

OPERACIÓN AVANZADA DE CONVERTIDORES MULTINIVEL EN CASCADA



COLECCIÓN: MONOGRAFÍAS DE LA ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA

DIRECTOR DE LA COLECCIÓN

Rodríguez Rubio, Francisco. Universidad de Sevilla

CONSEJO DE REDACCIÓN

Arahal Junco, Consuelo. Universidad de Sevilla.

Carballar Rincón, Alejandro. Universidad de Sevilla.

Limón Marruedo, Daniel. Universidad de Sevilla.

Rodríguez Luis, Alejandro José. Universidad de Sevilla.

Rodríguez Rubio, Francisco. Universidad de Sevilla.

Salas Gómez, Francisco. Universidad de Sevilla.

COMITÉ CIENTÍFICO

Aracil Santonja, Javier. Universidad de Sevilla y Universidad de Málaga

Bernelli Zazzera, Franco. Politecnico di Milano

Chinesta, Francisco. École Centrale de Nantes

Félez Mindan, Jesús. Universidad Politécnica de Madrid

Gallego Sevilla, Rafael. Universidad Politécnica de Madrid

García-Lomas Jung, Francisco Javier. Universidad de Sevilla

Giner Maravilla, Eugenio. Universidad Politécnica de Valencia

González Díez, Isabel. Universidad de Sevilla

Montañés García, José Luis. Universidad Politécnica de Madrid

Montes Martos, Juan Manuel. Universidad de Sevilla

Navarro Esteve, Pablo José. Universidad Politécnica de Valencia.

Ollero de Castro, Pedro. Universidad de Sevilla

Verdú, Sergio. Princeton University

Abraham Márquez Alcaide (*coordinador*)
José Ignacio León Galván
Sergio Vázquez Pérez
Leopoldo García Franquelo

OPERACIÓN AVANZADA DE CONVERTIDORES MULTINIVEL EN CASCADA



SEVILLA 2022

Colección: Monografías de la Escuela Técnica Superior de Ingeniería
de la Universidad de Sevilla

Núm.: 26

COMITÉ EDITORIAL:

Araceli López Serena
(Directora de la Editorial Universidad de Sevilla)
Elena Leal Abad
(Subdirectora)
Concepción Barrero Rodríguez
Rafael Fernández Chacón
María Gracia García Martín
Ana Ilundáin Larrañeta
María del Pópulo Pablo-Romero Gil-Delgado
Manuel Padilla Cruz
Marta Palenque Sánchez
María Eugenia Petit-Breuilh Sepúlveda
José-Leonardo Ruiz Sánchez
Antonio Tejedor Cabrera

Reservados todos los derechos. Ni la totalidad ni parte de este libro puede reproducirse o transmitirse por ningún procedimiento electrónico o mecánico, incluyendo fotocopia, grabación magnética o cualquier almacenamiento de información y sistema de recuperación, sin permiso escrito de la Editorial Universidad de Sevilla.

Motivo de cubierta: El dibujo representa la forma de onda que genera el convertidor con alguna definición básica y el esquema básico del convertidor de potencia.

© Editorial Universidad de Sevilla 2022
C/ Porvenir, 27 - 41013 Sevilla.
Tlfs.: 954 487 447; 954 487 451; Fax: 954 487 443
Correo electrónico: eus4@us.es
Web: <https://editorial.us.es>

© Abraham Márquez Alcaide (coordinador), José Ignacio León Galván,
Sergio Vázquez Pérez, Leopoldo García Franquelo 2022

Impreso en papel ecológico
Impreso en España-Printed in Spain

ISBN 978-84-472-2329-9
Depósito Legal: SE 1312-2022

Diseño de interior (LaTeX): F. Javier Payán Somet 2014.
Maquetación de interior (LaTeX): Los autores
Diseño de cubierta: Santi García Hernández
Realización de cubierta: referencias.maquetacion@gmail.com
Impresión: Masquelibros

A nuestras familias

Agradecimientos

El presente documento ha sido posible gracias a la siguiente financiación:

- Proyecto: Métodos de control térmico activo para la mejora de la operación y gestión de convertidores de potencia modulares en sistemas de generación eléctrica (M-ATC) (P18-RT-1340), financiado por la Consejería de Economía y Conocimiento de la Junta de Andalucía.
- Proyecto: Diseño y operación óptima de convertidores de potencia para infraestructuras de recarga de vehículos eléctricos (PID2020-115561RB-C31), financiado por el Ministerio de Ciencia e Innovación.
- Contratación de Personal Investigador Doctor. (Convocatoria 2019) 43 Contratos Capital Humano Línea 2. PAIDI 2020, financiado por European Social Fund y la Junta de Andalucía.

Los autores

Sevilla, 2022

Índice

<i>Prefacio</i>	IX
1 Escenario Energético Actual y el Mantenimiento de Sistemas de Potencia	1
1.1 Revisión del escenario energético	1
1.2 Convertidor de potencia modular basado en la conexión serie	11
1.3 Convertidor de potencia modular basado en la conexión en paralelo	16
2 El Convertidor de Potencia Multinivel en Cascada	19
2.1 Topología del convertidor CHB	19
2.2 Esquema de control y modulación para convertidores CHB	22
2.2.1 Control del convertidor CHB monofásico	22
2.2.2 Control del convertidor CHB trifásico	23
2.2.3 Modulación de las tensiones de referencia en un convertidor CHB	25
3 Análisis Armónico de PS-PWM Aplicado al Convertidor CHB	33
3.1 Descripción Matemática de PS-PWM usando la Expansión en Series de Fourier	34
3.2 Validación del Modelo Matemático Propuesto para la Técnica PS-PWM	38
3.2.1 Caso balanceado	39
3.2.2 Caso desbalanceado	41
4 Método PS-PWM de Ángulos Variables aplicado al Convertidor CHB	45
4.1 Técnica de Modulación PS-PWM de Ángulo Variable (VA-PS-PWM)	45
4.2 Solución Analítica para Mejorar el Espectro de la Tensión de Salida del Convertidor CHB	50
4.3 Límites de la Solución Analítica	52
4.4 Implementación de la Técnica VA-PS-PWM cada Tiempo de Muestreo	52

5	Validación de VA-PS-PWM Aplicada al Convertidor CHB	55
5.1	Validación de la Técnica VA-PS-PWM en Múltiples Escenarios	57
5.1.1	Experimento 1	58
5.1.2	Experimento 2	59
5.1.3	Experimento 3	60
5.1.4	Experimento 4	63
5.1.5	Experimento 5	63
5.1.6	Experimento 6	65
5.1.7	Análisis del método propuesto en términos de convergencia	67
5.2	VA-PS-PWM en Convertidores CHB en Conexión a Red con Aplicación Fotovoltaica	69
5.2.1	Experimento 1	71
5.2.2	Experimento 2	73
5.2.3	Análisis de Convergencia para los Escenarios de Conexión a Red en la Aplicación Fotovoltaica	76
6	VA-PS-PWM para Convertidores CHB con un Número Alto de Módulos	77
6.1	Extensión de la técnica VA-PS-PWM	81
6.1.1	Caso de un convertidor CHB de cuatro módulos ($M=4$)	81
6.1.2	Caso de un convertidor CHB de cinco módulos ($M=5$)	85
6.1.3	Caso de un convertidor CHB de seis módulos ($M=6$)	86
6.1.4	Método VA-PS-PWM para convertidores CHB con más de seis módulos ($M > 6$)	88
	M grande y múltiplo de tres ($M=9,12,15,\dots$)	88
	M grande y no múltiplo de tres ($M=7,8,10,11,\dots$)	89
6.2	Diagrama para la Implementación del Método VA-PS-PWM	89
6.2.1	Algoritmo para elegir la mejor combinación	91
6.2.2	Implementación del método VA-PS-PWM	91
6.3	Validación del Método VA-PS-PWM	92
6.3.1	Escenario I	93
6.3.2	Escenario II	95
6.3.3	Escenario III	96
6.3.4	Cálculo del tiempo de ejecución requerido	99
6.3.5	Análisis de Montecarlo	101

7	VA-PS-PWM Aplicado a un Convertidor CHB con Control Térmico Activo	105
7.1	Control Térmico Activo para Convertidores CHB con Tensión de Salida Mejorada	106
7.2	VA-PS-PWM Aplicado Conjuntamente con Métodos ATC Basados en D-PWM	108
7.3	Implementación de VA-PS-PWM en Conjunto con ATC Basado en una Técnica D-PWM	110
7.4	Validación Mediante Resultados Experimentales	113
8	Sistema Híbrido PV-Batería en un Convertidor CHB Operado con VA-PS-PWM	119
8.1	Convertidor CHB de Dos Módulos con un Módulo Extra Alimentado por Batería	121
8.2	Operación Mejorada del Convertidor CHB con módulo extra	123
8.3	Aplicación del Método a un Sistema PV Conectado a Red con un Inversor CHB	125
9	Análisis Armónico de PS-PWM Mediante la Doble Integral de Fourier	131
9.1	Particularización para el caso del convertidor CHB con M módulos de potencia por fase	133
9.2	Resumen del Problema del Convertidor CHB con Operación Desbalanceada	136
9.3	Análisis del contenido armónico de la Tensión de Salida del Convertidor CHB	136
9.3.1	Análisis para el caso del convertidor CHB con tres módulos	138
9.3.2	Análisis para el caso del convertidor CHB con cuatro módulos ($M = 4$)	138
9.3.3	Análisis para el caso de un convertidor CHB de 5 módulos ($M = 5$)	141
9.4	VA-PS-PWM Generalizado Basado en la Doble Integral de Fourier	142
9.5	Comparación de las Implementaciones de VA-PS-PWM	147
9.5.1	Convertidor CHB de cuatro módulos	148
9.5.2	Convertidor CHB de cinco módulos	150
9.5.3	Resultados experimentales	153
9.5.4	Análisis de Montecarlo	156
10	Optimización de VA-PS-PWM con ATC Usando Técnicas Heurísticas	159
10.1	Descripción Armónica de la Tensión de Salida de un Convertidor CHB con ATC	160
10.1.1	Descripción armónica de D-PWM para el módulo enclavado	162
10.1.2	Descripción armónica de D-PWM para el módulo que compensa al módulo enclavado	163
10.1.3	Otras consideraciones	164
10.2	Tensión de Salida Optimizada para un Convertidor CHB con ATC Basado en D-PWM	166
10.3	Resultados experimentales	172
	<i>Índice de Figuras</i>	179
	<i>Índice de Tablas</i>	189
	<i>Bibliografía</i>	191

Prefacio

El trabajo presentado en este libro es el resultado de parte de la investigación desarrollada en el grupo de electrónica de potencia del Departamento de Ingeniería Electrónica de la Universidad de Sevilla durante los últimos años.

Dicha investigación se enmarca en el campo de los convertidores de potencia de tipo modular. Durante las últimas décadas, este tipo de convertidores se ha vuelto muy popular ya que ha dado solución a retos a nivel industrial para aplicaciones de media tensión y/o con requerimientos de alta tolerancia a fallos y reducidos costes de mantenimiento. Sin embargo, el uso de convertidores modulares presenta algunos problemas cuando éstos son operados bajo unas condiciones de trabajo desbalanceadas o asimétricas. En consecuencia, parte de las buenas prestaciones que presentan estos convertidores se ven mermadas. El principal objetivo de este libro es presentar, tanto desde el marco teórico como desde un punto de vista práctico, diferentes soluciones a dichos problemas para esta familia de convertidores de potencia.

El capítulo 1 introduce el escenario energético actual. Además, se presentan los conceptos básicos por los cuales los convertidores de potencia modulares son una opción atractiva en la industria, ilustrándose con algunas aplicaciones reales a modo de ejemplo. El capítulo 2 profundiza con detalle no sólo en la topología básica del convertidor multinivel cascada como ejemplo de convertidor modular, sino que además se presenta un resumen de cómo ha de operarse el convertidor en cuanto a estrategias de control eficientes y métodos de modulación de altas prestaciones. Desde el capítulo 3 hasta el 8, se profundiza en el estudio armónico de la tensión de salida del convertidor multinivel cascada mediante el uso de las Series de Fourier, analizándose las ventajas e inconvenientes de esta herramienta matemática para esta aplicación. De manera análoga, desde el capítulo 9 hasta el 10, dicho estudio armónico se realiza mediante la doble Integral de Fourier. Esta herramienta matemática permite el estudio del espectro armónico de la tensión de salida de una manera muy detallada.

1 Escenario Energético Actual y el Mantenimiento de Sistemas de Potencia

1.1 Revisión del escenario energético

En las últimas décadas, como consecuencia del calentamiento global a causa de la emisión de gases de efecto invernadero, existe una acción coordinada por parte de instituciones públicas, empresas e investigadores para mitigar el impacto negativo que éstos tienen sobre el planeta. En este sentido, se han llegado a diferentes acuerdos internacionales para reducir el uso de los combustibles fósiles con la consiguiente reducción en las emisiones de gases de efecto invernadero. Estos acuerdos no están limitados a los países, sino también existen multitud de empresas privadas muy concienciadas con su propia huella de carbono, impulsando el uso de energías provenientes de fuentes renovables. Como se puede ver en la figura 1.1, se prevé que en la distribución de la potencia disponible en el planeta las energías limpias tengan un mayor peso.

Las fuentes de energías renovables han experimentado un crecimiento exponencial en su desarrollo técnico y tecnológico. De hecho, la previsión y el objetivo establecido por las diferentes naciones es muy ambicioso tal y como se puede observar en la figura 1.2. Esto es debido en gran medida a la producción en masa así como la caída en el precio de fabricación e instalación de los sistemas. Tal y como se muestra en la figura 1.3, el total de potencia instalada correspondiente a los sistemas de solar fotovoltaica y eólica (representada en amarillo) así como el incremento de potencia instalada anual (representado en rojo) están experimentando un crecimiento exponencial [1]. Por lo tanto, es innegable que existe una alta penetración de energías renovables (solar fotovoltaica y eólica son sólo dos ejemplos de la multitud que se puede encontrar) en la red de distribución energética.

La red eléctrica de distribución de energía tradicional fue diseñada basada en un sistema jerárquico donde toda la energía generada fluye en una única dirección. En otras palabras, la energía viaja desde las plantas de generación (que se trata del primer eslabón de la cadena energética actual), hasta los consumidores (que son las cargas del sistema). En este escenario, la gestión energética se controla mediante un flujo de información muy limitado entre los puntos de generación y de consumo. En consecuencia, la red de distribución de energía actual es muy sensible tanto a las variaciones en la carga como a los problemas de estabilidad en términos de tensión y frecuencia. Además, ni que decir tiene que existe un problema asociado a las fuentes de energía renovables ya que su naturaleza es inherentemente intermitente. Éste es un problema fácil de entender, por ejemplo, en el caso de la energía solar fotovoltaica ya que las horas de sol son limitadas, mientras que en el caso de la energía eólica el viento no es constante. De hecho, en lugares donde existe una alta penetración de fuentes de energía renovable en su red de distribución puede existir problema de estabilidad en la red eléctrica.

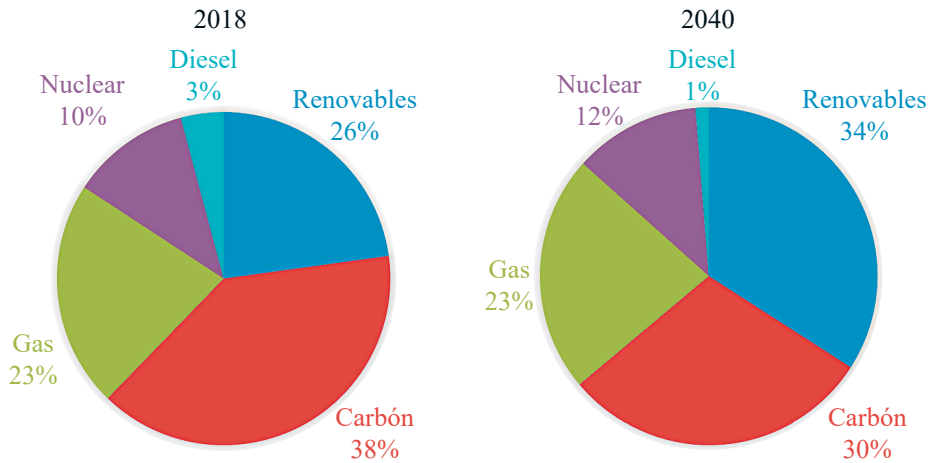


Figura 1.1 Distribución de la potencia instalada en el planeta en el año 2018, y la previsión en el año 2040.

Otro problema relacionado con la integración de las energías renovables y su gestión eficiente es el almacenamiento de la energía en el caso de que la generación sea superior a la demanda. Si esto ocurre, la red eléctrica no demanda toda la energía disponible y la restante debe almacenarse o ser simplemente no producida (creando lo que se denomina lucro cesante). Existen multitud de sistemas de almacenamiento de energía, sin embargo los más populares están basados en el uso de baterías y super-condensadores. Al igual que ha ocurrido con las instalaciones fotovoltaicas y eólicas, se prevé una fuerte bajada en los próximos años del precio de instalación de los sistemas de almacenamiento de energía asociados a plantas de generación de energía renovable.

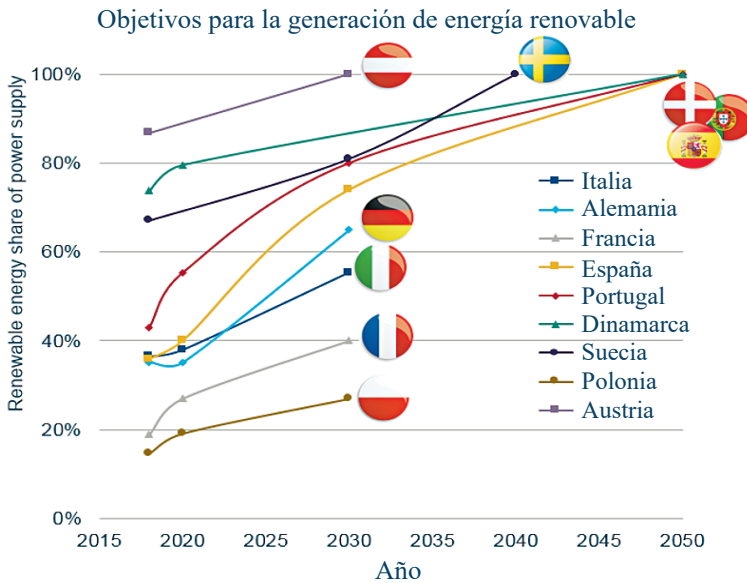


Figura 1.2 Previsión en la penetración de las fuentes renovables en la generación de la energía para diferentes países.

Tal y como se puede extraer de la figura 1.3, la penetración de las energías renovables basadas en energía eólica y energía fotovoltaica presenta un crecimiento constante, en parte debido al continuo incremento de la energía demandada por el modelo de la sociedad actual. Este hecho hace que se considere un nuevo diseño de la red de distribución de energía, y por lo tanto, es necesaria una gran inversión por parte de las instituciones públicas y privadas. Esto ha dado pie a la reconsideración del modelo energético actual en pro de una generación más deslocalizada y distribuida (DG) así como el nuevo paradigma de red eléctrica inteligente (Smart-grid en inglés, (SG)). En la figura 1.4 se ha representado un ejemplo básico de red inteligente. Una SG es definida por la entidad Smart Grids European Technology Platform como "una red eléctrica que puede integrar de manera inteligente todas las acciones de todos los usuarios conectados a la misma (generadores, consumidores o aquellos que desempeñan ambas) para ofrecer una fuente de electricidad segura, eficiente sostenible y económica" [2].

Ya en la actualidad (recientemente en España a partir del real decreto 22/2019), el modelo de generación energética ha pasado a ser bidireccional y paulatinamente los consumidores pasarán a ser productores también de energía (surgiendo el concepto de "prosumers"). Esto significa que a veces éstos se comportarán como consumidores y otras, como productores. Esto no queda tan lejos como parece ya que está empezando a ser una realidad a pequeña escala en los últimos años. Los conceptos de edificio inteligente (Smart Buildings) ó los paradigmas de Grid2Vehicle y Vehicle2Grid parten de este concepto y serán una realidad en el corto plazo como ya lo es el coche puramente eléctrico o las instalaciones solares fotovoltaicas de autoconsumo.

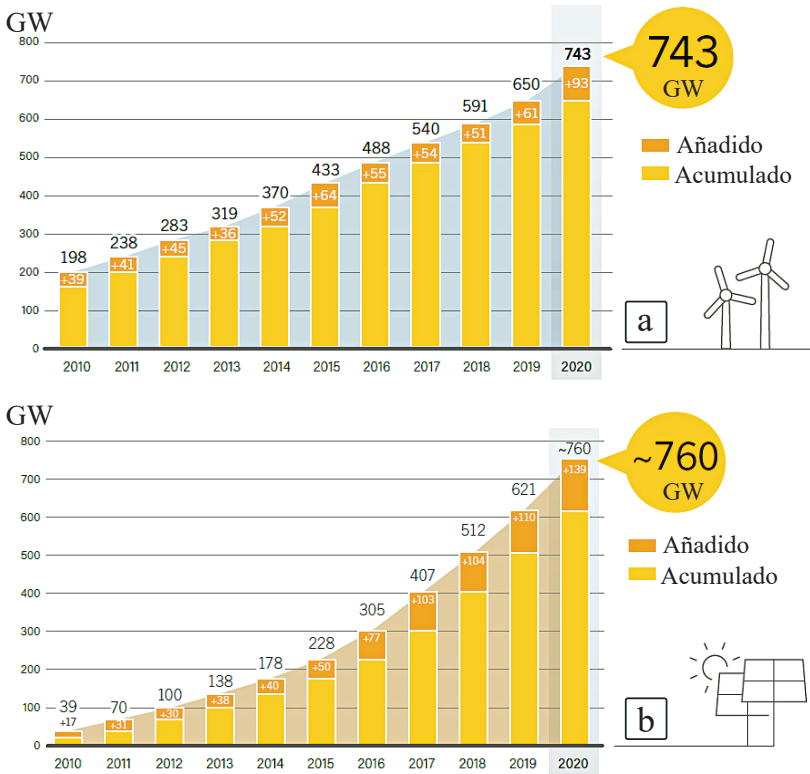


Figura 1.3 Potencia total instalada a nivel global a) Generación Eólica b) Generación fotovoltaica.

En este sentido, el escenario energético está envuelto en una auténtica revolución donde nuevas tecnologías de semiconductores, estrategias de control y modulación aparecen cada día y donde el concepto de SG juega el papel principal [3, 4]. En consonancia con el paradigma de SG, y como ejemplo de sistema que facilitará su implementación, aparece también el concepto de los transformadores inteligentes (Smart Transformer (ST)).

Los STs son la evolución natural de los transformadores de estado solido (SSTs) y éstos, a su vez, están sustituyendo a los transformadores tradicionales. Tanto los STs como los SSTs han sido el foco de la academia y la industria en los últimos años. Un ejemplo básico de su implementación se muestra en la figura 1.5. Tal y como se puede ver, se trata de un sistema multi-puerto donde no sólo interconectan las redes de media y baja tensión sino que también es posible integrar el uso de diferentes fuentes de dc accesibles en los puntos de conexión intermedios.

Desde su aparición como solución novedosa siendo alternativa de otros sistemas que son tradicionalmente pasivos, los SSTs han presentado diferentes estructuras y aplicaciones [5, 6, 7, 8] siendo los sistemas de tracción a principios de los años 90 su primera

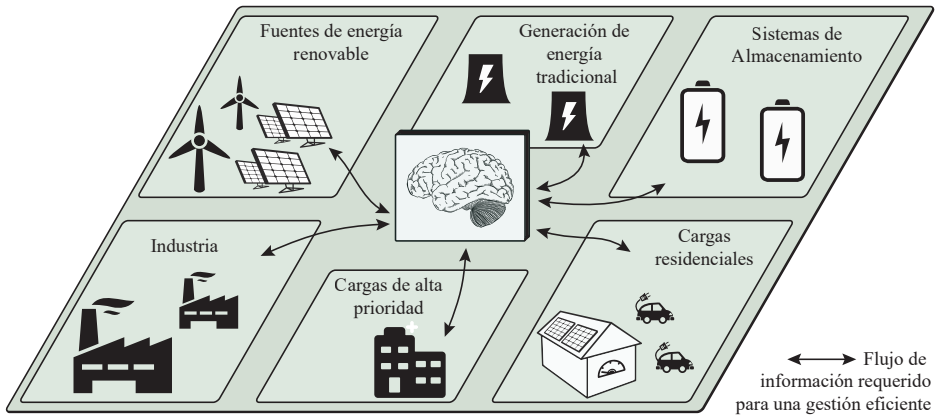


Figura 1.4 Concepto de red eléctrica inteligente (Smart Grid).

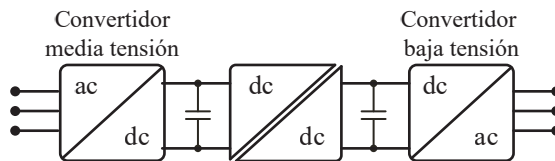


Figura 1.5 Concepto básico de transformador inteligente.

aplicación real. Tanto los STs como los SSTs están llamados a sustituir a los transformadores tradicionales por diversos motivos, entre los que se encuentran una reducción drástica de su volumen y peso con una más que notable mejora en su densidad de potencia y eficiencia [9, 10, 11]. Además, entre las capacidades de los STs y SSTs están el control independiente de sus entradas y salidas, así como sus flujos de potencia, permitiendo además la protección de las cargas conectadas de las perturbaciones de la red eléctrica y otros servicios auxiliares.

Como se puede ver en la figura 1.5, el ST es un actor principal en el desarrollo del concepto de SG [12, 13]. El ST permite la mejora en la potencia instantánea demandada considerando el balanceo de energía y por lo tanto, su coste de producción. Además, los STs habilitan nuevos servicios auxiliares garantizando una alta eficiencia y fiabilidad [14]. Definitivamente, en una completa analogía con los routers de comunicaciones, se puede decir que el ST juega el papel de un router energético en la red eléctrica, ya que permite optimizar el flujo de energía en función de los datos recibidos desde las cargas conectadas y los operadores de la propia red de distribución.

Dentro del marco del desarrollo de las SG y la integración de energías renovables, las nuevas aplicaciones requieren nuevas estructuras de convertidores de potencia así como, en muchas ocasiones, nuevas estrategias de control y de modulación [15, 16]. Los convertidores electrónicos de potencia avanzados se han convertido en la pieza clave para

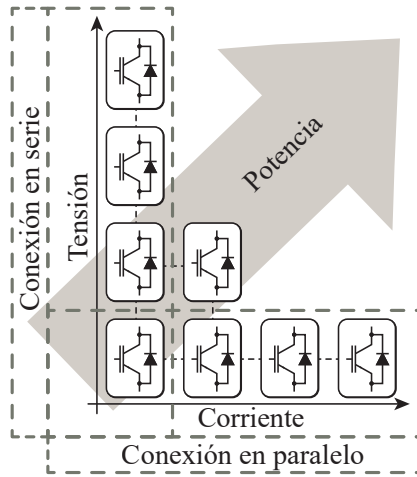


Figura 1.6 Construcción de un convertidor de potencia modular.

satisfacer los continuos, y cada vez más complejos, requerimientos en términos de calidad de energía y potencia nominal. Bajo esta premisa, los sistemas de conversión de potencia requieren un alto rendimiento, además de robustez, eficiencia y tolerancia a fallos.

Entre las soluciones propuestas por la industria, una muy popular para lograr estos requisitos es diseñar el convertidor de potencia como una estructura modular que funcione como una única unidad (mas compleja) de potencia. En la figura 1.6 se ilustran mediante un diagrama de bloques básico las propiedades de los sistemas modulares, donde cada uno de los módulos independientes gestiona una fracción de la potencia nominal total.

Este método para construir convertidores de potencia presenta una alta modularidad (como es evidente), con una capacidad natural de tolerancia a fallos permitiendo una mejora en la fiabilidad del sistema completo ya que permite continuar con su operación (aunque sea a una potencia nominal inferior) mientras se toman las acciones necesarias para restablecer el servicio [17]. Además, existe toda una serie de ventajas e inconvenientes de los sistemas modulares los cuales se han reflejado en la figura 1.7.

En la figura 1.8 se muestran algunos ejemplos de aplicaciones donde el convertidor de potencia modular se ha establecido como una de las opciones preferidas por la industria.

Como se ha mencionado anteriormente, la tolerancia a fallos y la fiabilidad de los convertidores de potencia son dos capacidades muy importantes ya que es posible extender el tiempo de operación del convertidor incluso si ocurre un fallo. Este hecho permite mantener los costes de operación y mantenimiento dentro de unos límites. A modo de ejemplo, en la figura 1.9a se muestra el porcentaje de fallos de cada uno de los componentes que componen un sistema solar fotovoltaico. Como se puede observar, el convertidor de potencia conectado a la red, seguido de los propios paneles fotovoltaicos, se postula como el principal responsable en caso de que se presente un fallo en el sistema de potencia. Por

Propiedades de los convertidores de potencia modulares

- ✓ Tolerancia a fallos inherente.
- ✓ Formas de onda con mayor calidad.
- ✓ Filtros de salida reducidos para el caso de convertidores serie.
- ✓ Coste de mantenimiento reducidos por la reposición de los módulos.
- ✓ Diseño estandar de los módulos de potencia.
- ✓ Reducción en los costes de fabricación debido al uso de los módulos estandarizados.
- ✗ Necesita una alta inversión inicial y presenta un mayor coste de operación.
- ✗ Diseño de hardware/software más complejo.
- ✗ Mayor número de sensores así como dispositivos de potencia.
- ✗ Mayor volumen en comparación a los convertidores tradicionales.

Figura 1.7 Ventajas e inconvenientes de los sistemas modulares.

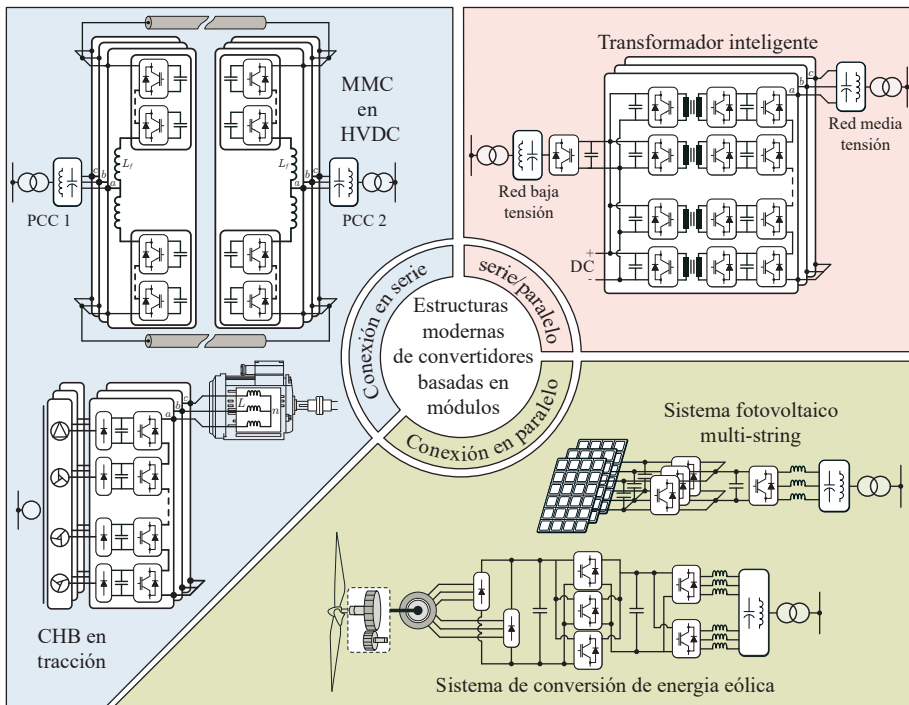


Figura 1.8 Ejemplos de convertidores con estructura modular (MMC:Convertidor Modular Multinivel, HVDC:Transmisión dc en alta tensión, CHB:Convertidor Multinivel en Cascada, PCC:Punto de conexión común).

otro lado, en la figura 1.9b se muestra cómo se distribuye el coste de mantenimiento para cada uno de los mismos. En conclusión, mientras que el segundo principal responsable de fallos sólo requiere un 6 % del presupuesto destinado al mantenimiento, el convertidor de potencia conectado a la red eléctrica es el responsable de un 37 % de los eventos de mantenimiento y supone un 59 % del presupuesto destinado al mismo.

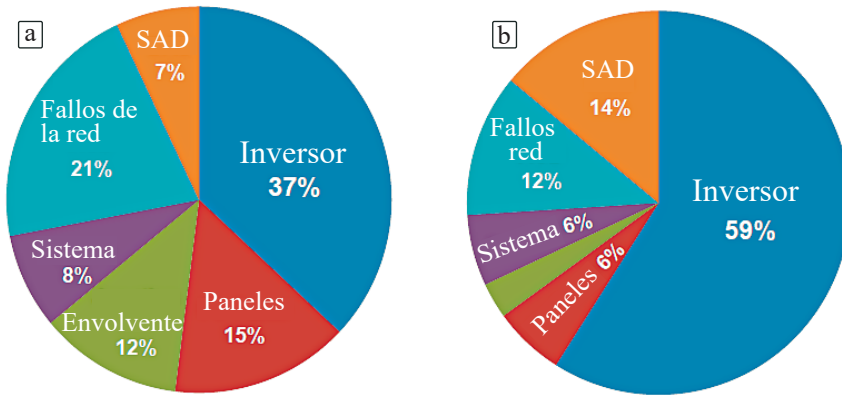


Figura 1.9 Distribución de los eventos de mantenimiento en un sistema sin supervisión para un sistema fotovoltaico (SAD: Sistemas de adquisición de datos). a) Eventos b) Coste de mantenimiento.

El coste de mantenimiento en el caso de los paneles fotovoltaicos es muy bajo (aunque evidentemente disminuye a lo largo de la operación del sistema) siendo un elemento no crítico de una instalación fotovoltaica. A menos que algún accidente fatal rompa un panel y necesite su sustitución, las acciones de mantenimiento requeridas no suponen más que una limpieza periódica (el polvo y suciedad acumulados deteriora mucho el rendimiento de los paneles) y una inspección visual de los mismos. Así, la vida útil de los paneles es coincide con la de la instalación del sistema de potencia. Por el contrario, existen múltiples causas por las que un convertidor de potencia puede fallar. En la figura 1.10 se presenta un diagrama con la distribución de los fallos más comunes que presenta un convertidor de potencia en la aplicación fotovoltaica [18]. Como se puede ver, sólo considerando los dispositivos de potencia y los condensadores, la tasa de fallos acumulada resulta ser más del 50% de los eventos de fallos en un convertidor. Por lo tanto es necesario tomar algunas acciones sobre la vida útil de los mismos.

Durante la operación del sistema de potencia, los dispositivos que componen el convertidor pueden operar bajo situaciones de bastante estrés que pueden hacer que dichos dispositivos superen sus límites físicos provocando su destrucción. Entre estos fenómenos, se puede destacar el estrés térmico provocado por grandes fluctuaciones en la temperatura de funcionamiento, la disipación de grandes cantidades de energía debido a las pérdidas de potencia o, tensiones y corrientes superiores a las máximas recomendadas por el fabricante durante algún estado transitorio. En consecuencia, el convertidor de potencia puede destruirse o quedar dañado, teniéndose que detener su funcionamiento.

Como se ha descrito anteriormente, los dispositivos de potencia y los condensadores son los dos elementos más sensibles de todo el sistema de conversión de potencia. El estrés térmico inducido en los dispositivos electrónicos de potencia es una de las causas más importantes en los fallos asociados al dispositivo por envejecimiento. En particular, este envejecimiento depende de la temperatura interna de funcionamiento (que depende en

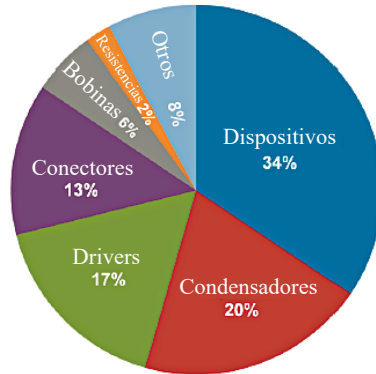


Figura 1.10 Distribución de los eventos de fallo entre los distintos componentes de un convertidor de potencia.

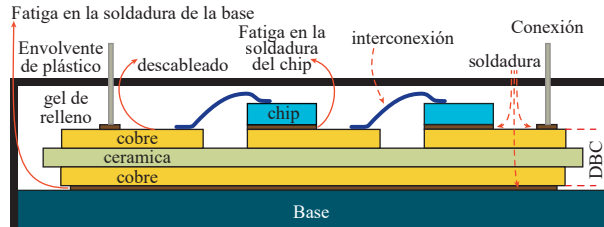


Figura 1.11 Distintos elementos dentro de un dispositivo de potencia.

gran medida de la temperatura ambiente y del diseño de la refrigeración del convertidor) y de los ciclos térmicos que sufre el dispositivo. El principal motivo del envejecimiento viene dado por la fatiga mecánica que se crea en las uniones de soldadura debido a la repetición de dichos ciclos térmicos. Esta fatiga mecánica consiste en la contracción y expansión de los materiales debido a los cambios de temperatura y tiene como resultado la desoldadura de parte de los componentes del dispositivo de potencia (ver la figura 1.11), ó la aparición de grietas microscópicas en el propio semiconductor. Ambos efectos se muestran en la figura 1.12 resultado de la observación bajo microscopio electrónico. Como consecuencia, la resistencia térmica dentro de los dispositivos aumenta, afectando negativamente a la temperatura interna y a las pérdidas. Por otro lado, si la temperatura y las pérdidas aumentan, la fatiga mecánica que interviene en el proceso de envejecimiento se incrementa. Esta circunstancia se desarrolla de manera cíclica y el envejecimiento crece de una manera exponencial [19, 20, 21].

La vida útil restante de un dispositivo de potencia es una figura de mérito muy importante porque permite planificar de una manera muy eficiente las labores de mantenimiento, reduciendo en gran medida los costes de mantenimiento y operación asociados. De esta forma, los fabricantes de dichos dispositivos están centrando sus esfuerzos en el estudio de modelos predictivos de la vida útil restante como una función acumulativa de ciclos

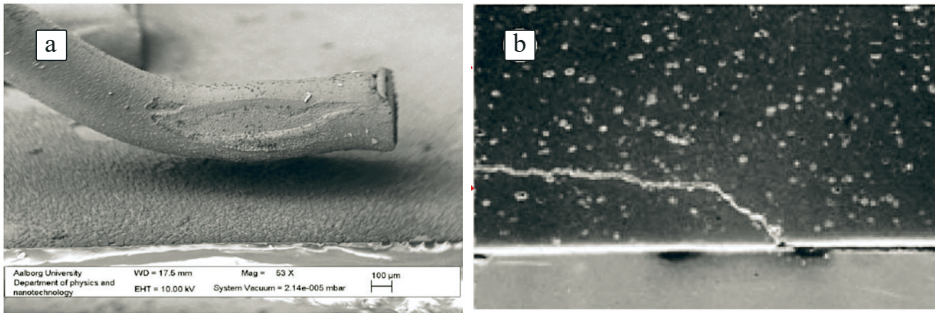


Figura 1.12 Procesos físicos de rotura de los dispositivos de potencia. a) Desoldadura b) Rotura del semiconductor.

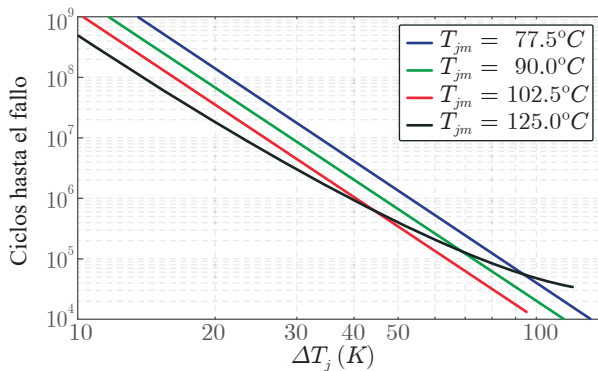


Figura 1.13 Ejemplo del número de ciclos térmicos que un dispositivo de potencia puede soportar de manera ideal en función de la amplitud del propio ciclo térmico.

térmicos [22, 23]. A modo de ejemplo, en la figura 1.13 se presenta el número de ciclos térmicos que un dispositivo de potencia puede soportar en función de la amplitud del ciclo térmico así como la temperatura presente en el interior del dispositivo.

Por otro lado, los condensadores presentes en los convertidores de potencia sufren unos procesos de envejecimiento de diferente naturaleza. En general, los procesos de envejecimiento sufridos por el condensador, a grandes rasgos, dependen tanto de la tensión del condensador como de la temperatura interna de operación (que está determinada por las pérdidas óhmicas producidas por el efecto Joule). Así, la temperatura interna depende de las pérdidas resultantes debidas a la corriente que atraviesa al dispositivo y la resistencia parásita equivalente (cuya presencia es inevitable e inherente al proceso de fabricación, pudiendo consultarse en la figura 1.14). Esta resistencia parásita depende además de la frecuencia de funcionamiento como se puede observar en la figura 1.15.

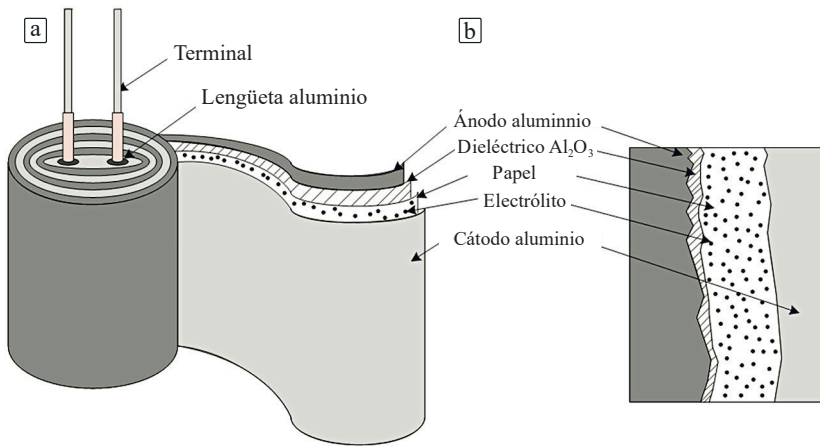


Figura 1.14 Diagrama básico de la construcción de un condensador electrolítico. Fuentes de resistencias parásitas.

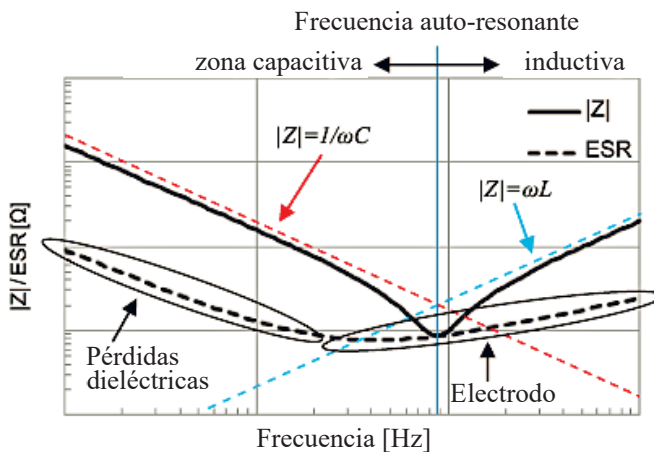


Figura 1.15 Dependencia de la ESR en función de la frecuencia de funcionamiento.

1.2 Convertidor de potencia modular basado en la conexión serie

El uso de la conexión de módulos en serie es una técnica muy adecuada para construir convertidores de potencia modulares que necesitan alcanzar altas tensiones (alterna como continua). Esta técnica es muy popular en la academia y la industria habiendo experimentado un gran desarrollo en las últimas décadas. Estos convertidores modulares presentan una tensión de salida multinivel de una altísima calidad, muy adecuada para una gran

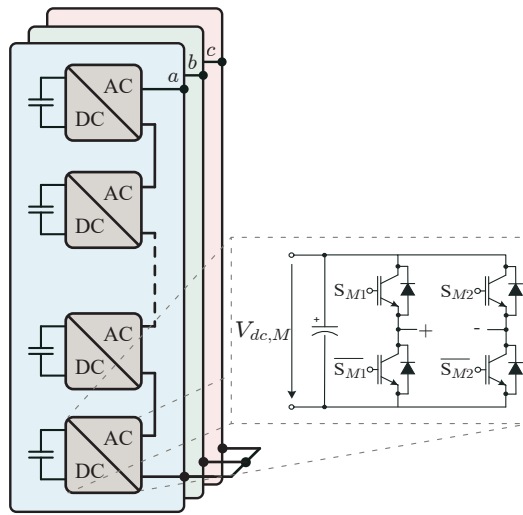


Figura 1.16 Convertidor trifásico multinivel en cascada con conexión serie de M celdas.

variedad de aplicaciones como pueden ser: accionamiento de bombas y ventiladores, variadores de frecuencia, integración de energías renovables, entre otras muchas [16, 24].

No sólo los convertidores modulares producen una tensión de salida multinivel. Entre la familia de convertidores multinivel, las estructuras más populares (con estructura modular o no modular) son el convertidor neutral-point clamped (NPC), el convertidor flying capacitor (FC), el convertidor tipo T (tipo T), el puente en H en cascada (CHB) y el convertidor multinivel modular (MMC). Las estructuras multinivel NPC y tipo T se basan en el uso de diodos de enclavamiento que generan tres estados de tensión diferentes, $V_{dc}/2$, 0 y $-V_{dc}/2$. La estructura NPC es una tecnología muy madura adoptada por la industria desde hace décadas y fue propuesta por primera vez por Richard H. Baker [25]. Como alternativa al NPC, también es posible encontrar en la literatura la estructura NPC activa (A-NPC) que se muestra en la figura 1.17b. El convertidor A-NPC propone la sustitución de diodos de enclavamiento por sendos semiconductores activos para equalizar las pérdidas en los diferentes componentes del convertidor de potencia. Por otro lado, el convertidor de potencia tipo-T usa la misma filosofía al sustituir los diodos por interruptores bidireccionales (RB-IGBT) que produce la misma estructura de tensión multinivel. Sin embargo, todas estas estructuras no hacen uso del paradigma de la construcción modular mediante conexión de módulos en serie.

Una de las estructuras de convertidor multinivel más conocidas es el convertidor cascada (CHB), que fue propuesto por McMurray en 1971 [7, 26], tal como se muestra en la figura 1.16. El convertidor tiene estructura modular, donde el módulo de potencia básico suele ser el puente completo (también conocido como puente H), sin embargo en la literatura especializada se pueden encontrar otras estructuras de módulos de potencia basados en las celdas NPC o tipo-T [27]. Estas estructuras básicas se muestran en la figura 1.17.

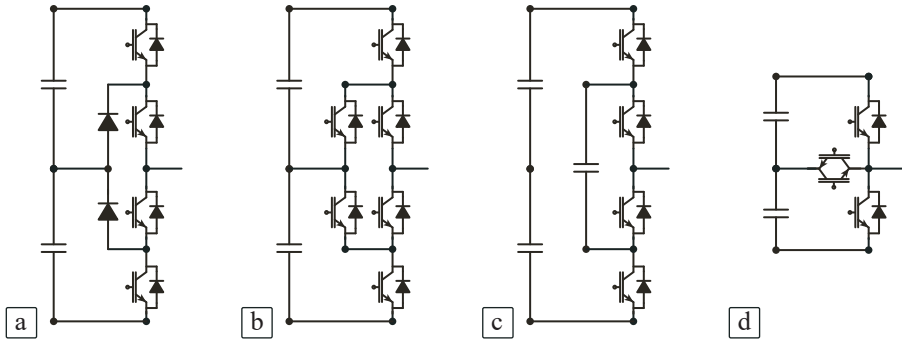


Figura 1.17 Módulos básicos basados en a) NPC b) A-NPC c) Condensador flotante (FC) d) Tipo-T.

La estructura CHB está compuesta por la conexión en serie de diferentes módulos de potencia basados en puentes H (también llamados puentes completos) con tensiones dc independientes. Esto es normalmente considerado como su mayor inconveniente y punto débil. Sin embargo, permite conectar en cada uno de los módulos de potencia una fuente de alimentación dc de diferente naturaleza. Estas características hacen que el convertidor CHB sea una solución muy flexible y adecuada para compensadores síncronos estáticos (STATCOM), filtros activos u otras aplicaciones donde se encuentran disponibles varias fuentes de dc [28, 29, 30, 31]. Por ejemplo, es posible utilizar arrays fotovoltaicos independientes [32, 33, 34, 35] o combinar las celdas con conexión con baterías ó super-condensadores para almacenar la energía sobrante [36, 37].

Desde el punto de vista de la modulación, cada módulo de potencia se opera mediante la conocida técnica de modulación unipolar y todo el convertidor de potencia suele operarse mediante la estrategia de modulación PWM con desplazamiento de fase (PS-PWM). Para una implementación correcta del método PS-PWM, es necesario que las señales portadoras de celdas consecutivas tengan un ángulo de desplazamiento entre ellas adecuado. Este ángulo de desplazamiento para un convertidor CHB operando cada módulo con PWM unipolar se define como:

$$\phi_k = \frac{180^\circ}{M} \quad (1.1)$$

donde M es el número de módulos conectados en serie.

Un convertidor CHB que es operado con PS-PWM presenta una equalización natural entre los módulos en términos de pérdidas de potencia y envejecimiento de los mismos, ya que cada uno de los módulos gestiona exactamente la misma porción de potencia. Además, debido al uso de la modulación PS-PWM existe un efecto multiplicativo en la frecuencia resultante de las tensiones y corrientes de salida.

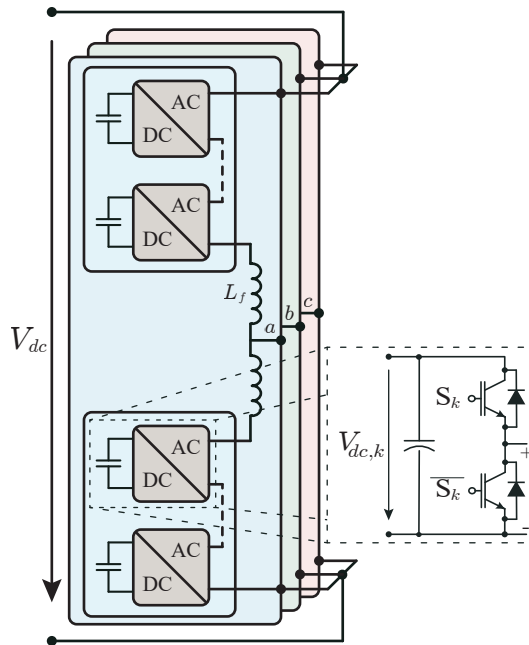


Figura 1.18 Convertidor trifásico tipo MMC.

Por otro lado, la estructura MMC se muestra en la figura 1.18. El convertidor MMC es relativamente reciente ya que fue ideado por Marquardt y Lesnicar a principios de los años 2000. La primera puesta en servicio de un convertidor MMC fue en el año 2010, hecho que destaca el gran interés de la academia y la industria en este tipo de estructuras [38, 39]. Como puede verse en la figura 1.18, la estructura MMC está compuesta por dos brazos conectados a través de dos inductancias por fase. Por otro lado, cada brazo está compuesto por docenas, o incluso cientos, de módulos de potencia conectados en serie que llevan a obtener una tensión dc muy alta. Esta estructura puede funcionar sin filtro de salida, lo que conduce a una reducción del precio total, del peso y el volumen del convertidor. Tradicionalmente, cada módulo de potencia básico se basa en una estructura de medio puente, pero de hecho, en la literatura especializada existen varias alternativas como el puente completo, condensador flotante, o incluso, estructuras NPC [40].

Los convertidores CHB y MMC utilizan la estructura de tipo modular para conseguir unos niveles de tensión a la salida muy altos consiguiendo además un gran número de niveles en la tensión de salida (por lo tanto, una excelente calidad de corrientes y tensiones de salida), una alta modularidad y una capacidad inherente de tolerancia a fallos gracias al uso de interruptores de bypass [24, 16]. Estas buenas características hacen que por ejemplo el convertidor CHB sea una de las estructuras más utilizadas para aplicaciones de media y alta tensión. De hecho, el convertidor CHB es muy popular en países donde la red de media tensión supera los 6,6kV, como es el caso de China por ejemplo.

Por otro lado, la estructura MMC es muy adecuada para los sistemas de transmisión de alta tensión (HVDC) presentes en la red eléctrica de distribución. Los convertidores HVDC son muy útiles para conexiones en tierra de larga distancia o bien integración submarina de sistemas de energía eólica offshore [41]. El convertidor MMC también es un buen candidato para interconectar dos redes eléctricas de diferentes frecuencias nominales (normalmente 50/60Hz) a través de su conexión dc. Por otro lado, la estructura MMC es muy adecuada para conectar una gran cantidad de sistemas usando los distintos puertos dc en cada módulo de potencia, ya sean baterías y/o super-condensadores directamente a la red eléctrica de media y alta tensión. Hay muchos proyectos activos para la instalación de sistemas HVDC en todo el mundo, donde algunos de los más relevantes se encuentran resumidos en la tabla 1.1.

Las estructuras CHB y MMC son dos candidatas perfectas para la conexión a la red eléctrica de media/alta tensión en la implementación del paradigma de ST. Como versión mejorada de un transformador, un ST puede transformar una tensión alterna de ciertas propiedades en otra tensión totalmente distinta (frecuencia y amplitud). De esta manera, una estructura CHB satisface los requisitos de modularidad, operación a baja/muy baja frecuencia, fiabilidad y tolerancia a fallos. Sin embargo, la tensión de los condensadores en cada módulo de potencia debe estar aislada. Esto añade cierta dificultad al problema pero puede ser fácilmente solventado sólo con introducir una etapa dc-dc aislada entre los módulos de potencia.

Por otro lado, la estructura MMC satisface todas las consideraciones anteriores y, además, permite la conexión directa en su bus de dc. La estructura MMC es más ventajosa que la estructura CHB porque no es necesario incluir convertidores dc-dc aislados. Como inconveniente, es justo mencionar que la estructura de control necesaria para operar un convertidor de potencia MMC es bastante más compleja que la usada para operar una estructura CHB. Esto se debe a los acoplamientos existentes entre las tensiones y corrientes de cada brazo. Además aparecen unas corrientes circulantes por el convertidor que reducen el rendimiento del mismo.

Tabla 1.1 Algunas de las instalaciones HVDC actuales más significativas.

Nombre	Tensión (kV)	Potencia (MW)	País/países
NSN Link	515	1400	Noruega-Reino Unido
Nemo Link	400	1000	Bélgica-Reino Unido
DolWin2	± 320	900	Alemania
DolWin3	± 320	900	Alemania
INELEF	± 320	2000	España-Francia

1.3 Convertidor de potencia modular basado en la conexión en paralelo

El uso de convertidores modulares con conexión en paralelo es muy conveniente en el caso de necesitar compartir la potencia nominal entre los módulos que componen el sistema, incrementando además la tolerancia a fallos y consiguiendo la reducción de los requisitos del filtro de salida (volumen, peso y coste).

El principio fundamental de funcionamiento de estos sistemas se basa en la técnica conocida como "entrelazado" (interleaving en inglés), bien conocida y ampliamente usada desde hace muchos años [42, 43, 44]. Entre las aplicaciones más habituales se encuentran las fuentes conmutadas de alimentación de baja potencia y la integración de energías renovables en la red eléctrica [45, 46].

La técnica de interleaving se puede comparar con el funcionamiento de un motor de combustión. Como es bien sabido, durante el ciclo completo que acciona al motor de combustión, la posición de cada uno de los pistones es diferente y nunca hay dos pistones trabajando en el mismo estado. Volviendo al campo eléctrico, la operación de interleaving es muy similar. Cuando se opera un convertidor de potencia, los módulos no funcionan de manera simultánea, mejorando el comportamiento del convertidor en diferentes aspectos, tales como por ejemplo la corriente resultante a la salida.

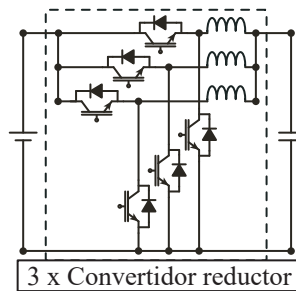


Figura 1.19 Estructura en interleaving para una fuente de alimentación basada en tres módulos reductores conectados en paralelo.

En las fuentes de alimentación, la principal ventaja proporcionada por el uso de convertidores de potencia operados en interleaving es la mejora de calidad que experimentan las tensiones y corrientes de salida reduciendo las oscilaciones así como la distorsión armónica, lo que conduce a una reducción del filtro de salida [47, 48, 49, 50]. Esta técnica permite utilizar componentes más pequeños (en términos de capacidad e inductancia) con una frecuencia de conmutación resultante muy alta, aumentando el rendimiento global y optimizando el diseño en términos de volumen y peso. Un ejemplo se muestra en la figura 1.19, donde la fuente de alimentación está formada por tres convertidores re-

ductores que trabajan en paralelo logrando un rizado de tensión de salida muy reducida gracias al funcionamiento en interleaving de los módulos de potencia.

En el caso de la integración de energías renovables, la operación basada en el concepto de interleaving se utiliza principalmente para conseguir un reparto de potencia ecualizado entre los módulos de potencia que conforman el convertidor. Por ejemplo, en el caso de los sistemas de energía eólica, algunas soluciones comerciales presentan un sistema de conversión de energía con múltiples convertidores dc-dc elevadores con conexión en paralelo de entrada y salida. En este esquema, la tensión dc rectificada a través del puente de diodos a partir de los polos de la máquina síncrona se aumenta hasta los 700V mediante el uso de varios convertidores elevadores en interleaving. El concepto modular también se puede observar en el uso de los dos inversores (VSI) de dos niveles conectados en paralelo a la red eléctrica. De esta forma, el dimensionamiento de los módulos de potencia es más sencillo ya que permite usar dispositivos de potencia con unos requisitos de corriente máxima más reducidos. Este sistema de conversión de energía eólica se muestra en la figura 1.20 y es la solución comercial del aerogenerador Vensys 60/1200 [51].

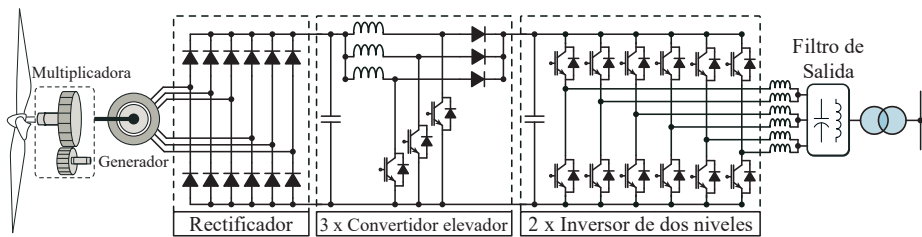


Figura 1.20 Sistema de conversión de potencia en interleaving para la integración de un sistema de energía eólica.

Por otro lado, la estructura usada en una aplicación de integración solar fotovoltaica compuesta por múltiples arrays de paneles fotovoltaicos independientes se presenta en la figura 1.21 [29, 52, 53]. En esta estructura, los paneles fotovoltaicos están conectados a un bus de tensión continua común a través de diferentes convertidores de potencia elevadores. Cada convertidor elevador tiene como objetivo alcanzar la tensión que hace que la potencia extraída del panel fotovoltaico sea la máxima (gracias a aplicar algoritmos maximum power point tracking ó MPPT). De esta manera, se maximiza la potencia extraída del conjunto completo de paneles fotovoltaicos mediante una estrategia MPPT distribuida. Como contrapartida a esta solución, se aumenta el número de convertidores necesarios en el sistema y por lo tanto el coste del mismo.

En la figura 1.22 se muestra una alternativa de la aplicación anterior que se basa en el uso de convertidores dc-dc aislados tipo flyback. Esta estructura se usa ampliamente en la aplicación fotovoltaica residencial (por ejemplo en las azoteas de edificios) ya que esta estructura evita el uso de un transformador de baja frecuencia tradicional para aislar el sistema de la red eléctrica. Estos transformadores suelen ser pesados y voluminosos. En este

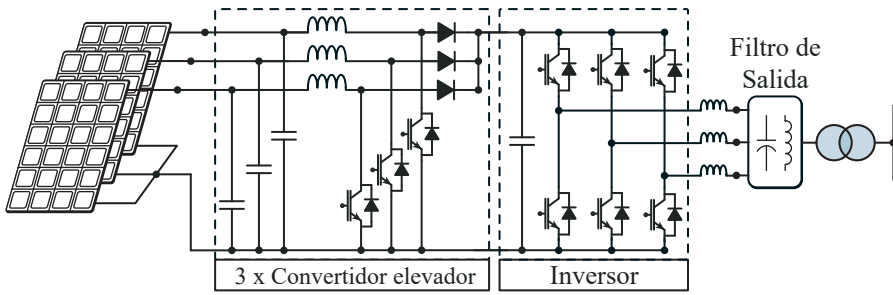


Figura 1.21 Esquema de conversión de potencia para una estructura multi-string fotovoltaica con tres módulos en interleaving.

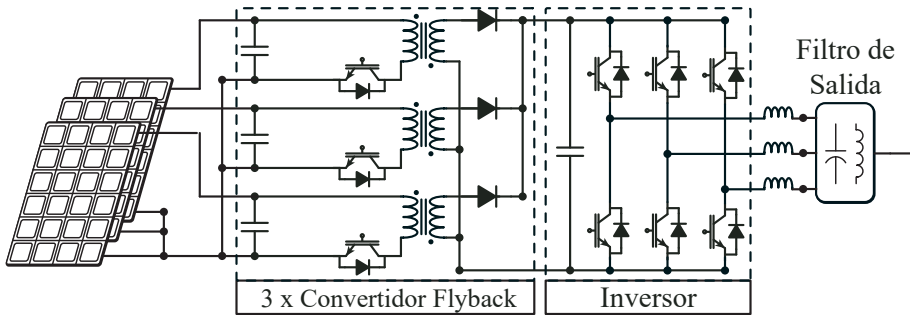


Figura 1.22 Estructura de convertidor de potencia tipo multi-string para sistemas fotovoltaicos integrado por tres convertidores tipo flyback operando en interleaving.

caso el aislamiento viene de la mano de transformadores de alta frecuencia (normalmente más pequeños y de perfil bajo) situados en cada uno de los convertidores flyback.

Otra alternativa interesante para la aplicación residencial en azoteas es el uso de módulos de potencia basados en el puente activo unidireccional que se muestra en la figura 1.23. Esta estructura, además de proporcionar aislamiento galvánico, permite controlar la corriente a través del transformador de una manera más precisa mientras que el diseño del transformador requiere un menor esfuerzo.

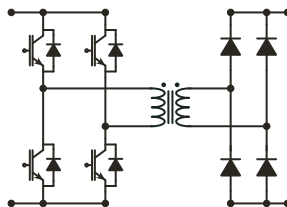


Figura 1.23 Módulo de potencia basado en un puente H con aislamiento galvánico.