de referencia  $N$ . El inversor está formado por dos llaves semiconductoras operando de forma complementaria, cuando una está cerrada o encendida la otra está abierta o apagada. Siguiendo una secuencia de conmutación binaria en la señal de comando ' $s$ ' indicada en la Fig.1 a), se obtiene una tensión que cambia en el tiempo, alternando su amplitud entre  $V_{CC}/2$  y  $-V_{CC}/2$ . En ningún momento ambas llaves pueden estar cerradas simultáneamente, evitando así un corto circuito sobre las baterías.

Se puede obtener un inversor trifásico empleando tres columnas idénticas comandadas por una terna trifásica. La Fig.2 muestra la topología de un VSC trifásico y las tensiones de líneas resultantes. Cada columna genera una tensión alterna en función de las señales de comando  $s_a$ ,  $s_b$  y  $s_c$ . La combinación de dichas señales desfasadas  $120^\circ$  una respecto de la otra, generan un conjunto de tres tensiones balanceadas y equilibradas entre los centros de columna, correspondiendo a las tensiones de línea del inversor. El contenido armónico de estas ondas es alto, apartándolas de una senoide ideal.

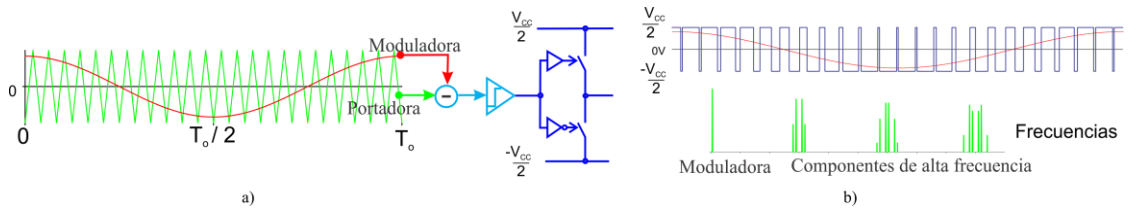


**Fig.2.** a) Inversor trifásico; b) Señales de comando y tensiones de línea

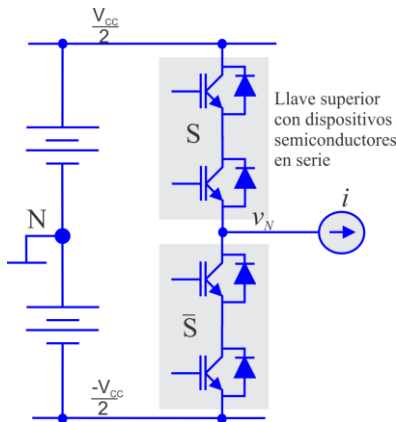
Existen diversas técnicas para conmutar las llaves que mejoran la calidad de la tensión alterna de salida. Las técnicas más utilizadas son las de modulación por ancho de pulso (PWM *pulse width modulation*), que emplean una frecuencia de conmutación alta [14-15]. La modulación PWM tiene como objetivo generar una tensión con el menor contenido armónico en los múltiplos de una forma de onda de referencia o moduladora; a expensas de introducir armónicos de alta frecuencia. Estos armónicos son filtrados con simples filtros pasivos que mejoran sustancialmente la calidad de la tensión generada. La Fig.3 a) muestra la acción de comando sobre la columna, que resulta de la comparación entre una portadora de alta frecuencia con una moduladora sinusoidal de menor frecuencia. El resultado sobre la tensión alterna es un tren de pulsos entre  $V_{CC}/2$  y  $-V_{CC}/2$  cuyo ancho queda modulado por la amplitud de la moduladora. Su contenido armónico está fuertemente dominado por las altas frecuencias resultantes en torno a la portadora y sus múltiplos como se ve en la Fig.3 b).

### Topologías multinivel

En la descripción previa del VSC los niveles de tensión resultante sobre la tensión alternada de salida ( $V_{CC}/2$  y  $-V_{CC}/2$ ) hacen necesario el empleo de llaves capaces de soportar la tensión de la barra de alimentación ( $V_{CC}$ ). La máxima amplitud de tensión alcanzada por el VSC está limitada por los rangos de tensión que pueden manejar los dispositivos semiconductores, por lo tanto la tensión  $V_{CC}$  queda limitada por la tensión de bloqueo de las llaves del convertidor.



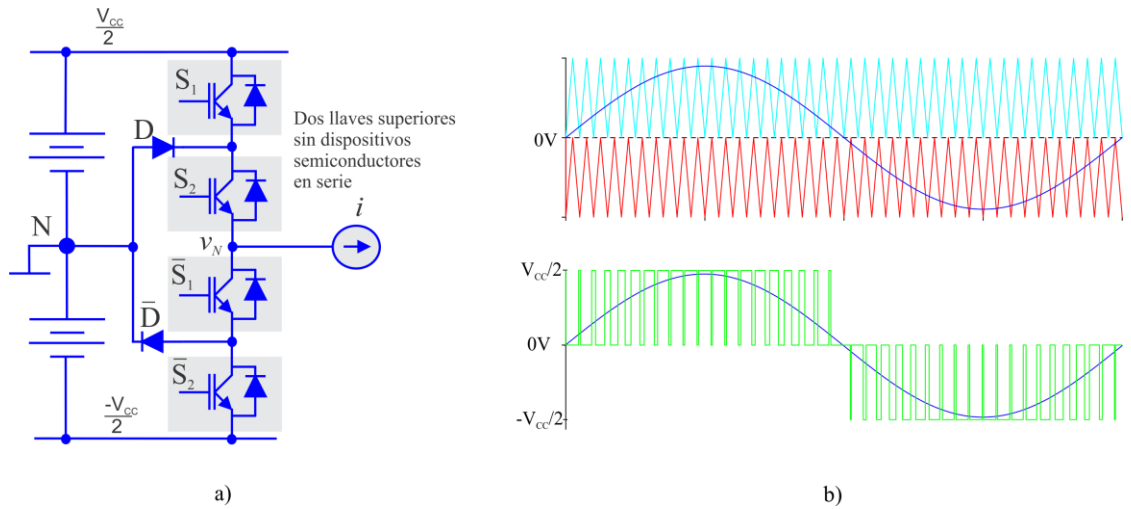
**Fig. 3.** a) Moduladora y portadora comparadas actuando en la columna, b) Tensión alterna de salida con pulsos  $V_{CC}/2$  y  $-V_{CC}/2$  de anchos modulados y su contenido armónico



**Fig.4.** Inversor de dos niveles con semi-conductores conectados en serie

En muchas de las aplicaciones relacionadas a energías alternativas y redes inteligentes, los valores de tensión exceden los límites físicos actuales de los semiconductores de potencia. Por tal motivo es necesario implementar las llaves, conectando en serie dos o más dispositivos de potencia. La Fig.4 muestra una columna de un VSC que implementa cada llave con dos transistores en serie. Cada transistor debe ser capaz de tolerar la mitad de la tensión de la barra de alimentación ( $V_{CC}/2$ ). La conexión en serie de más dispositivos semiconductores permite aumentar la tensión de salida del VSC. La necesidad de ecualizar la tensión de bloqueo sobre los transistores

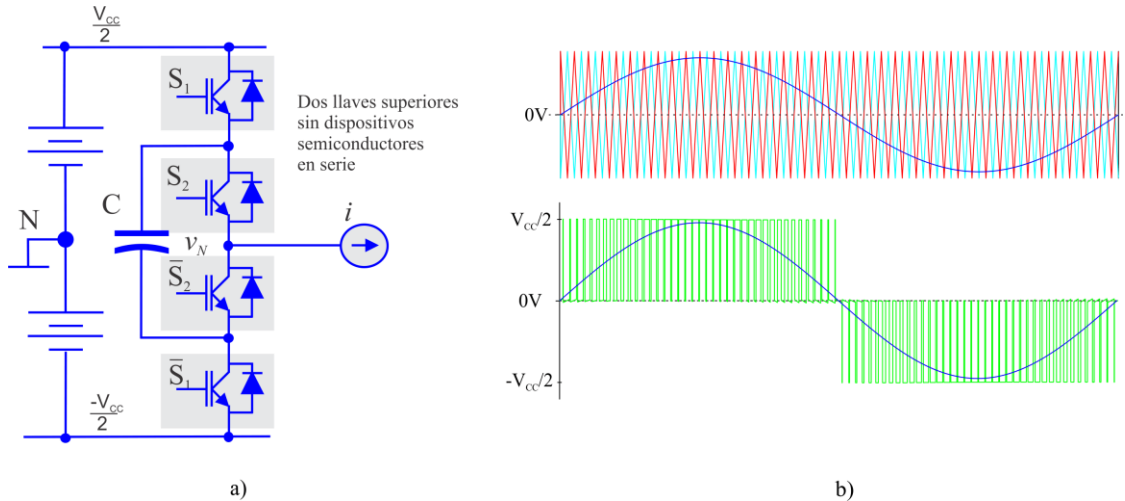
conectados en serie dio origen a diversas topologías que convergen a los denominados convertidores multinivel con fuente de tensión (VSMC *Voltage Source Multilevel Converters*) [5,6]. La primera topología propuesta ha sido el convertidor con diodos de enclavamiento al punto medio del enlace de continua (NPC) [7]. En la Fig. 5 a) se muestra una columna del NPC en la cual se indican cuatro llaves independientes conectadas al punto medio del divisor capacitivo por medio de los diodos  $D$  y  $\bar{D}$ . Cada llave ( $S_{1,2}$  y  $\bar{S}_{1,2}$ ) esta implementada por un único transistor que trabaja con una tensión de bloqueo igual a  $V_{CC}/2$  fijada o enclavada por los dispositivos  $D$  y  $\bar{D}$ . De modo similar al VSC de dos niveles, el NPC posee llaves complementarias. En este caso, las llaves superiores  $S_1$  y  $S_2$  operan de forma complementaria con las inferiores  $\bar{S}_1$  y  $\bar{S}_2$ , respectivamente. La columna queda conformada con dos pares de llaves complementarias, por lo tanto son necesarias dos señales de comando, una para cada par. El modo simple y efectivo para generar una tensión alternada sobre la salida del convertidor es mediante la modulación PWM empleando una moduladora y dos portadoras de alta frecuencia en fase, pero desplazadas en nivel (LSPWM *Level shift-PWM*). La Fig. 5 b) muestra la combinación de ambas señales y la acción resultante sobre las llaves de la columna. La comparación de cada una de estas portadoras con la moduladora produce una tensión alternada de tres niveles  $V_{CC}/2$ ,  $0V$  y  $-V_{CC}/2$ , sobre la salida del convertidor.



**Fig.5.** a) Convertidor NPCMC (3 niveles), b) LSPWM,

Otro convertidor multinivel que logra reducir la tensión de bloqueo de las llaves de la columna, respecto de la tensión de la barra de alimentación, es la topología con capacitores flotantes (FCMC) [8]. En la Fig.6 a) corresponde a la columna de un convertidor FCMC de tres niveles. Al igual que el NPC, cada transistor constituye una llave por sí misma, conformando dos pares de llaves complementarias ( $S_{1,2}$  y  $\bar{S}_{1,2}$ ). Si la tensión sobre el capacitor flotante ( $C$ ) es igual a  $V_{CC}/2$ , se consigue repartir la tensión de la barra sobre las llaves del convertidor en forma equitativa. Para conseguir una tensión alterna de salida con alta calidad y simultáneamente mantener constante la tensión sobre  $C$ , es preciso emplear modulación PWM con portadoras de igual amplitud y frecuencia, pero desplazadas en fase, denominada PSPWM (*Phase shift PWM*). En el caso de un convertidor FCMC de tres niveles se requieren comandar dos pares de llaves complementarias y por lo tanto es necesario solo dos portadoras, desfasadas  $180^\circ$ , que se comparen con una misma moduladora. La Fig. 6 b) muestra las dos portadoras y la modulante, así como la forma de la tensión resultante a la salida del convertidor.

Comparando la Fig.4 con las Figs.5 y 6 queda claro que con la topología clásica se consigue dos niveles entre los nodos  $v_N$  y  $N$  ( $V_{CC}/2$  y  $-V_{CC}/2$ ), mientras que en las topologías NPC y FCMC, la tensión entre ambos nodos resulta:  $V_{CC}/2$ ,  $0$  y  $-V_{CC}/2$ . La aparición de un nivel intermedio permite reducir la amplitud y/o desplazar los armónicos de las portadoras hacia frecuencias más altas, permitiendo implementar filtros más reducidos y poder mejorar el contenido armónico de la tensión alterna. En consecuencia la importancia de estas topologías multinivel, no sólo se centra en la posibilidad de mantener la tensión de bloqueo en forma ecuánime sobre todos los dispositivos, sino que también posibilita mejorar la calidad de la tensión sintetizada. Es posible incrementar la cantidad de niveles de las topologías NPC y FCMC a más de tres niveles; cuatro, cinco y más niveles [5], pero la complejidad circuital y la cantidad de elementos activos y pasivos necesarios crece más que proporcionalmente con el número de niveles. Entonces existe una relación de compromiso entre las mejoras obtenibles y la complejidad requerida.

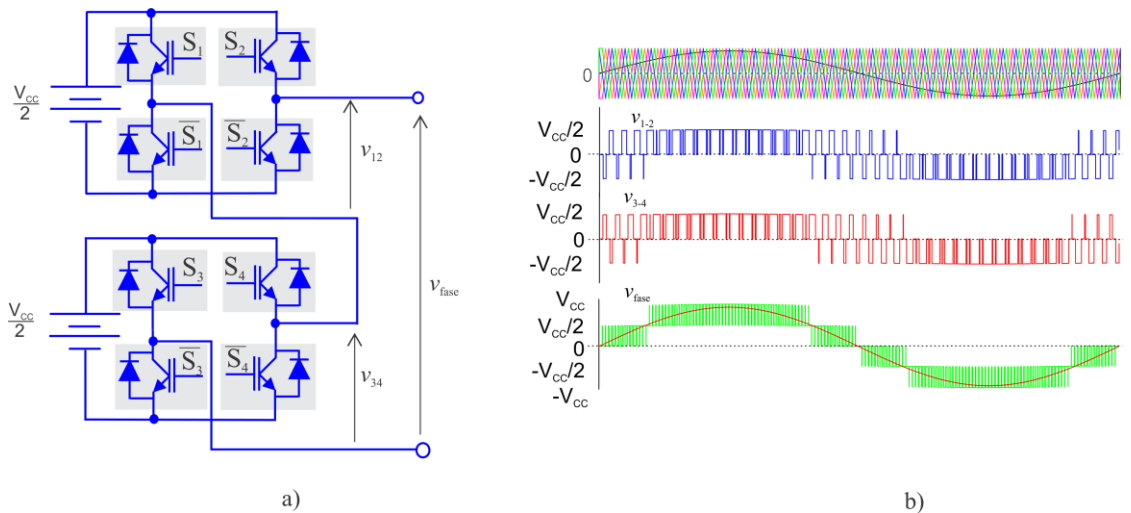


**Fig.6.** a) convertidor FCMC de 3 niveles, b) PSPWM

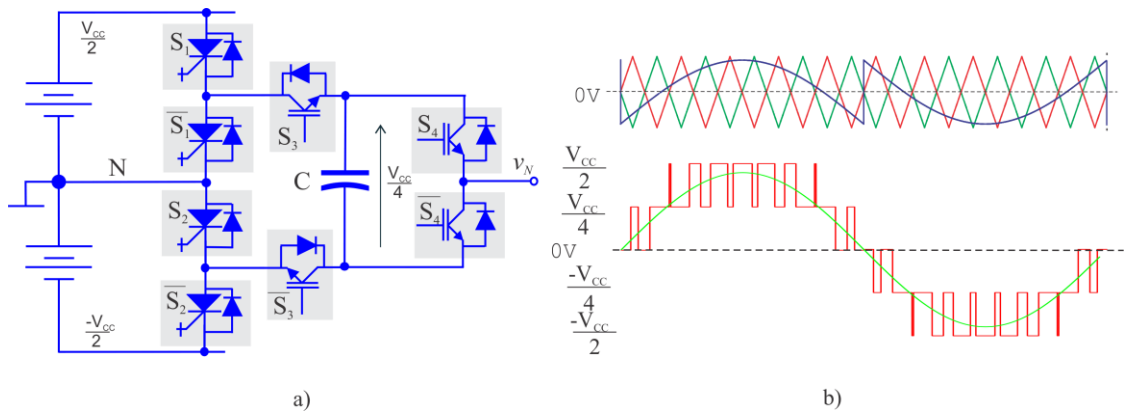
La Fig.7 a) muestra otro convertidor multinivel que es de interés en muchas aplicaciones, el denominado *Cascada de puentes 'H'* (CCMC) [10]. La versión más simple de 5 niveles, posee dos puentes H conectados en cascada de modo que la salida de uno está conectada en serie con la salida del segundo puente. Cada puente es un inversor monofásico alimentado con una fuente de tensión continua independiente. Si la tensión alternada entre los puntos medios de cada puente H contiene tres niveles de tensión, la suma de ambas tensiones tiene cinco niveles. La modulación más adecuada para este convertidor es la PSPWM, aplicando cuatro portadoras, dos por puente, con 90° de desfase entre cada portadora, como se observa en la Fig.7 b).

Las topologías DCMC y FCMC poseen una barra de alimentación común; es decir que todas las columnas de un inversor trifásico como el presentado en la Fig.2 son implementadas con columnas NPC o FCMC conectadas a la misma fuente de tensión continua. Sin embargo la topología CCMC no dispone de una barra común sino de múltiples barras, como una barra distribuida. Por otro lado y a diferencia del inversor de la Fig.2, en los convertidores CCMC la salida de la cascada es directamente la tensión de fase del sistema trifásico.

la amplitud de cada una de las fuentes de continua se elige en función de la amplitud de bloqueo de las llaves del puente H. Sin embargo, tomando diferentes valores de tensión para alimentar a cada puente, se consigue aumentar el número de niveles de la tensión de salida con igual cantidad de llaves. Para poder llevar a cabo este objetivo es necesario aplicar una modulación híbrida, dando origen a los convertidores multinivel híbridos (HMC, *Hybrid Multilevel Converter*) [16]. La mayor desventaja de estas topologías es la necesidad de fuentes independientes en cada etapa imposibilitando aplicaciones con conexión espalda contra espalda (*back to back*).



**Fig.7.** a) Convertidor CC (para 5 niveles), b) PSPWM con cuatro portadoras y tensiones resultantes en cada puente y la suma de ambas

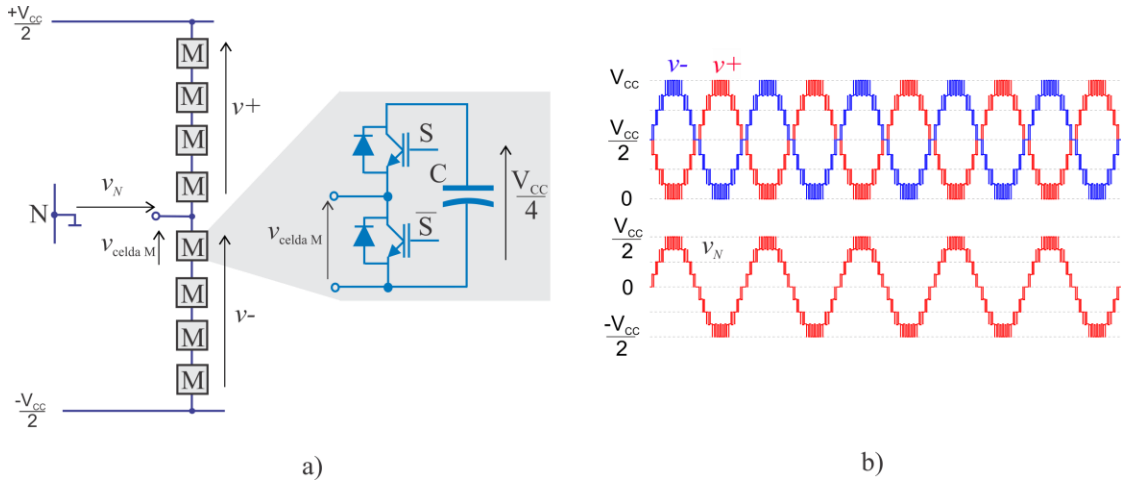


**Fig.8.** a) Columna CAMC, b) Modulación PWM híbrida

La necesidad de disponer de convertidores con las propiedades de los HMC pero con una única barra de alimentación dio origen a nuevas topologías asimétricas como, por ejemplo, el Convertidor Multinivel en Cascada Asimétrica de 5 niveles (CAMC) [9]. En la Fig.8 a) se muestra una columna con topología CAMC. Su estructura topológica es una cascada asimétrica porque posee una etapa de alta tensión conformada por las llaves complementarias  $S_{1,2}$  y  $\bar{S}_{1,2}$  que conmutan a frecuencia de red. Entre los puntos centrales de cada par de llaves se conecta la etapa de baja tensión conformada por una celda FCMC y que conmuta a alta frecuencia utilizando modulación PSPWM. Este esquema de modulación híbrida permite sintetizar una forma de onda de 5 niveles de tensión alterna a la salida de la columna (Fig.8 b)).

En la última década, una topología multinivel fue promovida por presentar ciertas virtudes como: modularidad, robustez de funcionamiento, tolerancia a fallas, entre otras; denominado, convertidor modular (MMC) [11]. Conceptualmente el MMC difiere de un





**Fig.9.** Columna MMC de 8 módulos por columna, b) Tensiones generadas sobre la mitad superior  $v+$ , la mitad inferior  $v-$  y la tensión entre el centro de columna y el punto medio de la barra de continua

convertidor VSC. Mientras un inversor consta de columnas con llaves que conmutan para conformar una forma alternada de tensión, el MMC concibe a cada columna como generadores sinusoidales en contrafase. Cada generador, se conforma de múltiples unidades elementales de conversión de tensión continua a tensión alterna como se indicó en la Fig.1 a). Conectando en serie un número muy alto de estas unidades elementales y ejecutando un complejo comando de sus llaves, es posible sintetizar un generador de tensión alterna multinivel. En la Fig.9 a) se presenta un ejemplo de una columna de MMC, conformada por cuatro módulos M por cada grupo ' $v+$ ' y ' $v-$ '. Cada módulo es un semi puente alimentado por un capacitor de alto valor, que requiere de un control de su estado de carga conservando un valor medio constante. Para el caso de la figura este valor debe ser igual a  $V_{cc}/4$ . Conmutando los módulos adecuadamente se pueden sintetizar las tensiones de cada grupo indicado en la Fig.9 b) obteniendo una tensión alterna cuyo valor máximo es  $V_{cc}/2$ . La meta de este tipo de convertidor es sumar muchos módulos de modo de aumentar el número de niveles y aumentar la calidad de la forma de onda alterna.

### Control de convertidores multinivel

El control de los convertidores multinivel requiere el cumplimiento de varios objetivos complementarios que dependen tanto de las aplicaciones como de la topología del convertidor. En la mayoría de los casos el control deseado se implementa en varias etapas como ser: lazo externo de control de las variables que dependen de la aplicación, lazos internos para definir las corrientes del convertidor, lazos complementarios para mantener el balance de las tensiones internas, moduladores para obtener las señales de comando de los dispositivos de potencia. El balance de las tensiones internas supone una dificultad creciente a medida que la cantidad de niveles aumenta. Las estrategias de control predictivo, capaces de manejar todos los objetivos de control simultáneamente [17], son una alternativa efectiva. Su implementación es posible mediante las modernas plataformas de cómputo disponibles en el mercado a precios razonables.

## Control predictivo

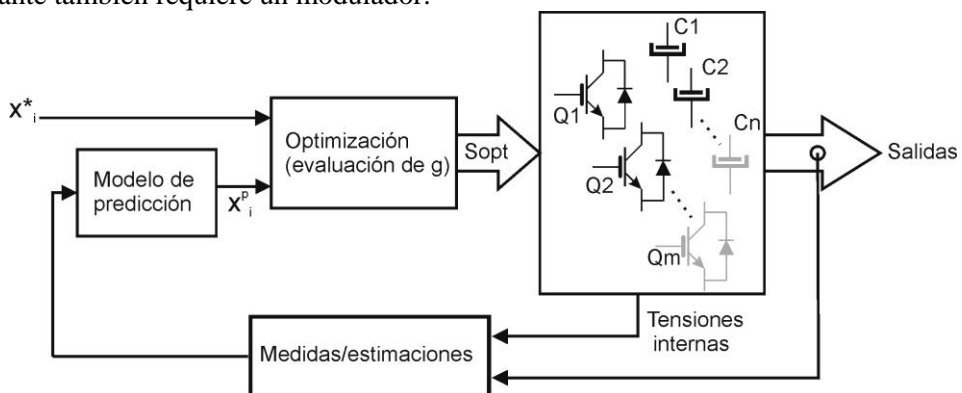
Todas las variantes de control predictivo se encuadran dentro de las estrategias de control óptimo. Esto significa que el objetivo de control se representa mediante una función de costo que explicita el criterio de optimización deseado y que generalmente adopta la forma:

$$g = \sum_i \lambda_i |x_i^* - x_i^p|$$

donde cada variable objetivo  $x_i^p$  (su valor estimado o precalculado) es comparada con su valor de consigna  $x_i^*$  y pesada a través de un factor de relevancia  $\lambda_i$ , dentro del conjunto de variables considerado. En general, todas las estrategias de control predictivo se componen de:

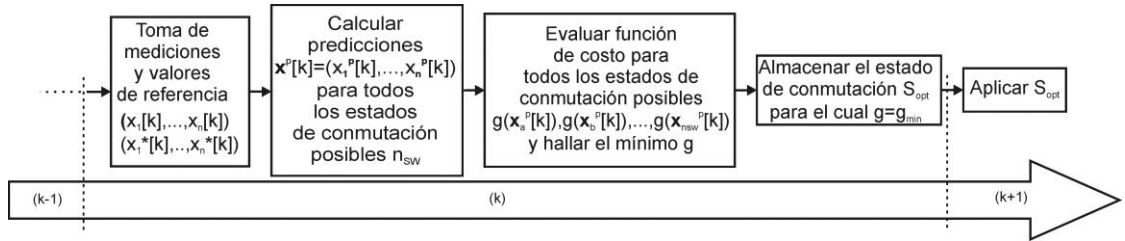
- 1) Modelo dinámico. Permite la estimación de las variables que se desean controlar.
- 2) Función de optimización. Representa el índice objetivo que se desea minimizar. Dicho error se define entre los valores de referencia y los valores que resultan de la estimación.
- 3) Horizonte de predicción. Es el rango temporal dentro del cual se realiza la optimización.

El esquema general, que se muestra en la Fig.10, se ha adoptado para el control de inversores de potencia en variantes específicas para mejorar distintos aspectos de implementación, siendo uno de los principales la elevada carga computacional requerida. Una variante, el Control Predictivo Generalizado (GPC), formula la resolución suponiendo que el sistema es lineal y sin restricciones, permitiendo obtener una única acción de control explícita que puede calcularse offline [18]. De este modo se evita la optimización online y se reduce sustancialmente la potencia de cálculo necesaria. Como contrapartida, al requerir linealidad de todo el sistema, incluido el convertidor, la naturaleza conmutada del mismo no puede ser tenida en cuenta y el convertidor debe controlarse a través de un modulador [19]. Otra implementación capaz de incorporar restricciones en las variables controladas es el Control Predictivo Explícito (EMPC) donde si las restricciones se suponen lineales es posible definir un conjunto de soluciones explícitas que pueden mapearse a través de una tabla de búsqueda dependiendo del estado dinámico del sistema. Al igual que en GPC, se evita la optimización online y con eso gran parte del trabajo de cómputo. Esta estrategia también ha sido exitosamente aplicada en una variedad de convertidores [20]. Al igual que el GPC, esta variante también requiere un modulador.



**Fig.10.** Controlador predictivo genérico: en las variantes GPC y EMPC el optimizador incluye un modulador, en el FCS-MPC éste selecciona directamente los estados de las llaves de potencia

Ninguna de las estrategias anteriores tiene en cuenta la naturaleza discreta de los convertidores conmutados. Sin embargo, si esto se considera, sólo un número discreto de estados de conmutación son susceptibles de ser evaluados por la función de costo y si dicha optimización se realiza sobre un futuro de corto alcance (una o dos muestras) es posible realizar la optimización online. Esta variante ha sido muy popularizada para el control de convertidores de potencia, especialmente en topologías multinivel y se denomina Control Predictivo con Conjunto Finito de Estados, (FCS-MPC: *Finite Control Set Model Predictive Control*) [21]. Dicha técnica se caracteriza por permitir la síntesis o control de las tensiones o corrientes de salida del inversor, conjuntamente con las tensiones internas, en forma simultánea en un algoritmo compacto y sencillo, aún en topologías multinivel complejas.



**Fig.11.** Secuencia de cálculos para el esquema FCS-MPC con horizonte de una muestra.

La Fig.11 muestra la secuencia del controlador en forma esquemática. Cada variable de interés debe ser medida u observada en cada periodo de muestreo. Mientras se aplica el estado de conmutación anterior, se miden dichas variables se toman sus valores de referencia y se evalúa una función de costo para cada estado de conmutación posible. Nótese que la cantidad de estados es igual a la cantidad de combinaciones posibles de llaveado y en consecuencia proporcional a la cantidad de llaves que posee el convertidor. La función de costo varía dependiendo de las variables de interés. Si se desea controlar la corriente de salida de un NPC como el mostrado en la Fig.5 a), dicha función tendrá como términos las corrientes de salida y la tensión del punto medio del bus de continua:

$$g = \left| i_{\alpha}^* - i_{\alpha}^p \right| + \left| i_{\beta}^* - i_{\beta}^p \right| + \lambda_{DC} \left| V_{CC} / 2 - v_N \right|$$

Para el mismo convertidor, si se desea controlar el par (T) y flujo ( $\Phi$ ) de un motor de inducción y también la tensión en el punto medio minimizando la cantidad de conmutaciones de las llaves de potencia, la función sería:

$$g = \left| T^* - T^p \right| + \lambda_{\phi} \left| \phi^* - \phi^p \right| + \lambda_{DC} \left| V_{CC} / 2 - v_N \right| + \lambda_n n_{SW}$$

En cada una de las expresiones para g, las variables de consigna (variables estrella) son proporcionadas por un lazo de control externo cuyo objetivo depende de la aplicación, limitándose el controlador predictivo a asegurar que las variables de salida sigan a sus pares de referencia y a la estabilidad interna del convertidor.

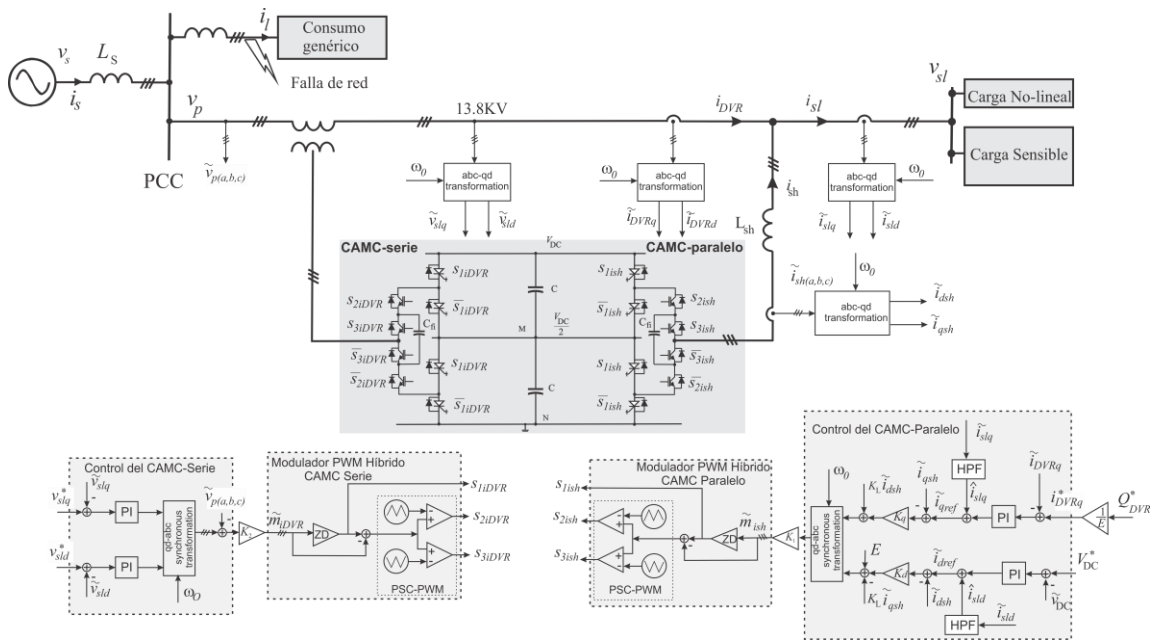
### 3. Aplicaciones

Los avances en los convertidores mostrados en las secciones anteriores han permitido la expansión de sus aplicaciones en muy diversas áreas. Entre ellas podemos mencionar: control de motores eléctricos necesarios tanto en tracción eléctrica como en la interfaz de generadores eólicos y la red; mejoramiento de la calidad de energía entregada,

donde se encuentran los distintos equipos de los sistemas flexibles de transmisión alterna (FACTS); sistemas de transmisión en corriente continua (HVDC). A continuación nos concentraremos en la descripción de dos aplicaciones en las que hemos trabajado recientemente.

### Mejora de la calidad de energía con un compensador universal

El nuevo panorama en las redes eléctricas, con varias fuentes de energías alternativas y generación distribuida, impone nuevos requisitos referidos a la calidad de energía entregada, así como variación de amplitud y frecuencia, cantidad de armónicas admisibles y otros [22]. Así han surgido una cantidad de equipos agrupados en los llamados sistemas de transmisión flexibles (FACTS) que no son otra cosa que convertidores dedicados a la compensación de redes eléctricas. Podemos encontrar compensadores en paralelo (STATCOM) que básicamente compensan reactivo y armónicas originados en las cargas. Compensador serie (DVR) que protegen a cargas sensibles de las variaciones en la red eléctrica y los compensadores universales (UPQC) que realizan una compensación combinada serie-paralelo. A modo de ejemplo describimos a continuación el uso de 2 convertidores CAMC en conexión back to back utilizados en la implementación de un UPQC [23].

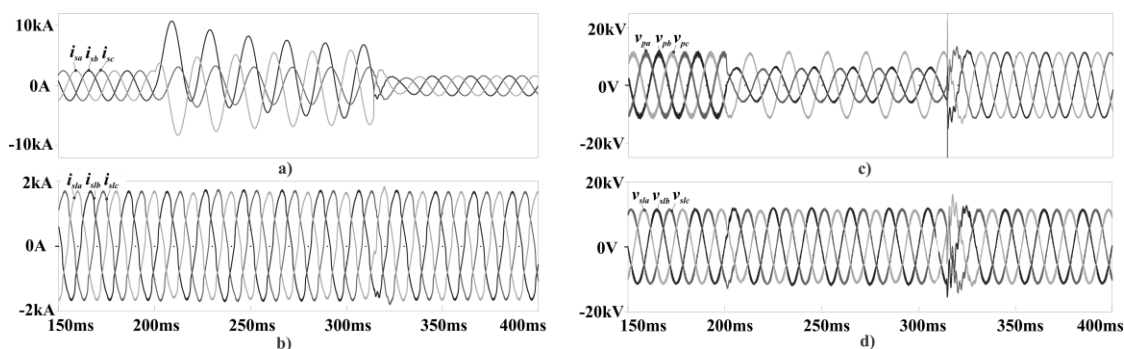


**Fig.12:** Compensador universal implementado con dos convertidores CAMC.

El sistema en estudio, mostrado en la parte superior de la Fig.12, consta de dos cargas conectadas a la red a través de un UPQC. Una carga sensible a la que se debe proveer tensión sinusoidal de amplitud constante y otra carga no lineal que consume corrientes armónicas. Los objetivos de control son: a) que el CAMC-paralelo provea toda la corriente reactiva y armónica que demanda la carga sensible y no lineal, de modo tal que la corriente en

la línea sea sinusoidal y en fase con la tensión; b) el CAMC-Serie debe proveer a la carga sensible una tensión de amplitud uniforme y de calidad sinusoidal frente a fuertes variaciones del lado del suministro en el punto común de conexión (PCC); c) se debe controlar la amplitud del enlace de tensión continua entre ambos CAMCs, con el mínimo flujo de potencia activa. Estos objetivos se logran con los controladores en cascada mostrados en la parte inferior de la Fig.12. Los lazos externos del convertidor paralelo, generan las referencias de corrientes que inyectará para controlar la potencia reactiva y armónica demandada por la carga, mediante controladores PI. También controla la amplitud de tensión en el enlace de continua. Por su parte el control del CAMC serie mide la tensión sobre la carga para compensar la diferencia respecto de la provista por la red en el PCC. En ambos convertidores las referencias de acción ingresan a los respectivos moduladores PWM híbridos que generar las señales de comando de los dispositivos de potencia.

La Fig.13 presenta los resultados obtenidos cuando se produce un cortocircuito asimétrico (entre dos fases) cerca del PCC. Mientras se sostiene la falla se establece una corriente de cortocircuito severo, y con ello, una caída de tensión con desbalances de importante magnitud en el PCC. En la Fig.13 se observa la situación antes de la falla ( $t < 200\text{ms}$ ), durante ( $200\text{ms} < t < 350\text{ms}$ ) y después que la falla es aislada de la red ( $t > 350\text{ms}$ ). La Fig.13 a) muestra las corrientes de línea demanda al suministro durante el intervalo de aparición de la falla y posterior desconexión. Al comienzo y durante la falla, las corrientes de



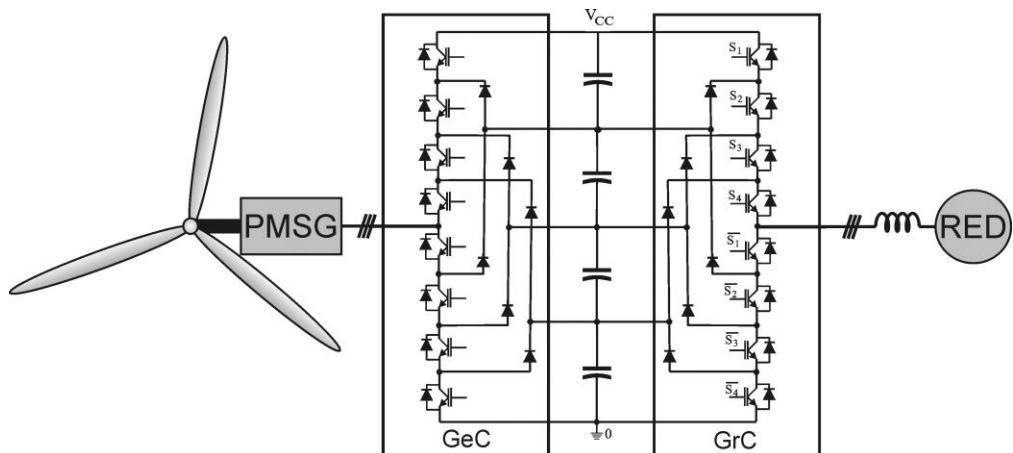
**Fig.13.** Tensiones y corrientes en condiciones de falla

las líneas a y c alcanzan una amplitud cercana a los 10 kA; en el instante de desconexión de la falla del sistema, éstas se establecen a los valores correspondientes a la carga sin falla. Claramente se ve que al desconectar la falla sólo queda la corriente del UPQC. A pesar de la gravedad de la falla, la carga sensible no ve modificaciones en su corriente, como puede observarse en la Fig.13 b). En la Fig.13 c) se aprecia las severas variaciones y desbalances de las tensiones de línea sufridas en el PCC, por efecto de la falla. Mientras que, en la Fig.13 d) se muestra claramente como la tensión aplicada sobre la carga sensible permanece imperturbable debido a la acción compensadora de la etapa CAMC-serie.

## Interfaz de potencia flexible para turbina eólica

La operación a velocidad variable de las turbinas eólicas aumenta la energía recolectada y su factor de utilización. Pero, dado que la red eléctrica opera a frecuencia constante, se precisa una interfaz que permita el desacople de frecuencias entre el generador y la red. Por otra parte, las turbinas actuales generan grandes potencias y empujan el aumento de la tensión de operación a fin de reducir el calibre de los conductores, motivación que hace a los convertidores multinivel una alternativa interesante [24].

La Fig.14 muestra una interfaz de potencia que vincula la máquina generadora con una red de media tensión. Dicha interfaz consiste en dos convertidores con diodos de enclavamiento (*DCMC*) trifásicos de 5 niveles conectados a un bus de tensión continua  $V_{CC}$  compartido. El DCMC es una extensión topológica del convertidor NPC presentado en la Sec.2 y una de sus tres columnas se muestra en detalle en la misma figura. El control del sistema se realiza en dos niveles: 1) Un control local e independiente de cada convertidor y 2) un control global que genera las señales de referencia para los controladores locales [25].

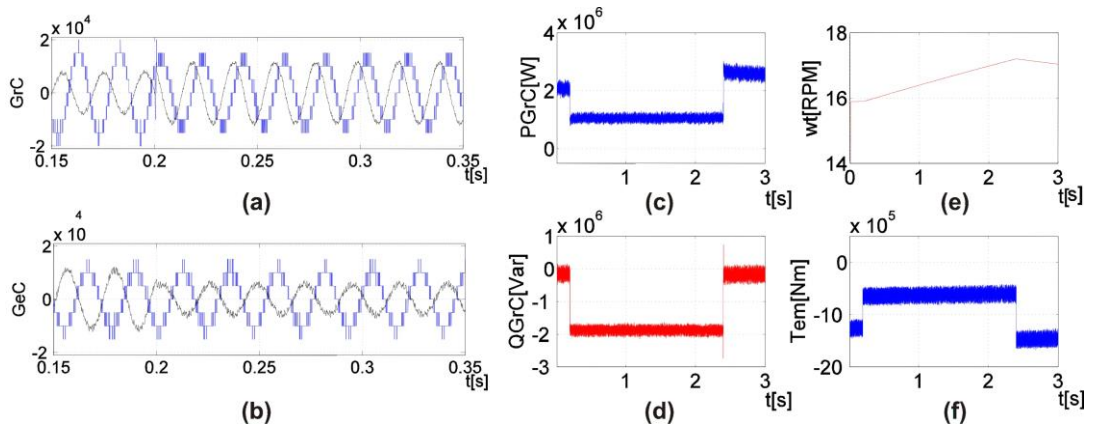


**Fig.14.** Esquema de interfaz generador-red implementado con dos inversores DCMC

El control del convertidor conectado a la turbina eólica ( $GeC$ ) se encarga de controlar las corrientes del generador de imanes permanentes (*PMSG: Permanent Magnet Synchronous Generator*); mientras que el conectado a la red ( $GrC$ ) controla el flujo de potencia activa y reactiva hacia la red eléctrica. Ambos aportan al balance de los capacitores del enlace de continua que deben mantenerse cargados a un cuarto de la tensión total del mismo. El objetivo global del conjunto consiste en extraer la máxima potencia posible del viento, inyectándola a la red y estabilizando la tensión total del bus DC. En caso de falla por baja tensión de la red eléctrica, debe proveer potencia reactiva de acuerdo con lo que exige el operador de la red como servicio auxiliar.

Las estrategias locales de control son del tipo predictivo FCS-MPC. Para el convertidor  $GeC$  se evalúa una función de costo  $g_{GeC}$  cuyos términos cuantifican las corrientes

en fase y en cuadratura de la máquina generadora y las tensiones de los cuatro capacitores del bus DC:



**Fig.15:** Tensiones, corrientes y potencias en la interfaz turbina-red eléctrica. a) Tensión multinivel y corriente de línea del convertidor lado red (GrC), b) Idem anterior para el convertidor lado generador (GeC), c) Potencia activa entregada por el GrC, d) Potencia reactiva entregada por el GrC, e) Velocidad angular de las palas, f) Par de frenado sobre las palas.

$$g_{GeC} = \frac{|i_d^* - i_d^p|}{i_{nominal}} + \frac{|i_q^* - i_q^p|}{i_{nominal}} + \sum_{i=1}^4 \frac{|V_{CC}/4 - V_{Ci}^p|}{V_{CC}/4}$$

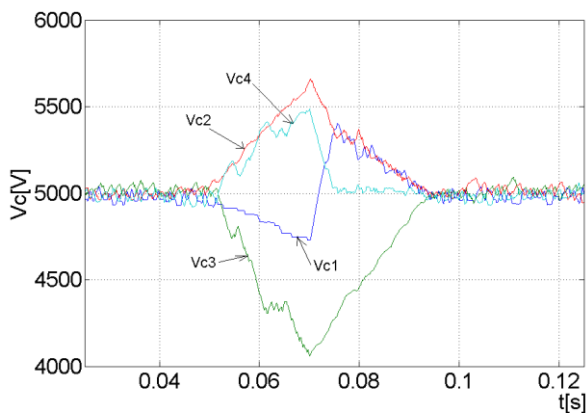
Para el convertidor GrC, las variables a controlar son la potencia activa y la reactiva y también las tensiones en los capacitores del bus DC:

$$g_{GrC} = \frac{|P^* - P^p|}{S_{nominal}} + \frac{|Q^* - Q^p|}{S_{nominal}} + \sum_{i=1}^4 \frac{|V_{CC}/4 - V_{Ci}^p|}{V_{CC}/4}$$

En cada periodo de muestreo, ambas funciones de costo son evaluadas para cada uno de los estados posibles del convertidor DCMC trifásico dando como resultado el estado de conmutación que minimiza g.

El controlador global, cuyos detalles pueden consultarse en [25], proporciona al controlador GeC el par de frenado (proporcional a  $i_q^*$ ) que extrae la máxima potencia de la turbina para la velocidad de viento medida. La componente  $i_d^*$  se iguala a cero para no alterar la magnetización del generador. Por otro lado, la potencia mecánica, calculada a partir del par óptimo y la velocidad en el eje, se envía como señal de referencia  $P^*$  al controlador GrC, mientras  $Q^*$ , en condiciones normales de la red, se establece en cero kVar a fin de operar con factor de potencia unitario. Habitualmente ocurren fallas que originan caídas de tensión en la red y que es preciso mitigar o disminuir. En estos casos, los operadores de la red exigen a las plantas generadoras que inyecten corriente reactiva en cierta proporción con la caída en cuestión, de tal modo que la referencia  $Q^*$  deja de ser cero para ocupar una fracción de la potencia total del convertidor el cual, durante tales eventualidades dejará de operar a factor de potencia unitario. En las Fig.15 a) y b) se muestran la tensión y corriente de una línea del GrC y del GeC, respectivamente. Antes de  $t=0,2s$ , ambas corrientes poseen una fase relativa a la tensión de 210 grados, es decir tanto el generador como la red operan a factor de potencia unitario transfiriendo energía desde el generador hacia la red. La Fig.15 c) muestra que la potencia entregada en este lapso de tiempo es 2MW, mientras la potencia reactiva es cercana a

cero. El hueco de tensión en la red ocurre en  $t=0,2s$ , a partir de lo cual, parte de la capacidad operativa del GrC se asigna a potencia reactiva (2MVAr, Fig.15 d)), para no exceder la potencia total del convertidor, la potencia transferida a la red debe caer a 1MW (Fig.15 c)). También se observa en la Fig.15 a), el rápido cambio de fase de la corriente. Las Fig.15 f) y e) muestran la reducción del par de frenado y la aceleración de la turbina, la cual debe ser compensada con el control de pitch de las palas, que no es considerado en este estudio. Por último, la Fig.16 muestra las tensiones de los cuatro capacitores que conforman el enlace de continua y el efecto de anular el factor de peso relativo al balance en ambos convertidores. Cuando los controladores no tienen en cuenta las tensiones en los capacitores, éstas comienzan a apartarse de su valor de referencia ( $t=0,05s$ ) y al restablecerse el factor de peso ( $t=0,07s$ ) recobran la tendencia hacia el balance.



**Fig.16:** Tensiones sobre los capacitores del bus DC

## Conclusiones y panorama futuro

El desarrollo de los convertidores multinivel ha venido de la mano de la evolución de los dispositivos electrónicos de potencia (con mayores valores de tensiones y corrientes nominales); el avance de los sistemas de micro cómputo, que permiten implementar algoritmos de control más complejos y de la reducción de los costos de producción. Los esfuerzos de la academia y la industria han permitido superar las limitaciones impuestas por la complejidad circuital y su controlabilidad; haciendo que hoy los convertidores multinivel sean muy competitivos.

Los avances tecnológicos en el campo de las energías renovables, sumado a la madurez de los conceptos de redes inteligentes y generación distribuida, han constituido un terreno fértil para el uso de nuevas topologías de convertidores electrónicos. En el campo de las altas potencias, las líneas de transmisión en continua hoy se desarrollan fundamentalmente empleando convertidores modulares (MMC). En lo que respecta a energías alternativas, los convertidores multinivel están siendo considerados como una solución competitiva tanto en generación eólica como en generación fotovoltaica. En cuanto a los autos eléctricos, también están considerando a los convertidores multinivel, no tanto por los niveles de potencia y tensión sino por su la calidad de sus formas de onda a la salida que reduce la emisión electromagnética y permite reducir los filtros necesarios.



Otro aspecto, aún no investigado mayormente, es la incorporación de los nuevos dispositivos de carburo de silicio o nitruro de galio, en los convertidores multinivel. Su mayor capacidad de soportar alta tensión y conmutar a alta frecuencia permitirán aumentar aún más los rangos de potencia y disminuir el peso y volumen de los convertidores.

Por otra parte, se espera que en el futuro cercano el uso generalizado de energías alternativas y redes inteligentes, generarán nuevos requisitos en cuanto a códigos de red, calidad de energía y otros que impondrán nuevos retos al desarrollo de topologías de convertidores de potencia capaces de cumplimentar los nuevos desafíos.

## Referencias

- [1] B.K. Bose, *Power Electronics in Renewable Energy Systems and Smart Grid: Technology and Applications*, Wiley-IEEE Press, 2019.
- [2] I. Colak, E. Kabaki, G.Fulli & S. Lazarou, "A survey on the contributions of power electronics to smart grid systems", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 47 pp. 562-579, 2015.
- [3] J. Rabkowski, D. Pefitsis & H. P. Nee, "Recent advances in power semiconductor technology," in *Power Electronics for Renewable Energy Systems, Transportation and Industrial Applications*, H. Abu-Rub, M. Malinowski, and K. Al-Haddad, Eds. Hoboken, NJ, USA: Wiley, 2014, pp. 69–106.
- [4] J. Rodriguez *et al.*, "Multilevel converters: An enabling technology for high-power applications," *Proc. IEEE*, vol. 97, no. 11, pp. 1786–1817, 2009.
- [5] Franquelo, L.G.; Rodriguez, J.; Leon, J.I.; Kouro, S.; Portillo, R. & Prats, M.A.M., "The age of multilevel converters arrives," *IEEE Industrial Electronics Magazine*, vol.2, no.2, pp.28-39, June 2008.
- [6] S. A. González, S. A. Verne & M. I. Valla, *Multilevel Converters for Industrial Applications*, (ISBN 978-1-4398-9559-7), CRC Press, Taylor & Francis Group, EEUU, 2013.
- [7] A. Nabae, I. Takahashi & H. Akagi, "A new neutral-point-clamped PWM inverter," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. IA-17, no. 5, pp. 518–523, 1981.
- [8] T. A. Meynard & H. Foch, "Multi-level conversion: High voltage choppers and voltage-source inverters," *23rd Annual IEEE Power Electron. Specialists Conf. (PESC'92)*, Toledo, Spain, vol.1, pp.397-403, 29 Jun-3 Jul 1992.
- [9] S.González, M.I.Valla & C.Christiansen, "Analysis of a 5-level cascade asymmetric multilevel converter", *IET Power Electronics*, vol. 3 n° 1, pp 120-128, 2010.
- [10] M. Malinowski, K. Gopakumar, J. Rodríguez & M. A. Pérez, "A survey on cascaded multilevel inverters," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 57, no. 7, pp. 2197–2206, 2010.
- [11] M. A. Perez, S. Bernet, J. Rodriguez, S. Kouro & R. Lizana, "Circuit topologies, modeling, control schemes, and applications of modular multilevel converters," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 30, no. 1, pp. 4–17, 2015.
- [12] Siemens, "HVDC PLUS—the decisive step ahead", [www.siemens.com/energy/hvdcplus](http://www.siemens.com/energy/hvdcplus) 2016.
- [13] C.Facchin & H. Fassler, "60 years of HVDC" *ABB Reviews Special Reports*, 2014 ISSN 1013-3119. [www.abb.com/abbreview](http://www.abb.com/abbreview)

- [14] J. I. Leon, S. Kouro, L. G. Franquelo, J. Rodriguez & B. Wu, "The essential role and the continuous evolution of modulation techniques for voltage-source inverters in the past, present, and future power electronics," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 63, no. 5, pp. 2688–2701, 2016.
- [15] D. G. Holmes & T. A. Lipo, "*Pulse Width Modulation for Power Converters. Principles and Practice*", John Willey & Sons, Inc., US, 2003.
- [16] C. Rech & J.R. Pinheiro, "Hybrid Multilevel Converters: Unified Analysis and Design Considerations", *IEEE Trans. on Ind. Electr.*, vol. 54, No. 2, pp. 2031-2036, April 2007.
- [17] S. Vazquez, J. Rodriguez, M. Rivera, L. G. Franquelo & M. Norambuena, "Model Predictive Control for Power Converters and Drives: Advances and Trends," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 64, no. 2, pp. 935-947, 2017.
- [18] C. Bordons & E. Camacho, "A generalized predictive controller for a wide class of industrial processes," *IEEE Trans on Control Systems Tech.*, vol. 6, no. 3, pp. 372–387, 1998.
- [19] M. Judewicz, S. González, N. Echeverría, J. Fischer & D. Carrica, "Generalized predictive current control (GPCC) for grid-tie three-phase inverters", *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 63, n° 7, pp.4475-4484, 2016.
- [20] S. Mariethoz & M. Morari, "Explicit model-predictive control of a PWM inverter with an LCL filter," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 56, n° 2, pp. 389-399, 2009.
- [21] J. Rodriguez & P. Cortés, *Predictive Control of Power Converters and Electrical Drives*, UK, Wiley, 2012.
- [22] T. Ackermann, et al., "Scaling up variable renewable power: The role of grid codes," *World Future Energy*, (ISBN :978-92-95111-85-1), 2016.
- [23] S.González & M.I.Valla, "UPQC implemented with cascade asymmetric multilevel converters", *Electric Power Systems research*, vol 124, pp. 144-151, 2015.
- [24] V. Yaramasu, B. Wu, P. C. Sen, S. Kouro & M. Narimani, "High-power wind energy conversion systems: State-of-the-art and emerging technologies," *Proc. IEEE*, vol. 103, n° 5, pp. 740–788, 2015.
- [25] S.A. Verne & M. I. Valla "Direct connection of WECS system to the MV grid with multilevel converters", *Renewable Energy*, vol 41, pp.336-344, 2012.

Manuscrito recibido el 13 de abril de 2020.

Aceptado el 28 de abril de 2020.