

Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas

Facultad de Ingeniería Eléctrica

Departamento de Automática y Sistemas Computacionales



TRABAJO DE DIPLOMA

Escriba aquí el Título de la Tesis

(Debe reflejar el contenido del trabajo, ser preciso y corto)

Autor: Escriba aquí el Nombre y Apellidos del Autor

Tutor: Escriba aquí el Grado, Nombre y Apellidos del Tutor

Santa Clara

Escriba aquí el Año de la defensa

"Escriba aquí el nombre del año de la defensa"

Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas

Facultad de Ingeniería Eléctrica

Departamento de Automática y Sistemas Computacionales



TRABAJO DE DIPLOMA

“Inversores Multinivel para Sistemas

Fotovoltaicos de energía”

Autor: *Oscar Ramírez Pardo*

Tutor: *MSc. Ing. Lesyani León Viltre*

Dpto. de Electrónica de Potencia

Facultad de Ingeniería Eléctrica. UCLV

E-mail: Lesyani@fie.uclv.edu.cu

Santa Clara

Curso 2006-2007

“Año 49 de la Revolución ”



Hago constar que el presente trabajo de diploma fue realizado en la Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas como parte de la culminación de estudios de la especialidad de Ingeniería en Automática, autorizando a que el mismo sea utilizado por la Institución, para los fines que estime conveniente, tanto de forma parcial como total y que además no podrá ser presentado en eventos, ni publicados sin autorización de la Universidad.

Firma del Autor

Los abajo firmantes certificamos que el presente trabajo ha sido realizado según acuerdo de la dirección de nuestro centro y el mismo cumple con los requisitos que debe tener un trabajo de esta envergadura referido a la temática señalada.

Firma del Autor

Firma del Jefe de Departamento
donde se defiende el trabajo

Firma del Responsable de
Información Científico-Técnica

PENSAMIENTO

“El conocimiento es poder. La información es libertadora. La educación es la premisa del progreso, en toda sociedad y en toda familia. “

Kofi Annan

DEDICATORIA

- Quiero dedicar este Trabajo de Diploma primeramente a mis dos abuelas Cecilia Báez que está presente físicamente con nosotros y a la memoria de Delia Larios que estoy seguro que estaría orgullosa de mis méritos alcanzados.
- Es muy especial la oportunidad de dedicarle mis sacrificios de la elaboración de mi trabajo a mis padres, gracias a ellos he podido llegar a la cima de mis estudios.

AGRADECIMIENTOS

- Quisiera agradecerle a mi tutora Lesyani por la gran ayuda que me ha brindado..
- A todos los profesores que de una forma u otra me ayudaron les agradezco infinitamente.
- A mis padres y por el apoyo y confianza que han depositado en mí a lo largo de estos años.
- A mi novia Deimis que me ayudó incansablemente a la realización de este trabajo y a mi formación como estudiante.
- A mis familiares que siempre estuvieron al tanto de mis estudios.
- A mis tíos que están presente y a los que no pudieron estar hoy, le agradezco por su apoyo, ellos también forman parte de mi vida como estudiante, sin ellos no hubiese llegado aquí.
- Le doy gracias a Dios por guiarme por un buen camino.
- Aprovecho la oportunidad para agradecerle también a mis compañeros de aula, por su ayuda incansable.
- A mis amigos y amigas, especialmente a todos los que estaban a mi lado, gracias por hacerme saber que siempre han estado allí.

TAREA TÉCNICA

1. La revisión del estado del arte sobre los inversores utilizados en la actualidad en los sistemas fotovoltaicos de energía.
2. El estudio de las diferentes configuraciones de inversores multinivel
3. El estudio de las estrategias de conmutación que se utilizan actualmente en los inversores multinivel.
4. La simulación de un inversores de dos, tres y cinco niveles para analizar el contenido de armónicos que aparece en la señal de salida, utilizando diferentes estrategias de conmutación

Firma del Autor

Firma del Tutor

RESUMEN

En este trabajo se presenta una panorámica general sobre las diferentes estrategias de conmutación que se utilizan, en la actualidad, en inversores multinivel, teniendo en cuenta la actual tendencia a la utilización de estos convertidores en los sistemas de potencia media, esencialmente en los sistemas fotovoltaicos de energía con conexión directa al sistema eléctrico.

En este estudio, se analizan las diferentes topologías en que se pueden presentar estos inversores y se realiza una comparación entre las diferentes estrategias de conmutación que se emplean en ellos.

Para analizar el contenido de armónico que aparecen en las señales de salida de las diferentes configuraciones de inversores multinivel, utilizando diferentes estrategias de conmutación, se realizaron, utilizando el MATLAB, simulaciones de un inversor monofásico de dos, tres y cinco niveles.

TABLA DE CONTENIDOS

PENSAMIENTO	i
DEDICATORIA	ii
AGRADECIMIENTOS	iii
TAREA TÉCNICA	iv
RESUMEN	v
INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO 1. Introducción a la tecnología fotovoltaica.....	3
1.1 Introducción.....	3
1.1.1 El efecto fotovoltaico.....	4
1.1.2 Ventajas e inconvenientes de las instalaciones fotovoltaicas	5
1.2 Desarrollo de la energía solar fotovoltaica.....	7
1.2.1 Desarrollo de la energía solar fotovoltaica en Cuba.....	7
1.3 Aplicación de la energía solar fotovoltaica en instalaciones conectadas a la red eléctrica.....	9
1.3.1 Introducción a los sistemas conectados a la red eléctrica.....	12
1.3.2 Aplicación de los sistemas conectados a la red eléctrica.....	14
1.4 El inversor como parte integrante de un sistema fotovoltaico conectado a la red eléctrica.....	14
1.4.1 Situación actual de inversores fotovoltaicos.....	15
CAPÍTULO 2. Estado de la técnica en inversores multinivel.....	17
2.1 Introducción a los convertidores multinivel.....	17
2.2 Topologías básicas de convertidores multinivel.....	18
2.2.1 Convertidor Diodo- Clamped	18
2.2.2 Convertidor CC/CA Flying-Capacitor de tres niveles.....	26

2.2.3	Convertidor CC/CA Cascaded Full-Bridge	29
2.2.4	Comparación entre topologías.	32
2.3	Estrategias de conmutación multinivel.	34
2.3.1	Modulación en escalera..	35
2.3.2	Cancelación selectiva de armónicos.	36
2.3.3	Modulation PWM senoidal.....	37
2.3.4	Modulación vectorial.	38
2.3.5	Otras técnicas de modulación.	41
CAPÍTULO 3. Simulación de inversores multinivel.....		42
3.1	Modelos en MATLAB/Simulink.	43
3.1.1	Bloques de control del inversor.	43
3.1.1.1	Modulación senoidal del ancho del pulso.	43
3.2	Comparación de las técnicas de modulación estudiadas.	54
CONCLUSIONES.....		57
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS		58

INTRODUCCIÓN

Desde la aparición del primer dispositivo semiconductor, la evolución de la electrónica se ha convertido en una realidad incuestionable. El impacto de esta evolución en la actividad humana, tanto en el ámbito industrial como en el comercial es enorme. Es una evidencia que el desarrollo de los equipos electrónicos ha cambiado de forma significativa los hábitos de conducta de las personas y ha mejorado sustancialmente la calidad y las prestaciones de los equipos.

En particular, dentro de la electrónica en general, en los últimos años, la electrónica de potencia se ha convertido en una de las áreas más activas y de evolución más limpia. Un campo muy activo de estudio, es aquel cuya finalidad es conseguir que los equipos electrónicos introduzcan el mínimo contenido armónico en la red. Por otro lado, la creciente preocupación social por el uso de combustibles fósiles, por la eficiencia en el empleo de los recursos y por el medio ambiente, ha propiciado un mayor interés y exigencia en que los sistemas incrementen su rendimiento y en el empleo de energías renovables. En consecuencia, otro campo de trabajo se halla en la conexión eficiente de energías renovables a la red eléctrica.

Los sistemas fotovoltaicos de energía, conectados a la red eléctrica, han ido ganando cada vez más espacio, en la medida en que la demanda de energía ante el actual ritmo de consumo mundial se va incrementando; por lo que resulta de gran interés el óptimo aprovechamiento de estas instalaciones como sistemas eficientes en la conversión de energía.

Entre las partes fundamentales de este sistema están: las celdas fotovoltaicas, el regulador, el conjunto de acumulación de energía, el inversor fotovoltaico de conexión a red eléctrica, las protecciones eléctricas y la red eléctrica.

Una parte vital de este sistema lo constituye el inversor, por lo que en la actualidad las principales investigaciones en este campo se centran en lograr inversores de menor tamaño, mayor potencia y mejor calidad en las señales de alterna que se obtienen a su salida.

El objetivo del presente trabajo es realizar un estudio sobre las diferentes estrategias de conmutación que se utilizan, en la actualidad, en inversores multinivel, teniendo en cuenta el auge que está tomando el empleo de este tipo de inversores, en sistemas fotovoltaicos de energía conectados a la red eléctrica.

Para darle solución al objetivo planteado nos propusimos las tareas siguientes:

1. La revisión del estado del arte sobre los inversores utilizados en la actualidad en los sistemas fotovoltaicos de energía.
2. El estudio de las diferentes configuraciones de inversores multinivel
3. El estudio de las estrategias de conmutación que se utilizan actualmente en los inversores multinivel.
4. La simulación de un inversores de dos, tres y cinco niveles para analizar el contenido de armónicos que aparece en la señal de salida, utilizando diferentes estrategias de conmutación.

El trabajo está estructurado de manera tal, que en el capítulo I se da una panorámica sobre los sistemas fotovoltaicos de energía conectados a la red eléctrica y su utilización en Cuba. De tal modo, se realiza en capítulo II un análisis del funcionamiento de las configuraciones básicas de inversores multinivel y de las estrategias de conmutación que se utilizan en la actualidad en este tipo de inversores. Por último en el capítulo III, se muestran los resultados de las simulaciones realizadas para varios inversores multinivel, utilizando diferentes estrategias de conmutación, así como un análisis de los mismos; enfatizando en la forma y el contenido armónico obtenidos en las señales de salida.

En la parte final del trabajo se proponen un conjunto de conclusiones útiles que resultan de gran interés para la realización de posteriores estudios enmarcados en el tema.

El aporte fundamental de este trabajo, además de la comparación entre las diferentes estrategias de conmutación que se utilizan en la actualidad en inversores multinivel, resulta las simulaciones de los inversores de dos, tres y cinco niveles, ante diferentes estrategias de conmutación que permite un análisis detallado del contenido de armónico de los mismos y que pudieran utilizarse en estudios futuros de este tipo de inversores.

CAPÍTULO 1. Introducción a la tecnología fotovoltaica.

1.1 Introducción.

La evolución del ser humano viene asociado a grandes tecnologías las cuales requieren de la energía eléctrica para su desarrollo, esta energía se obtiene de los diferentes recursos energéticos que la naturaleza ha puesto a su disposición. Una de las diferentes formas de obtener energía es mediante el petróleo que se utiliza para mover grandes termoeléctricas las cuales desprenden gases a la atmósfera modificando dramáticamente el clima global, esto ha provocado grandes afectaciones en el clima por lo que el ser humano ha recurrido a otros recursos que no contaminen el medio ambiente. La energía solar fotovoltaica es una energía limpia y renovable, de fácil instalación y mantenimiento, con una larga vida útil y una alta fiabilidad. No obstante, se prevé un rápido y significativo crecimiento de su aportación energética debido a su actual desarrollo tecnológico y al compromiso medioambiental de los países desarrollados. Los índices de crecimiento anuales de la producción fotovoltaica mundial aumentaron desde el 15% hasta el 25 % siendo los sistemas fotovoltaicos conectados a red los que se han revelado como una de las aplicaciones mas prometedoras para abordar la producción de electricidad de origen solar. Estos están conformados por el panel de celdas fotovoltaicas, el regulador, el sistema de acumulación y el inversor o convertidor de CA/CC, tal como se muestra en la Figura 1.1.

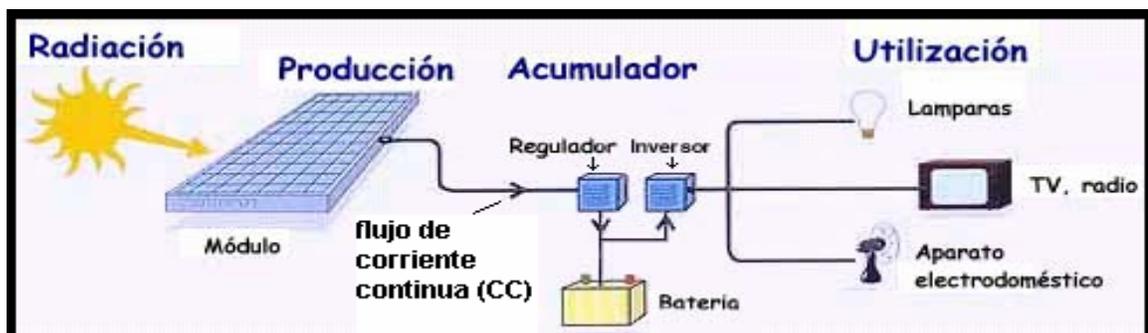


Figura 1.1 Esquema de una instalación solar fotovoltaica con inversor.

Un sistema fotovoltaico es un dispositivo que, a partir de la radiación solar, produce energía eléctrica en condiciones de ser aprovechada por el hombre. El sistema consta de los siguientes elementos:

- Un generador solar, compuesto por un conjunto de paneles fotovoltaicos, que captan la radiación luminosa procedente del sol y la transforman en corriente continua a baja tensión (12 ó 24 V).
- Un acumulador, que almacena la energía producida por el generador y permite disponer de corriente eléctrica fuera de las horas de luz o días nublados.
- Un regulador de carga, cuya misión es evitar sobrecargas o descargas excesivas al acumulador, que le produciría daños irreversibles; y asegurar que el sistema trabaje siempre en el punto de máxima eficiencia.
- Un inversor, que transforma la corriente continua de 12 ó 24 V almacenada en el acumulador, en corriente alterna [16].

1.1.1 El efecto fotovoltaico.

El efecto fotovoltaico (FV) es la base del proceso mediante el cual una célula FV convierte la luz solar en electricidad. La luz solar está compuesta por fotones, o partículas energéticas. Estos fotones son de diferentes energías, correspondientes a las diferentes longitudes de onda del espectro solar. Cuando los fotones inciden sobre una célula FV, pueden ser reflejados o absorbidos. Únicamente los fotones absorbidos generan electricidad. Cuando un fotón es absorbido, la energía del fotón se transfiere a un electrón de un átomo de la célula. Con esta nueva energía, el electrón es capaz de escapar de su posición normal asociada con un átomo para formar parte de una corriente en un circuito eléctrico. Las partes más importantes de la célula solar son las capas de semiconductores, ya que es donde se crea la corriente de electrones. Estos semiconductores son especialmente tratados para formar dos capas diferentemente dopadas (tipo p y tipo n) para formar un campo eléctrico, positivo en una parte y negativo en la otra. Cuando la luz solar incide en la célula se liberan electrones que pueden ser atrapados por el campo eléctrico, formando una corriente eléctrica. Es por ello que estas células se fabrican a partir de

materiales que actúan como aislantes a bajas temperaturas y como conductores cuando se aumenta la energía. Además de los semiconductores las células solares están formadas por una malla metálica superior u otro tipo de contacto para recolectar los electrones del semiconductor y transferirlos a la carga externa y un contacto posterior para completar el circuito eléctrico. También en la parte superior de la célula hay un vidrio u otro tipo de material encapsulante transparente para sellarla y protegerla de las condiciones ambientales, y una capa antireflexiva para aumentar el número de fotones absorbidos. Las células FV convierten pues, la energía de la luz en energía eléctrica. El rendimiento de conversión, esto es, la proporción de luz solar que la célula convierte en energía eléctrica, es fundamental en los dispositivos fotovoltaicos, ya que el aumento del rendimiento hace de la energía solar FV una energía más competitiva con otras fuentes. Estas células, conectadas unas con otras, encapsuladas y montadas sobre una estructura soporte o marco, conforman un módulo fotovoltaico. Los módulos están diseñados para suministrar electricidad a un determinado voltaje (normalmente 12 ó 24 V). La corriente producida depende del nivel de insolación. La estructura del módulo protege a las células del medioambiente y son muy durables y fiables. Aunque un módulo puede ser suficiente para muchas aplicaciones, dos o más módulos pueden ser conectados para formar un generador FV. Los generadores o módulos fotovoltaicos producen corriente continua y pueden ser conectados en serie y/o paralelo para producir cualquier combinación de corriente y tensión [17] [13].

1.1.2 Ventajas e inconvenientes de las instalaciones fotovoltaicas

Las **ventajas** de la energía solar fotovoltaica son numerosas:

- En primer lugar, son sistemas silenciosos, limpios y suponen un gran ahorro en el traslado de energía, puesto que se encuentran cerca del punto de consumo.
- Cuando se trata de centrales fotovoltaicas, se requiere poco tiempo para su construcción, cerca de las localidades a las que tiene que suministrar energía.

- En el caso de los paneles fotovoltaicos instalados en las viviendas, éstos requieren un mínimo mantenimiento ofreciendo un gran periodo de vida útil, con lo que se amortiza en un breve periodo de tiempo.
- Los generadores de energía pueden ser instalados de una forma distribuida en la cual, los edificios ya construidos, pueden generar su propia energía de forma segura y silenciosa.
- No produce emisiones de CO₂ y otros gases contaminantes a la atmósfera.
- No contribuye a la formación de lluvia ácida.
- No requieren sofisticar las medidas de seguridad.
- No consume combustibles.
- Es inagotable.
- En definitiva, su uso ofrece un suministro de energía continuo y fiable sin tener que depender de las fuentes de energía convencional.

En cuanto a los **inconvenientes**:

- Las instalaciones fotovoltaicas tienen unas limitaciones que deben llevar a sus usuarios a la moderación en el consumo y al empleo de aparatos de consumo con elevados rendimientos, puesto que la tecnología disponible actualmente requiere de una gran superficie de captación.
- Produce un considerado impacto medioambiental a la vez que modifica considerablemente el ecosistema de la zona en su producción.
- No se puede almacenar de forma directa, siendo necesario realizar una transformación energética para convertir de corriente continua (CC) a corriente alterna.
- Su elevado coste [13].

1.2 Desarrollo de la energía solar fotovoltaica.

Ecologistas en Acción, han presentado una propuesta para el desarrollo de la energía solar fotovoltaica. La propuesta pretende impulsar el desarrollo de una de las fuentes energéticas más limpias. El Silicio utilizado en la fabricación de paneles solares, se precisa en un grado muy puro, obteniéndose a partir de un mineral, la cuarcita. Debido al enorme incremento en la producción de paneles solares (en torno al 40% anual en todo el mundo) existe una escasez de silicio. El crecimiento de la industria fotovoltaica es tal que si el año 2004 se precisaron 13000 t de Silicio, en el 2006 se necesitaron 21000 t y para el año 2020 se podrían llegar a necesitar 200000 t, por lo que se nota un crecimiento rápido de la energía solar [6]. El silicio es el elemento, tras el di oxígeno, más abundante y distribuido por nuestro planeta, pero no se encuentra aislado ni puro, sino combinado con di oxígeno, por ejemplo en cuarciración un 90% de óxido de silicio (SiO_2), y de la que se debe extraer el di oxígeno y las impurezas para obtener en una primera etapa, el silicio de grado metalúrgico con pureza del orden del 99%. Actualmente hay un fuerte impulso a la investigación aplicada, la creación y mantenimiento de miles de puestos de trabajo y el previsible desbloqueo de la industria fotovoltaica a nivel mundial aumenta por lo que se invierten sumas millonarias de dinero para su desarrollo [5].

1.2.1 Desarrollo de la energía fotovoltaica en Cuba.

Debido a su posición geográfica y rico capital humano, Cuba tiene suficiente potencial para impulsar durante los próximos años el uso gradual de la energía del Sol en un mayor número de instalaciones industriales, servicios y en el sector residencial.

Según [4], a lo largo y ancho de nuestro archipiélago hay suficiente radiación solar todos los meses, aun en los días nublados y lluviosos.

Actualmente, [4] está en marcha un programa dirigido a electrificar la totalidad de las viviendas ubicadas en zonas montañosas y de difícil acceso que aún no disponen de ese vital servicio, basado en el empleo de fuentes renovables, principalmente con energía solar fotovoltaica (producción directa de electricidad por medio de paneles solares).

Las aplicaciones fotovoltaicas, mediante paneles construidos por la Industria Electrónica, son utilizadas con mayor rentabilidad que las restantes fuentes convencionales, en particular en zonas lejanas donde no llegan las líneas del Sistema Electroenergético Nacional e incluso su uso se generaliza en el bombeo de agua.

De acuerdo con estudios, la energía solar es un elemento decisivo en el desarrollo sostenible porque en cada metro cuadrado del territorio cubano es recibido a diario una cantidad de radiación equivalente a medio kilogramo de petróleo combustible o cinco Kwh., un valor promedio casi invariable durante todo el año e igual en toda la Isla.

El Combinado de Componentes Electrónicos (CCE) de Pinar del Río ha establecido una asociación económica con una empresa alemana para la producción de celdas solares de silicio. Ya se producen paneles solares de diferentes medidas, que van desde 5 Wp hasta 65 Wp, se construyen en diferentes valores y contra demanda para aplicaciones específicas. En el momento actual toda la producción del centro está contratada y vendida.

En la investigación y desarrollo de las celdas solares se trabaja en el Instituto de Materiales y Reactivos para la Electrónica (IMRE) de la Universidad de La Habana y se tiene una tecnología propia para la fabricación de celdas solares de silicio monocristalino con 12 a 13 % de eficiencia de conversión, a partir de obleas de silicio importadas de grado solar; así, se ha preparado personal para esta actividad [8].

Entre los objetivos o metas a alcanzar a corto o mediano plazo, están:

1. Establecer una industria fotovoltaica nacional, desde la fabricación de la oblea de silicio hasta el módulo con una capacidad de producción anual de 1 MWp.
2. Desarrollar una tecnología propia que permita fabricar en el país celdas de silicio monocristalino a escala comercial, con una eficiencia no menor de 18 % y un costo de producción de 1,50 USD/Wp.
3. Tener instalados al finalizar el quinquenio 3 MWp de sistemas solares fotovoltaicos en sistemas autónomos y conectados al SEN [4].

El desarrollo de las fuentes renovables de energía siempre ha tenido un fuerte apoyo de varias instituciones del país, como la Asociación Nacional de Innovadores y Racionalizadores (ANIR), las Brigadas Técnicas Juveniles (BTJ) y el Forum Nacional de

Ciencia y Técnica. Esta rama de la economía contó, desde su inicio, con el impulso del Partido Comunista de Cuba, especialmente con el de su Departamento de Industrias y Energía [8].

1.3 Aplicación de la energía solar fotovoltaica en instalaciones conectadas a la red eléctrica.

Existen dos formas de utilizar la energía eléctrica generada a partir del efecto fotovoltaico. Primeramente encontramos instalaciones aisladas de la red eléctrica, que son sistemas en las que la energía generada se almacena en baterías para poder disponer de su uso cuando sea preciso. Estos sistemas se emplean sobre todo en aquellos lugares en los que no se tiene acceso a la red eléctrica y resulta más económico instalar un sistema fotovoltaico que tender una línea entre la red y el punto de consumo.

En segundo lugar, encontramos las instalaciones conectadas a la red eléctrica convencional, en las que toda la energía generada se envía a la red eléctrica convencional para su distribución donde sea demandada. Debido a que la instalación fotovoltaica objeto del presente trabajo corresponde a esta segunda tipología, en adelante se presentaran en detalle los sistemas conectados a la red eléctrica.

La Energía Solar Fotovoltaica permite múltiples y diversas aplicaciones. Esto es debido a que puede suministrar energía en tanto en emplazamientos aislados de la red convencional como mediante instalaciones conectadas a la red eléctrica.

Algunos ejemplos de instalaciones de energía solar fotovoltaica en emplazamientos aislados pueden ser:

Electrificación doméstica y servicios: viviendas aisladas, etc.

Aplicaciones agrícolas.

Aplicaciones en bombas de regadío.

Señalización, comunicación y aplicaciones específicas: faros, puestos de vigilancia forestal, cabinas telefónicas aisladas, etc. [7].

Las instalaciones conectadas a la red eléctrica pueden ser:

- De pequeño tamaño (instalaciones en viviendas individual)
- Centrales de gran tamaño

En las telecomunicaciones se han desarrollado paneles solares ver Figura 1.2

Se han desarrollado las señalizaciones marítimas ver Figura 1.3

Uso de las celdas fotovoltaicas en zonas rurales ver Figura 1.4



Figura 1.2 Telecomunicaciones y medición remota de señales.



Figura1.3 Señalizaciones marítimas.



Figura 1.4 Celdas fotovoltaicas en zonas rurales.

1.3.1 Introducción a los sistemas conectados a la red eléctrica.

Inicialmente, los sistemas fotovoltaicos de conexión a red se desarrollaron para centrales fotovoltaicas de gran tamaño. Ya que se pensó que podrían en un futuro resolver en algunas zonas ciertos problemas existentes en la generación y distribución de energía convencional. Tras examinar que dichas centrales trabajaban correctamente y, en la medida que avanzó el mercado de la electrónica se comenzaron a diseñar sistemas de menor envergadura. Sistemas más pequeños y manejables, con la finalidad de ser instalados a modo de pequeñas centrales domésticas. Sistemas solares totalmente adaptables a viviendas dotadas de acometida convencional de suministro eléctrico [14].

En la Figura 1.5 se muestra de forma sencilla la conexión de los sistemas a la red.

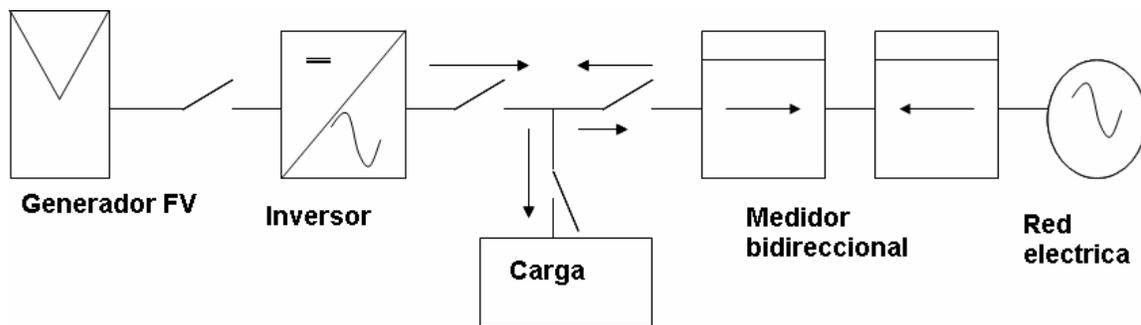


Figura 1.5 Sistemas conectados a la red.

Un “Sistema Conectado” implica que un sistema de potencia; conformado por un generador independiente y su carga asociada, cuenta también con una acometida de la red eléctrica

El funcionamiento de un sistema fotovoltaico de conexión a red es un tipo de instalación eléctrica en la que intervienen cinco elementos:

- La energía solar.
- Un grupo de módulos solares fotovoltaicos convenientemente conectados, y situados de tal manera que reciban la mayor cantidad de luz solar a lo largo del año.
- El inversor fotovoltaico de conexión a red eléctrica.

- Las protecciones eléctricas.
- La red eléctrica.

El principio de funcionamiento es sumamente sencillo:

- La energía solar cae sobre el generador fotovoltaico.
- Los módulos solares generan electricidad en corriente continua.
- La corriente continua, que suministra el generador solar fotovoltaico, pasa por las protecciones eléctricas y se entrega directamente al inversor. El control del inversor se encuentra conectado al generador solar y a la red.
- El inversor fotovoltaico de conexión a la red es el encargado de proporcionar corriente alterna senoidal, a partir de la energía en corriente continua entregada por los módulos solares fotovoltaicos. La energía que entrega este inversor se encuentra sincronizada con la existente en la red de abastecimiento.
- Dicha energía, si no se consume en el mismo sitio donde esté la instalación, es inyectada en frecuencia y fase a la línea de distribución eléctrica existente. De ésta forma queda disponible para otros consumidores.

Y el funcionamiento del sistema solar se realiza de forma completamente automática, tanto para su puesta en marcha como para su parada:

- Al amanecer, los dispositivos de control del sistema miden la potencia disponible en el generador fotovoltaico. Una vez alcanzado el nivel mínimo de funcionamiento, el inversor arranca y comienza la generación de corriente.
- Al anochecer, cuando se detecta un nivel de potencia del generador inferior al mínimo con el que puede funcionar, el equipo se desconecta hasta un nuevo amanecer.

La energía solar se capta a través de módulos fotovoltaicos y se incorpora a la red eléctrica tradicional. De esta forma, la energía solar fotovoltaica pasa a alimentar a la red eléctrica, aportándole una energía limpia lista para ser distribuida y consumida de la misma forma que la energía eléctrica [10].

1.3.2 Aplicación de los sistemas conectados a la red eléctrica.

Las principales aplicaciones de los sistemas fotovoltaicos conectados a la red eléctrica convencional son las siguientes:

- Sistemas sobreexpuestos en tejados de edificios o viviendas. Son sistemas modulares de fácil instalación donde se aprovecha la superficie de tejado existente para sobreponer los módulos fotovoltaicos. El peso de los paneles sobre el tejado no supone una sobrecarga para la mayoría de los tejados existentes.
- Plantas de producción. Son aplicaciones de carácter industrial que pueden instalarse en zonas rurales no aprovechadas para otros usos o sobrepuestas en grandes cubiertas de áreas urbanas (aparcamientos, zonas comerciales, áreas deportivas, etc...)
- Integración en edificios. Esta aplicación tiene como principal característica ser un sistema fotovoltaico integrado en la construcción, de modo que los paneles solares quedan tanto estructural como estéticamente integrados en la cubierta del edificio.

1.4 El inversor como parte integrante de un sistema fotovoltaico conectado a la red eléctrica.

Los inversores son dispositivos electrónicos, que basándose en tecnologías de potencia transforman la corriente continua (CC) en corriente alterna (CA), de la misma tensión y frecuencia de la red. De esta manera las instalaciones fotovoltaicas pueden operar en paralelo con la red eléctrica.

Los sistemas fotovoltaicos conectados a la red eléctrica constituyen una de las aplicaciones de la energía solar que más atención está recibiendo en los últimos años, dado su elevado potencial de utilización en zonas urbanizadas próximas a la red eléctrica. Estos sistemas están compuestos por un generador fotovoltaico que se encuentra conectado a la red eléctrica convencional a través de un inversor, produciéndose un intercambio energético entre el sistema fotovoltaico y la red, característico de este tipo de instalaciones. Así el sistema inyecta energía en la red cuando su producción supera al consumo local, y extrae energía de ella en caso contrario.

El inversor que forma parte del sistema fotovoltaico es necesario por dos razones esenciales:

- 1) El voltaje DC de niveles bajos generado por el módulo fotovoltaico debe ser convertido en su forma de onda a una señal AC, y elevado a un nivel adecuado admisible por los equipos consumidores, o equiparable con el de la red eléctrica en caso de acoplamiento a la misma
- 2) La potencia deliberada por el módulo es muy sensible al punto de operación, y el inversor debe incorporar por tanto otra importante prestación: Seguimiento del Punto de Máxima Potencia (SPMP).

1.4.1 Situación actual de inversores fotovoltaicos.

En un principio, se usaba un único inversor para realizar la conversión de todo el sistema, pero la tendencia giró hacia concepciones modulares, en las que pequeños inversores se conectan en serie hasta obtener la potencia deseada. Esta tendencia responde a la línea actual de conexión modular de paneles: al conectar grandes sistemas, la eficiencia total puede ser incrementada mediante el uso de pequeños inversores encadenados, evitando el desacoplamiento de los módulos y reduciendo el cableado en la parte de continua. Todo parece indicar que las tendencias futuras seguirán marcadas por este concepto modular, especialmente en el mercado de los sistemas fotovoltaicos integrados, gracias a que permite una fácil expansión del sistema, funcionamiento independiente y sencilla instalación. Otra nueva tendencia, en particular entre los inversores fotovoltaicos con tensiones altas de entrada, es la de prescindir de transformador en la entrada del convertidor. Los inversores sin transformador son ventajosos gracias a sus altas eficiencias, además de beneficios adicionales, como la reducción de costo, tamaño, peso y complejidad.

Los primeros inversores comercializados para aplicaciones solares fotovoltaicas de conexión a la red, eran inversores de dos niveles conmutados de línea. Posteriormente se usaron los inversores auto conmutados, que usaban modulación de ancho de pulso (PWM pulse wave modulation) e incluían transformadores de línea, o de alta frecuencia.

Tendencia actual en el campo de las energías renovables.

Actualmente los inversores tradicionales de dos niveles son los únicos fabricados para aplicaciones estrictamente fotovoltaicas. En el campo de las fuentes de energía distribuida, los inversores multinivel, en especial los de tres niveles, se han presentado como una buena solución de rendimiento y coste en la generación de energía eólica. El éxito de los inversores de tres niveles para soluciones eólicas de media tensión ha fomentado el estudio para su aplicación en sistemas fotovoltaicos con conexión a la red.

Gracias al continuo aumento de los niveles de potencia en los equipos fotovoltaicos, cada vez se tiende más hacia la conexión en serie de paneles solares con niveles medios de tensión. Las topologías de tres niveles son especialmente interesantes en este tipo de sistemas, ya que permiten incrementar el nivel de potencia usando dispositivos de baja tensión. Al igual que en el caso de los sistemas eólicos, las características requeridas en los sistemas fotovoltaicos son bajo coste, buena regulación de línea y alta eficiencia.

Este tipo de inversores puede controlar libremente la forma de onda de la tensión y corriente en la parte de alterna, permiten ajustar el factor de potencia y reducir la corriente armónica, y son muy resistentes a las distorsiones procedentes de la red. Gracias a todas estas ventajas, la gran mayoría de inversores usados actualmente en aplicaciones con fuentes de energía distribuida, como la fotovoltaica, son inversores auto conmutados. En el Capítulo 3 se realiza una comparación entre la modulación senoidal y la escalera donde se analizan sus características y resultados del THD y tercer armónico de las simulaciones en los niveles dos, tres y cinco para demostrar cual es más eficiente.

CAPÍTULO 2. Estado de la técnica en inversores multinivel.

En este capítulo se describen las diferentes topologías de inversores multinivel, así como las estrategias de conmutación que más se utilizan en la actualidad en este tipo de inversores.

2.1 Introducción a los convertidores multinivel.

Los inversores multinivel presentan un amplio conjunto de semiconductores de potencia y fuentes de tensión basadas en condensadores. Con un adecuado control de la conmutación de los interruptores, estos elementos permiten generar tensiones de salida elevadas y con formas de onda escalonadas, mientras que los semiconductores sólo soportan los niveles de tensión de entrada.

Incrementando el número de niveles en el inversor, aumenta el rango de valores en la tensión de salida, generándose una forma de onda escalonada, con una menor distorsión armónica.

Las principales ventajas de los inversores multinivel frente a los de dos niveles convencionales son las siguientes:

- Generan tensiones de salida con menor distorsión y pocas variaciones de tensión dv/dt .
- Conducen corrientes con poca distorsión.
- Pueden operar a frecuencias de conmutación más pequeñas.
- Generan tensiones en modo común menores, reduciendo así el estrés de los dispositivos y permitiendo trabajar a mayores potencias.

Las principales limitaciones que presentan los inversores multinivel son las siguientes:

- Un elevado número de niveles incrementa la complejidad del control.
- Introducen problemas de desequilibrio en las tensiones de los condensadores.

2.2 Topologías básicas de convertidores multinivel.

Resulta de gran interés conocer las topologías multinivel básicas, junto con las ventajas e inconvenientes que estas presentan. En este apartado no se pretende realizar un análisis completo de las topologías multinivel fundamental, pero se desea presentar aquellas configuraciones que son objeto de mayor estudio y aplicación práctica.

2.2.1 Convertidor Diodo- Clamped

La topología más extendida en aplicaciones solares fotovoltaicas de baja potencia es la del Inversor en Fuente de Tensión monofásico en puente completo, cuya estructura viene esquematizada en la Figura 2.1. Para facilitar la comprensión del sistema, la Figura 2.2 muestra el modelo equivalente con conmutadores.

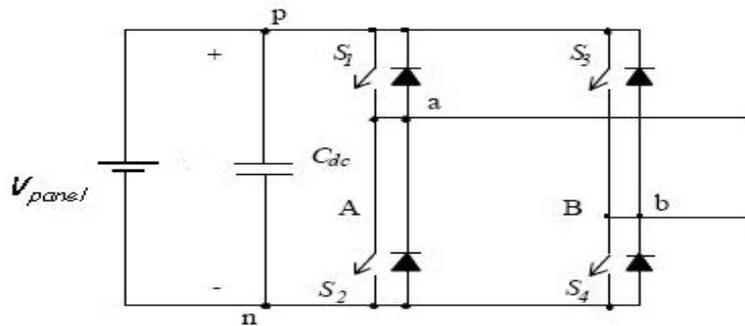


Figura 2.1 Inversor monofásico de dos niveles

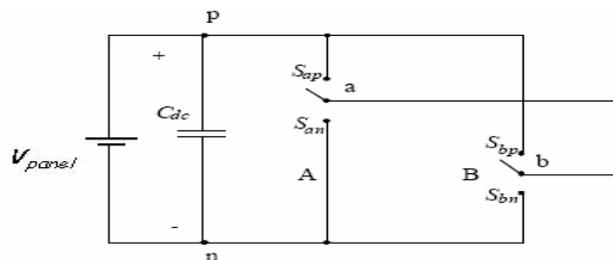


Figura 2.2 Modelo de conmutación del Inversor monofásico de dos niveles.

El inversor consta de un condensador de capacidad C_{dc} en la entrada de corriente continua (también llamada “Bus de Continua”), cuya tensión debe mantenerse constante. El inversor monofásico está formado por dos ramas, A y B, cada una de ellas constituidas por dos interruptores y dos diodos conectados en antiparalelo, cuya función es permitir que la circulación de corriente a lo largo de la rama, sea bidireccional. En el modelo equivalente de la Figura 2.2 los interruptores se modelan mediante sus funciones de conmutación, S_{ij} , que permiten conectar cada fase al punto “p” o al punto “n”. Con este montaje, se puede conseguir que la tensión de salida sea positiva (V_{pn}) o negativa ($-V_{pn}$), según cómo estén conectadas a “p” y “n”.

El número de estados que puede presentar un inversor se define como el número de posibles combinaciones entre las posiciones de sus conmutadores

Restricciones que posee:

La primera restricción establece que una misma rama no debe conectarse a dos puntos de tensión diferentes simultáneamente, ya que se produciría un cortocircuito en la fuente de tensión. Para evitar esta situación se impone que sólo conduzca uno de los dos interruptores de cada rama, condición que matemáticamente viene expresada por la ecuación (2.1).

$$S_{ip} + S_{in} \leq 1 \quad ; \quad i \in \{a, b\} \quad (2.1)$$

La segunda restricción establece que ninguna rama quede sin conexión al bus de continua, ya sea al punto “p” ó “n”, de manera que siempre circule corriente por una de ellas y la carga no quede en circuito abierto. Este requisito viene reflejado en la expresión (2.2), donde al menos uno de los interruptores de cada rama conduce para permitir el paso de corriente.

$$S_{ip} + S_{in} \geq 1 \quad ; \quad i \in \{a, b\} \quad (2.2)$$

Si se considera por ejemplo la rama “A” del inversor, cuando el interruptor S_{ap} conduce ($S_{ap} = 1$), el interruptor S_{an} debe estar abierto ($S_{an} = 0$), de manera que la corriente de salida circule a través de S_{ap} , si es positiva, o de su diodo en antiparalelo, si es negativa, fijando el punto “a” al potencial del punto “p”, es decir, $v_a = V_p$.

Análogamente, si el interruptor S_{ap} está abierto ($S_{ap} = 0$), S_{an} permanece cerrado ($S_{an} = 1$), de modo que la corriente de salida circula a través de S_{an} si es negativa o de su diodo en antiparalelo si es positiva, y el punto “a” se fija a la tensión del punto “n”, es decir, $v_a = V_n$.

En función de cómo estén conectados los interruptores de la rama “B”, habrá un determinado valor de tensión a la salida del inversor ($V_{ab} = v_a - v_b$). La tabla 2.1 recoge los estados fundamentales que puede presentar el inversor en función de la posición de sus conmutadores.

Tabla 2.1 Estados de conmutación de un inversor monofásico de 2 niveles.

Funciones conmutación				Conexión rama		Tensión de salida
S_{ap}	S_{an}	S_{bp}	S_{bn}	A	B	V_{ab}
0	1	1	0	n	N	$-V_{pn}$
1	0	0	1	n	p	V_{pn}

Puesto que la tensión alterna de salida sólo puede tomar los valores (V_{pn}) y ($-V_{pn}$), su forma de onda es discreta y cuadrada, distando mucho de la senoide que se desea obtener. Para solventarlo se incorpora un filtro en la salida del inversor. Este filtro permite suavizar la forma de onda, filtrando los armónicos de alta frecuencia para dejar pasar, teóricamente, sólo la componente fundamental a la frecuencia de trabajo (en este caso la frecuencia de la red).

En cuanto al modelo físico con interruptores, en un inversor de dos niveles las funciones de conmutación de los interruptores del sistema físico coinciden con las del modelo conmutado, según muestra las expresiones de (2.3).

$$S_{ap} = S_1 \quad S_{bp} = S_3 \quad (2.3)$$

$$S_{an} = S_2 \quad S_{bn} = S_4$$

Convertidor Diode-Clamped de tres niveles.

La Figura 2.3 muestra un convertidor Diode-Clamped de tres niveles., también conocido como Neutral- Point-Clamped Converter (NPC) [18], y que puede considerarse como el origen de la conversión multinivel reciente. Este convertidor ha sido, hasta el momento, el más estudiado y aplicado del conjunto de los convertidores multinivel en la actualidad, con un peso significativo.

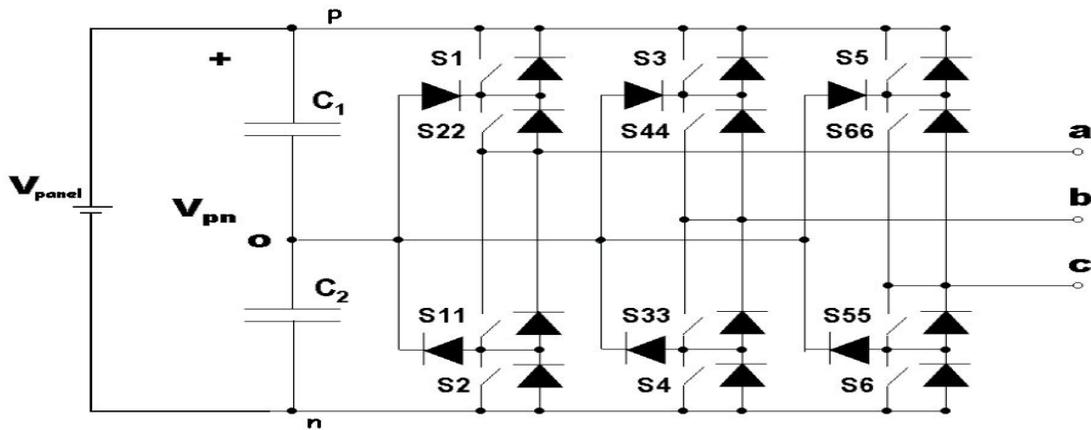


Figura 2.3 Convertidor trifásico Diode-Clamped de tres niveles

En este circuito, la tensión del bus de continua V_{pn} se divide mediante dos capacitores, donde el punto medio “o” es el punto neutro del bus de continua. Los voltajes de salida para cada fase pueden ser (V_{ao} , V_{bo} , V_{co}) pueden tomar tres niveles diferentes de voltaje ($V_{pn}/2$, 0 , $-V_{pn}/2$).

En cada rama hay dos pares complementario que significa que si uno de los interruptores esta cerrado el otro tiene que estar abierto. Para este convertidor dos pares complementarios S1-S11 y S22-S2.

Tabla 2.2 Interruptores a conmutar para obtener los tres niveles de tensión de salida en el convertidor Diode-Clamped.

Interruptores Conectados	Tensión V_{ao}
{S 1 – S 22}	$V_{pn} / 2$
{S 22 – S 11}	0
{S 11 – S 2}	$- V_{pn} / 2$

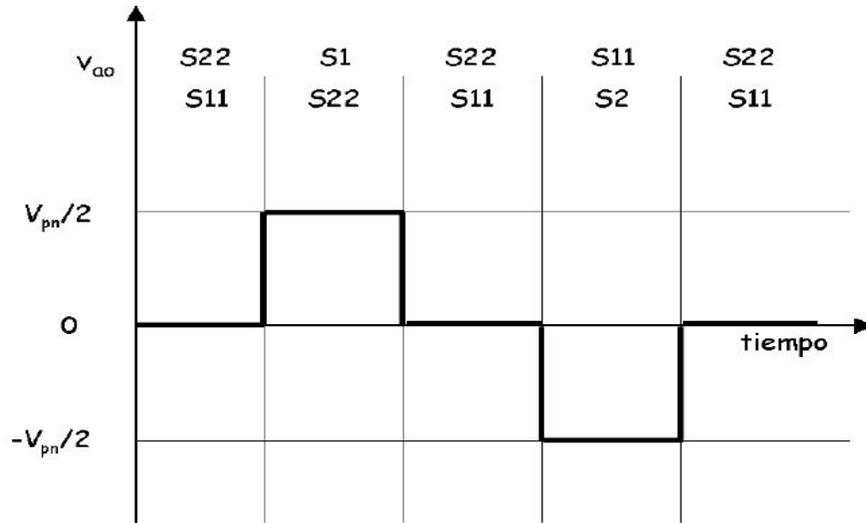


Figura 2.4 Tensión de salida V_{ao} en función de los interruptores conectados para el convertidor Diode-Clamped de tres niveles.

Los diodos conectados al punto medio del bus de continua “o”; son el elemento clave que diferencia este circuito de un inversor convencional, siendo su función la de fijar (clamp) las tensiones de bloqueo de los interruptores, a una fracción de la tensión del bus de continua, es decir, a la tensión de un capacitor $V_{pn}/2$ en este caso. Los diodos de fijación, también deben bloquear la misma tensión en este convertidor. Por otro lado, la tensión de salida analizada V_{ao} es alterna. No obstante, si se considera como tensión de salida la existente entre fase y negativo “n”, por ejemplo V_{an} , se obtienen tres niveles de tensión positivos (V_{pn} , $V_{pn}/2$ y 0), y el convertidor trabaja como convertidor CC/CC. En una aplicación de continua, la corriente de salida es unidireccional, y no es posible mantener equilibrado el punto medio del bus de continua si se emplea una sola rama, de aquí que ésta topología no sea viable para la conversión CC/CC, a menos que se empleen dos ramas.

Rama de un convertidor Diode-Clamped de cinco niveles.

Esta topología puede extenderse a un mayor número de niveles. La Figura 2.5 muestra una rama de un convertidor Diode-Clamped de cinco niveles.

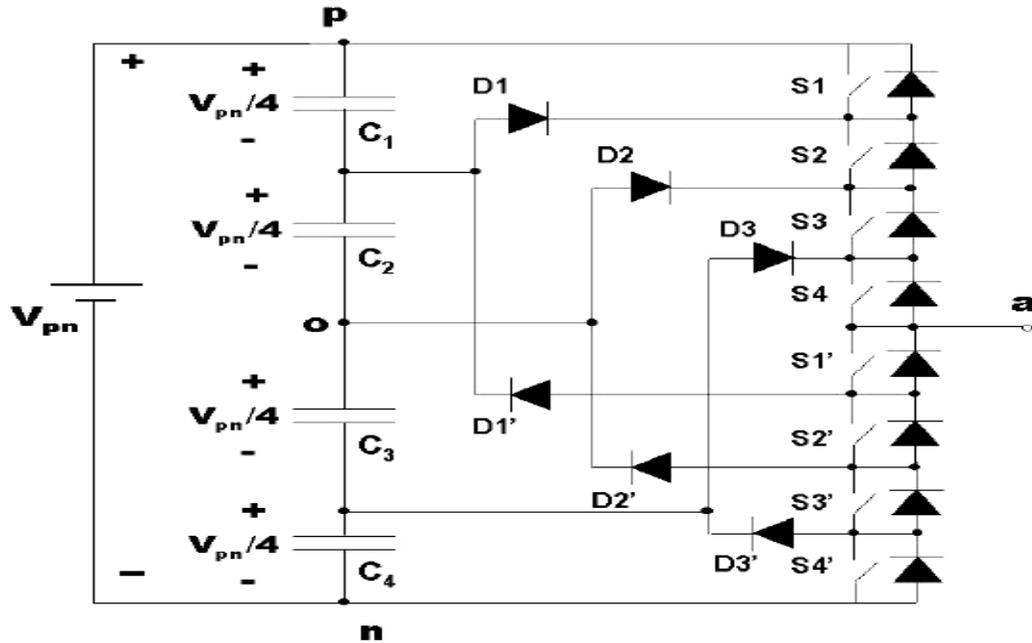


Figura 2.5 Rama de un convertidor Diode-Clamped de cinco niveles.

En el convertidor Diode-Clamped de cinco niveles, la tensión del bus de continua se reparte en las cuatro capacitores C1, C2, C3 y C4, siendo el valor de la tensión de cada capacidad y la tensión de bloqueo de cada interruptor igual a $V_{pn}/4$. La tabla 2.3 muestra las combinaciones de los interruptores que deben emplearse para obtener los cinco niveles de tensión de salida V_{ao} , ilustrados en la Figura 2.6, donde se sintetiza una forma de onda escalonada. Para el convertidor de cinco niveles, los pares complementarios son S1 - S1', S2-S2', S3 - S3' y S4 - S4'.

Tabla 2.3 Interruptores a conmutar para obtener los cinco niveles de tensión de salida en el convertidor Diode-Clamped.

Interruptores Conectados	Tensión V_{ao}
{S 1 – S 2 – S3 – S4}	$V_{pn} / 4$
{S 2 – S 3 – S4 – S 1'}	$V_{pn} / 2$
{S 3 -- S 4 – S 1' – S 2'}	0
{S 4 – S 1' – S 2' – S 3'}	$- V_{pn} / 2$
{S 1' – S 2' – S 3' – S 4'}	$-V_{pn} / 4$

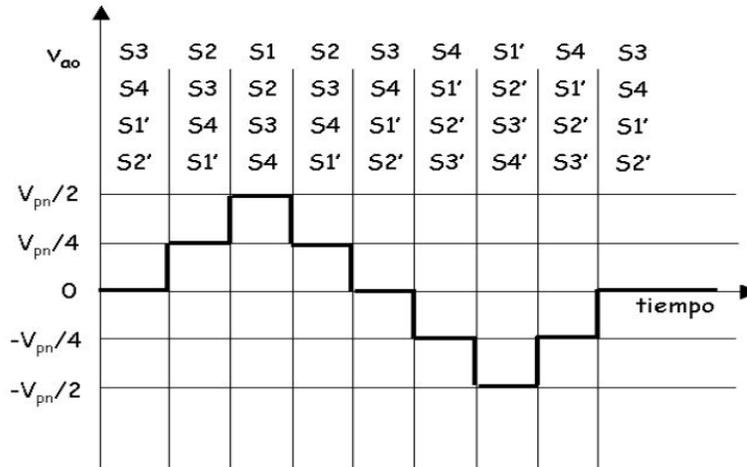


Figura 2.6 Tensión de salida V_{ao} en función de los interruptores conectados para el convertidor Diode-Clamped de cinco niveles.

Suponiendo que la tensión de bloqueo de cada diodo es igual a la del interruptor, en aquellas posiciones donde el diodo debe bloquear mayor tensión que la tensión de un capacitor, sería necesario asociar diodos en serie, incrementando el número total de diodos del convertidor. Una vez estudiados los convertidores Diode-Clamped de tres y cinco niveles, la extensión a (n) niveles es obvia.

La topología Diode-Clamped deja ver una serie de ventajas que le dan un marcado interés en el campo de la conversión de corriente de CC/CA, algunas de estas ventajas se mencionan a continuación.

Ventajas:

- La tensión de bloqueo de los interruptores es la tensión de un capacitor de entrada, $V_{pn}/(n-1)$ en el caso de n niveles.
- El número de capacitores requeridos es pequeño en comparación con otras topologías multinivel. Este punto es especialmente interesante dado que son los componentes reactivos los que suponen un mayor costo en el convertidor.
- Se pueden conectar directamente a un bus de continua, sin necesidad de crear otros buses adicionales.

- No requiere transformadores. Lo cual es muy ventajoso en cuanto, a eficiencia, y costo del inversor.
- Cambio de un estado a otro accionando un solo interruptor.

Estas ventajas no le hacen ajenas a algunas desventajas que pueden llevar consigo como son:

Desventajas:

- Se requiere que los diodos de fijación (Clamping Diodos) sean de recuperaciones rápidas y capaces de conducir la corriente nominal del convertidor, además de estar sometidos a una recuperación inversa exigente.
- En topologías de tres niveles los diodos requieren bloquear diferentes voltajes, haciendo necesario incorporar diodos de mayor voltaje, por lo que el número de diodos aumenta de forma cuadrática con el número de niveles, complicando su diseño y elevando el costo aparte de disminuir la fiabilidad del convertidor.
- Si el número de niveles es alto puede llegar a impedir la realización física del convertidor además de aumentar inductancias parásitas, por lo que en la práctica se recomienda hasta siete o nueve niveles.
- Como hay mayor cantidad de voltajes hay que mantenerlos equilibrado por lo que se dificulta el control del convertidor.

A la vista de las ventajas e inconvenientes de estos convertidores, se observa que la topología de tres niveles Neutral-Point-Clamped (NPC), reúne todas las ventajas mencionadas y independientemente de su grado de dificultad en algunos aspectos no presenta grandes inconvenientes que aparecen al tener más de tres niveles. Para pasar de dos a tres niveles, solo es necesario añadir dos diodos de fijación por fase, además de presentar un diseño mecánico simple, a diferencia de convertidores de más niveles. Por esta razón, la topología NPC ha sido la más extensamente estudiada y aplicada. No obstante, se pueden encontrar montajes de varios niveles funcionando comercialmente.

2.2.2 Convertidor CC/CA Flying-Capacitor de tres niveles.

La Figura 2.7 muestra un convertidor trifásico Flying-Capacitor de tres niveles. La función de los capacitores flotantes C_3 , C_4 y C_5 consiste en fijar la tensión de bloqueo de los interruptores a la tensión de una capacidad. Para el convertidor de la Figura 2.8, la tensión de cualquier capacitor es $V_{pn}/2$, por tanto la tensión de bloqueo de los interruptores es la mitad de la tensión del bus de continua V_{pn} .

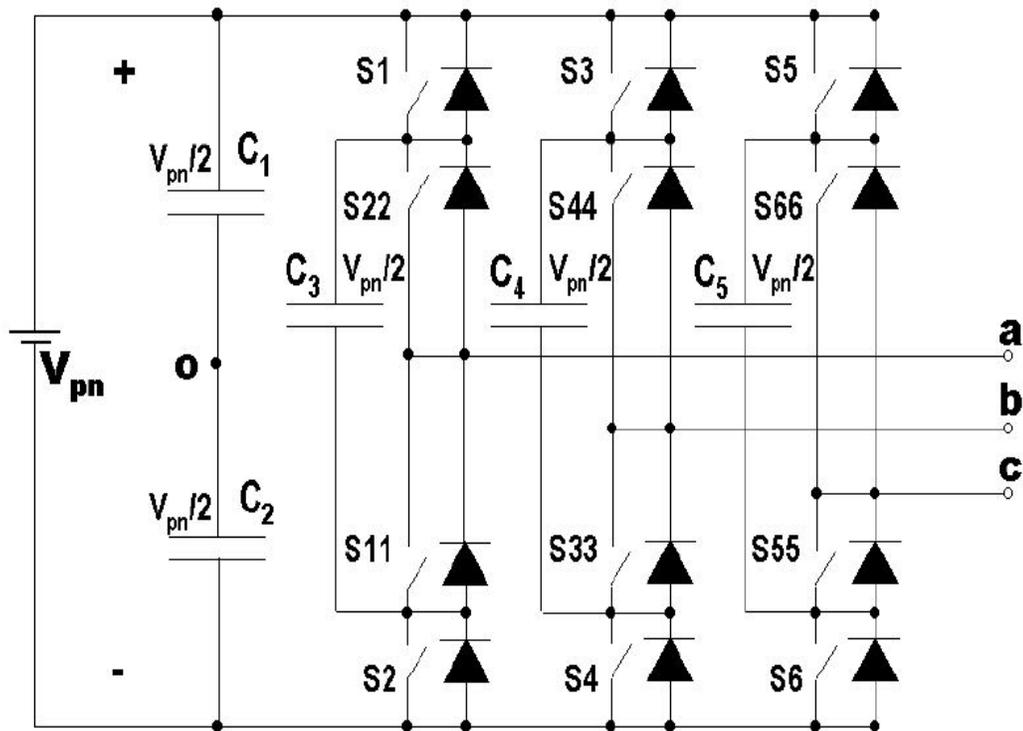


Figura 2.7 Convertidor trifásico de CC/CA Flying-Capacitor de tres niveles.

La tensión de salida (V_{ao} , V_{bo} , V_{co}) presenta tres niveles de tensión ($V_{pn}/2$, 0 , $-V_{pn}/2$), siendo el escalonado idéntico al convertidor Diode-Clamped. Analizando la fase “a”, la tabla 2.4 muestra la tensión de salida V_{ao} obtenida en función de los interruptores conectados, donde se tienen dos combinaciones posibles para obtener el nivel de salida cero (S_1 - S_{11} y S_{22} - S_2). Son pares complementarios S_1 - S_2 y S_{22} - S_{11} .

La tensión de los capacitores flotantes se mantiene constante, escogiendo apropiadamente la combinación de interruptores correspondiente al nivel cero de tensión de salida.

Tabla 2.4 Interruptores a conmutar para obtener los tres niveles de tensión de salida en el convertidor Flying-Capacitor.

Interruptores Conectados	Tensión V_{ao}
{S 1 – S 22}	$V_{pn} / 2$
{S 1 – S 11} ó {S 22 – S2}	0
{S 11 – S 2}	$-V_{pn} / 2$

Flying-Capacitor de cinco niveles.

La Figura 2.8 presenta una rama de un convertidor Flying-Capacitor de cinco niveles esquematizada con todos sus componentes elementales.

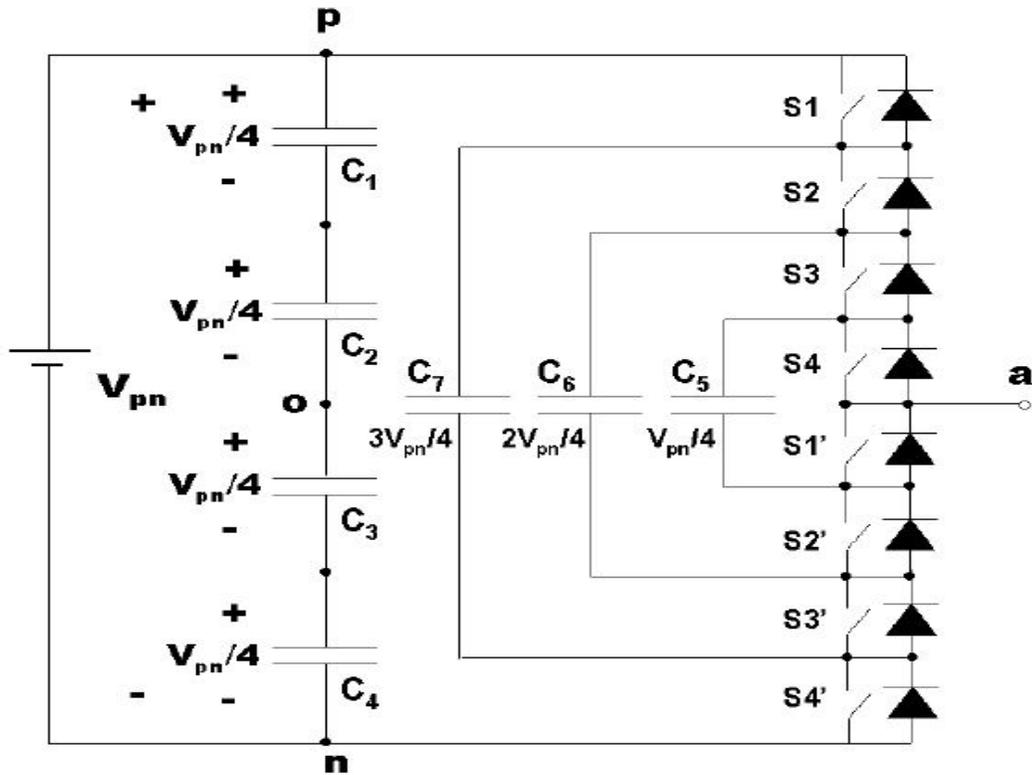


Figura 2.8 Rama de un convertidor Flying-Capacitor de cinco niveles.

Para sintetizar la tensión de salida, el convertidor Flying-Capacitor tiene un mayor número de combinaciones que el convertidor Diode-Clamped, tal como muestra la tabla 2.5. En este caso, son pares complementarios S1-S4', S2-S3', S3-S2', S4-S1'.

Tabla 2.5 Interruptores a conmutar para obtener los cinco niveles de tensión de salida en el convertidor Flying-Capacitor.

Interruptores Conectados	Tensión V_{ao}
$\{S 1 - S 2 - S 3 - S 4\}$	$V_{pn} / 2$
$\{S 1 - S 2 - S 3 - S 1'\}$ ó $\{S 2 - S 3 - S 4 - S 4'\}$ ó $\{S 1 - S 3 - S 4 - S 3'\}$	$V_{pn} / 4$
$-S 2 - S 1' - S 2'\}$ ó $\{S 3 - S 4 - S 3' - S 4'\}$ ó $\{S 1 - S 3 - S 1' - S 3'\}$ ó $\{S 1 - S 4 - S 2' - S 3'\}$ ó $\{S 2 - S 4 - S 2' - S 4'\}$ ó $\{S 2 - S 3 - S 1' - S 4'\}$	0
$\{S 1 - S 1' - S 2' - S 3'\}$ ó $\{S 4 - S 2' - S 3' - S 4'\}$ ó $\{S 3 - S 1' - S 3' - S 4'\}$	$-V_{pn} / 4$
$\{S 1' - S 2' - S 3' - S 4'\}$	$-V_{pn} / 2$

En el funcionamiento normal del convertidor, los capacitores C1, C2, C3, C4 y C5 están cargadas a una tensión $V_{pn}/4$, mientras que C6 esta cargada a $V_{pn}/2$ y la tensión de C7 es $3V_{pn}/4$. Suponiendo que se dispone de capacitores de voltaje nominal $V_{pn}/4$ en las posiciones C6 y C7 deberán emplearse dos y tres capacitores en serie respectivamente, por tanto hay que emplear más capacitores.

Ventajas del convertidor Flying-Capacitor:

- Debido a la presencia de los capacitores flotantes, la tensión de bloqueo de los interruptores es $V_{pn}/(n-1)$, igual que en el convertidor Diode-Clamped.
- No hay diodos de fijación en el convertidor, eliminando la problemática asociada a estos diodos.
- Algunas transiciones entre estados obligan a conmutar a más interruptores a la vez (incluso hasta cuatro conmutaciones) y es preferible evitarlas.

- Puede emplearse como convertidor CC/CC, sin que el equilibrado de las tensiones de los capacitores sea un problema gracias a los estados redundantes, aún con corriente unidireccional.
- El equilibrado de los capacitores flotantes puede ser abordado de forma independiente para cada rama del convertidor, mientras que en el convertidor Diode-Clamped debe considerarse para el sistema trifásico completo.

Desventajas del convertidor Flying-Capacitor:

- Al emplear un gran número de capacitores, la corriente que circula por los capacitores es la misma, entonces los condensadores tendrían que tener el mismo valor del capacitor para mantener los valores de voltajes similares, por lo que aumentarían los capacitores flotantes por fase lo que implica mayor volumen y costo del convertidor.
- Los capacitores flotantes deben soportar la corriente de carga, por tanto deben seleccionarse adecuadamente, con el objeto de no generar excesivas pérdidas y para no condicionar la corriente mínima del convertidor.
- Debe definirse un procedimiento inicial de carga de los capacitores flotantes.
- Existe un peligro de potencial resonancia a causa de los capacitores del sistema.
- Si la tensión del bus de continua aumenta rápidamente, los capacitores flotantes tardan un tiempo en alcanzar las tensiones normales de funcionamiento por lo que ocurre una distorsión significativa en el voltaje de salida. Esto es un obstáculo para las aplicaciones comerciales ya que en generación distribuida se producen variaciones rápidas de la potencia de transmisión.

2.2.3 Convertidor CC/CA Cascaded Full-Bridge.

Esta topología se basa en la conexión de inversores monofásicos con fuentes de continua separadas. Una de sus primeras aplicaciones fue la estabilización de plasma, trabajo que fue publicado en 1988. La Figura 2.9 muestra una rama de un convertidor Cascaded Full-Bridge de cinco niveles, realizada mediante la asociación serie de dos etapas en puente.

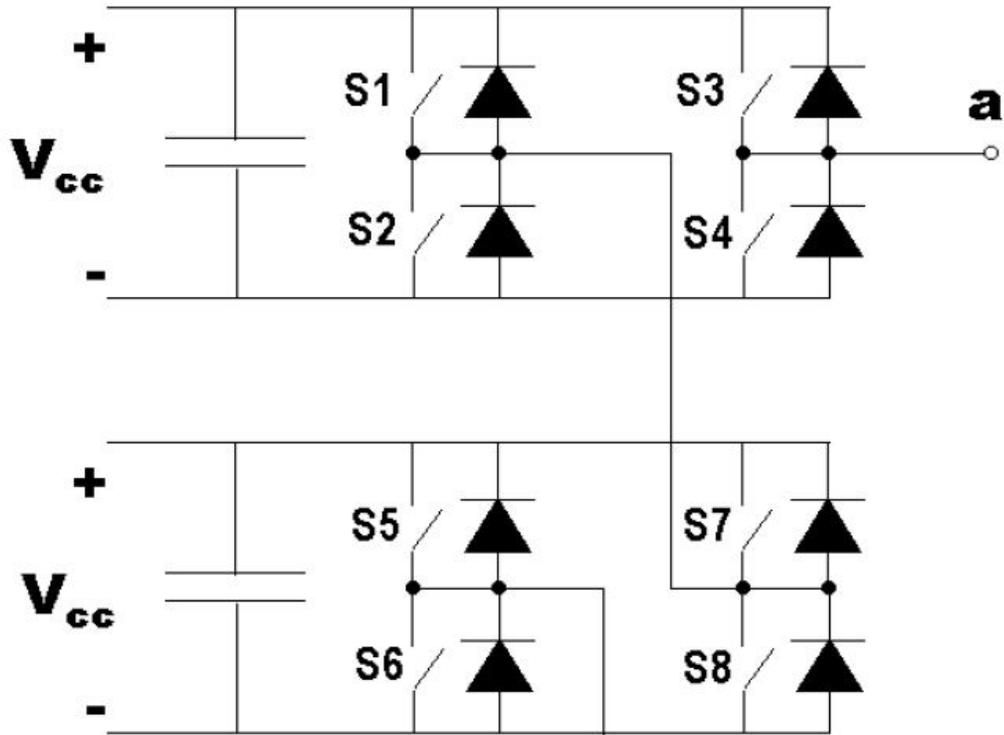


Figura 2.9. Rama de un convertidor Cascaded Full-Bridge de cinco niveles.

Cada puente puede generar tres tensiones de salida diferentes: $+V_{cc}$, 0 y $-V_{cc}$. La tensión de fase resultante se sintetiza por la suma de las tensiones generadas por cada puente. Por tanto, la tensión de salida V_{an} puede tomar cinco valores distintos: $+2V_{cc}$, $+V_{cc}$, 0 , $-V_{cc}$, $-2V_{cc}$.

Los voltajes continuos deben estar aislados entre ellos, estos se obtienen a través de un transformador con secundario aislado o transformador independientes, acompañados de su rectificador de diodos. En aplicaciones de energía solar fotovoltaica, la fuente de continua representaría los pares solares.

Convertidor Cascaded Full-Bridge de tres niveles conectado en estrella.

La Figura 2.10 presenta un convertidor Cascaded Full-Bridge trifásico de tres niveles. En este caso solo es necesario emplear un puente por fase. El valor de la tensión de cada fase (V_{an} , V_{bn} , V_{cn}) puede ser $+V_{cc}$, 0 , $-V_{cc}$.

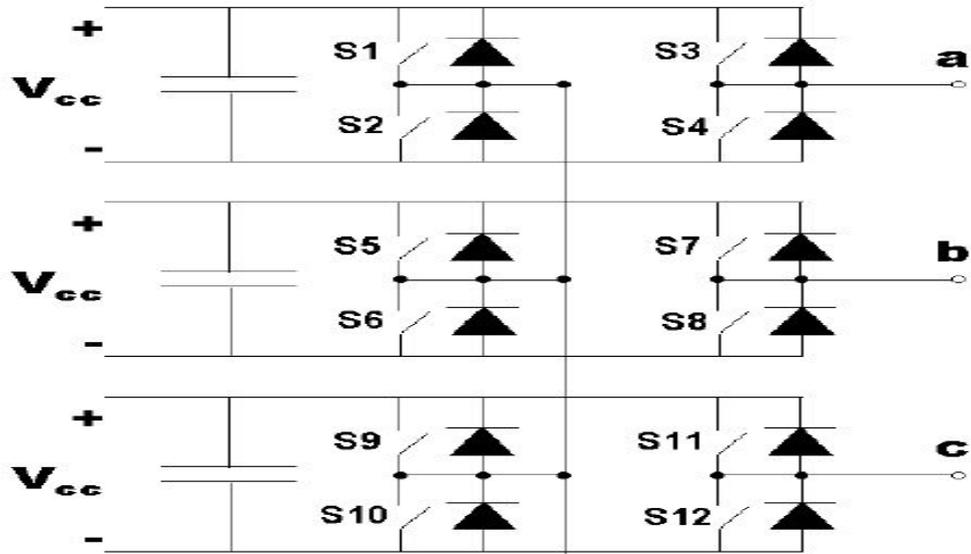


Figura 2.10 Convertidor Cascaded Full-Bridge de tres niveles conectado en estrella.

Tal como se ha planteado en el convertidor, el número de niveles que se obtiene es impar. Si se desea obtener un número par de niveles, debe añadirse una rama de dos niveles a cada una de las fases del convertidor.

Los convertidores Cascaded Full-Bridge presentan las siguientes ventajas.

Ventajas:

- Como están constituidos por asociación de etapas en Puente, la construcción puede ser modular. Rebajando la complejidad y costo.
- Requieren menor número de componentes que otras topologías multinivel, para alcanzar el mismo número de niveles. No necesitan diodos de fijación o capacitores flotantes.
- La topología es tolerante a fallos, puesto que el convertidor puede continuar funcionando con un menor nivel de tensión, aunque una de sus etapas están cortocircuitadas.

En las desventajas se centran en los siguientes puntos.

Desventajas:

- Se requiere fuentes de continua aisladas para cada etapa en Puente.

- Las características del transformador hace que el costo del convertidor se incremente de forma notable.
- La conexión de las fuentes de entrada aisladas entre dos convertidores en los montajes tipo CA/CC/CA bidireccionales (back-to-back) no es posible ya que se produce un cortocircuito, a menos que los convertidores conmuten sincrónicamente [18].

2.2.4 Comparación entre topologías.

Se han podido mostrar en estas descripciones sus ventajas e inconvenientes de una manera explícita. La tabla 2.6 muestra, de forma resumida y compacta, las principales características de las tres topologías multinivel básicas para un inversor de (n) niveles.

Tabla 2.6 Comparación de las características de las Topologías multinivel básica, con (n) Niveles.

Principales Topologías Multinivel			
Características	<i>Diode-Clamped</i>	<i>Flying-Capacitor</i>	<i>Cascaded Full Bridge</i>
Interruptores con diodo en antiparalelo	6(n - 1)	6(n - 1)	6(n - 1)
Diodos independientes con posibles tensiones de bloqueo diferentes	6(n - 2)	0	0

Número real de diodos independientes (Asociación serie con misma tensión de bloqueo)	$3(n - 1) (n - 2)$	0	0
Capacitores con posibles diferentes tensiones	$(n - 1)$	$3n - 5$	$\{n \text{ impar}\}$ $(3n/2) - 1,5 \{n \text{ par}\}$ $(3n/2) - 2$
Número real de capacitores (con igual tensión nominal)	$(n - 1)$	$(n-1)+((n-1)(n-2))/2$	$\{n \text{ impar}\}$ $(3n/2) - 1,5$ $\{n \text{ par}\}$ $(3n/2) - 2$
Tensión de bloqueo de los interruptores	$V_{pn} / (n-1)$	$V_{pn} / (n-1)$	$V_{cc} \{tensión \text{ de entrada de una etapa}\}$
Número de niveles de la tensión compuesta de salida	$2n - 1$	$2n - 1$	$2n - 1$
Número de niveles de la tensión simple de salida	$4n - 3$	$4n - 3$	$4n - 3$

En el desarrollo de este epígrafe se explica brevemente las topologías donde se ve claramente por sus ventajas y aplicaciones que el convertidor Diode Clamped es uno de los más usados por las ventajas que ofrece con respecto a los demás estudiados.

Si se desea pasar del nivel 2 al 3 solo hay añadir dos diodos de fijación por fase, además el equilibrado de las capacitores se considera para el sistema trifásico completo y en las otras topologías solo se hace independiente para cada rama, así como sus características.

2.3 Estrategias de conmutación multinivel.

El objetivo de este apartado es mostrar una panorámica de las estrategias de conmutación multinivel más empleadas, con las ventajas e inconvenientes que ofrecen, sin realizar una descripción exhaustiva de cada una de ellas.

En este trabajo se estudian los cuatro métodos de modulación, estos se dividen en dos grupos, el de conmutación a frecuencia fundamental y el de conmutación a alta frecuencia. Ver Figura 2.11.

Los objetivos principales de estas estrategias de control son:

1. Regulación de la amplitud de la frecuencia de salida.
2. Minimización de los contenidos de armónicos de salida del inversor.
3. Equilibrado de los voltajes instantáneos de los capacitores del convertidor.

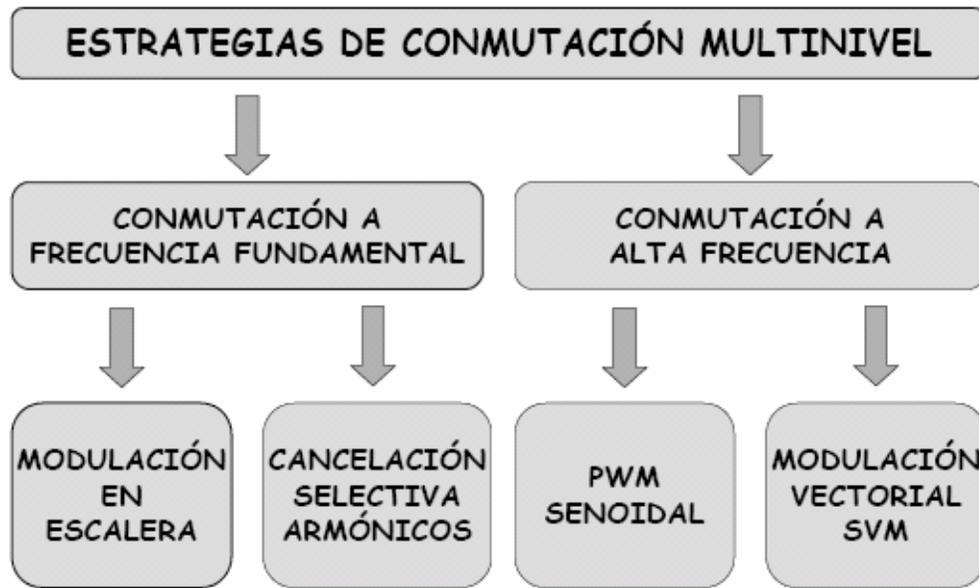


Figura 2.11. Clasificación básica de los métodos de modulación multinivel.

2.3.1 Modulación en escalera..

Las primeras estrategias de modulación de los inversores multinivel se limitaban a la síntesis de formas de onda escalonadas, como muestra la Figura 2.12. Las ventajas de esta modulación son la simplicidad para su realización física y su baja frecuencia de conmutación, que permite su aplicación en convertidores con GTO. No obstante, es fácil comprobar que la tensión obtenida no presenta un buen espectro armónico, además de ofrecer una respuesta dinámica lenta, todo ello causado por su baja frecuencia de conmutación. Así mismo, es necesario disponer de una tensión continua de entrada variable para poder regular la tensión de salida. Su aplicación principal se encuentra en convertidores de muy alta potencia (sistemas de distribución de potencia, accionamiento de motores), donde se busca minimizar las pérdidas en conmutación mediante la reducción de la frecuencia de conmutación.

Otra modulación que da como resultado una forma de onda escalonada es la presentada por [11], basada en la modulación vectorial de baja frecuencia de conmutación, consiste en aplicar a la carga aquel vector de tensión del diagrama de vectores más próximo al

vector de referencia, minimizando el error o distancia respecto el vector de referencia. Este método de modulación es interesante para un número elevado de niveles, puesto que hay una gran densidad de vectores en el diagrama de vectores de estado del convertidor y el error respecto el vector de referencia de tensión es relativamente reducido.

2.3.2 Cancelación selectiva de armónicos.

La Figura 2.12 muestra una forma de onda genérica con simetría de cuarto de periodo, donde se tienen m ángulos de conmutación ($\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_m$). Aplicando el desarrollo en serie de Fourier a esta señal, y escogiendo apropiadamente los m ángulos de conmutación ($\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_m$), se puede cancelar hasta $m-1$ armónicos, reservando un grado de libertad para regular la amplitud del armónico fundamental. En general, se suele escoger la cancelación de los armónicos más significativos de baja frecuencia, mientras que se recurre a filtros si se desea eliminar los de alta frecuencia. Para conseguir la cancelación efectiva de los armónicos, los m ángulos de conmutación ($\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_m$) deben estar comprendidos entre 0 y $\pi/2$, lo que supone que el margen del índice de modulación disponible suele ser estrecho, lo que representa una limitación de este tipo de modulación. Por ejemplo, en una señal escalonada de siete niveles, el índice de modulación disponible está comprendido entre 0.5 y 1.05 . Para emplear esta técnica con un amplio margen del índice de modulación y con una distorsión armónica mínima, se encuentra en una estrategia generalizada de cancelación selectiva de armónicos.

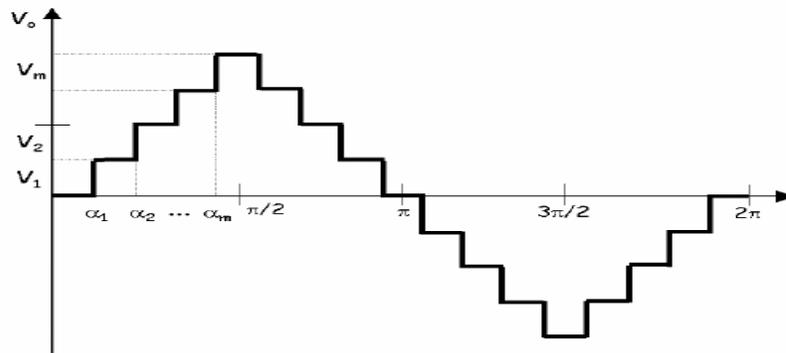


Figura 2.12. Tensión de salida escalonada generalizada con m ángulos de conmutación.

El sistema de ecuaciones a resolver para obtener los ángulos de conmutación es no lineal, su cálculo es complejo y dificultoso de aplicar en tiempo real. Por ello, el cálculo se suele

hacer de forma previa al funcionamiento del sistema, para almacenarlo y ser reproducido en línea por el modulador, lo que resta flexibilidad al sistema.

Esta estrategia de conmutación es denominada por algunos autores [19]-[17] como "óptima", por la cancelación de armónicos, o "pre-calculada", por el cálculo previo de los ángulos de conmutación.

Para el cálculo de los ángulos de conmutación, se encuentran en la literatura diferentes métodos; [1] en la optimización del factor de pérdidas del motor; establecen un mapa de ángulos de conmutación según un estudio comparativo en base a diversos aspectos, como el factor de pérdidas y el rizado de corriente de salida, entre otros; al aplicar esta técnica a un convertidor Cascaded Full-Bridge, aprovechando la configuración del convertidor para simplificar el sistema de ecuaciones no lineales.

En su origen, esta técnica de modulación se aplicó a tiristores, de ahí su clasificación dentro de las técnicas a frecuencia fundamental. No obstante, conforme aumenta el número de ángulos de conmutación, el número total de conmutaciones de los interruptores se eleva, y se podría considerar esta técnica como de alta frecuencia de conmutación.

2.3.3 Modulation PWM senoidal

La modulación del ancho del pulso senoidal (Sinusoidal Pulse Width Modulation – sinusoidal PWM), también conocida como PWM subarmónica (Sub-harmonic PWM), es una de las técnicas de modulación más ampliamente estudiada y empleada en aplicaciones industriales, debido a su simplicidad y a los buenos resultados que garantiza en todas las condiciones de trabajo, incluida la sobremodulación. Esta técnica consiste en comparar una señal senoidal, denominada moduladora, con señal denominada portadora, usualmente de forma de onda triangular, en algunos casos tipo diente de sierra. La comparación de estas dos señales da como resultado las órdenes de conmutación de los interruptores del convertidor. Este método de modulación es flexible, permite emplear diferentes moduladoras y portadoras, según se detalla en, que se pueden dividir en dos grandes bloques: a) estrategia de conmutación basada en portadora modificada y b) estrategia de conmutación basada en múltiples moduladoras. Los contenidos armónicos pueden variar según la modulación sea síncrona o asíncrona.

La realización física de la estrategia PWM senoidal es simple, empleando integradores analógicos y comparadores para la generación de las señales de conmutación. Hoy en día, es más habitual emplear sistemas digitales para generar las señales de conmutación, donde los integradores digitales se sustituyen por temporizadores digitales específicos, denominados temporizadores PWM. De la comparación entre la moduladora discretizada y el valor del temporizador PWM se obtiene la señal de conmutación, proceso denominado muestreo natural o regular (natural sampling o regular sampling), que puede ser simétrico o asimétrico. Se realiza este proceso en tiempo real mediante unas ecuaciones simplificadas. En cualquier caso, las señales de conmutación obtenidas para cada periodo de conmutación suelen ubicarse temporalmente con simetría de periodo, con objeto de reducir las conmutaciones.

Para finalizar con la estrategia de conmutación PWM senoidal, algunas de sus características son:

- Simplicidad.
- Contenido armónico reducido.
- Buen resultado incluso en sobremodulación.

2.3.4 Modulación vectorial.

La modulación basada en los vectores espaciales de tensión (Space Vector Modulation) SVM o SVM-PWM es bien conocida y ampliamente utilizada en convertidores CC/CA convencionales y multinivel. Cada uno de los posibles estados del convertidor se representa mediante un vector de tensión, y el conjunto de todos estos vectores de estado configura el diagrama vectorial de tensiones del convertidor. La tensión de salida deseada se puede expresar como un vector de referencia o modulación dentro del diagrama vectorial de tensiones, cuyo módulo se relaciona con la amplitud de la tensión de salida, cuya velocidad de giro es igual a la pulsación deseada de la tensión de salida y su fase coincide con la fase de salida. La Figura 2.13 muestra el diagrama de vectores de estado para un convertidor de tres niveles, con 27 estados posibles expresados por 19 vectores de

estado diferentes, junto con un posible vector de modulación. El diagrama de vectores de estado es universal, independientemente del tipo de convertidor.

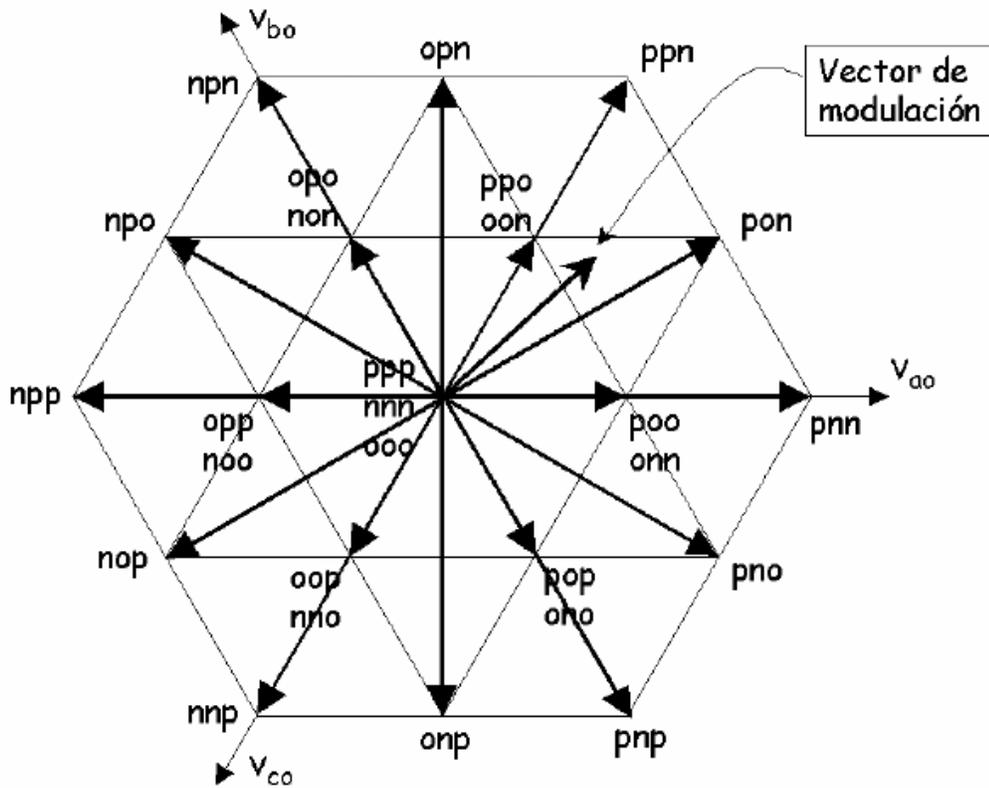


Figura 2.13 Diagrama de vectores de estado y vector de modulación para un inversor de tres niveles.

El giro del vector de referencia se discretiza en cada periodo de conmutación. Dentro de un período de conmutación, se debe generar el vector de referencia correspondiente a ese periodo a partir de los vectores del diagrama vectorial de tensiones. Dado que cada vector de modulación discretizado normalmente no coincide con ningún vector de estado del convertidor, se genera su valor a partir del promediado de dos o más vectores de estado. La selección de los vectores de estado con los que se obtiene el valor promediado en cada periodo de conmutación continúa siendo un tema discutido en la literatura, aunque probablemente la selección más empleada sea escoger los tres vectores más próximos al

vector de modulación (Nearest Three Vectors –NTV–). *Esta selección de vectores es el método básico para obtener un contenido armónico reducido en la tensión de salida y mantener el equilibrio de los capacitores del convertidor mediante la selección adecuada de los estados redundantes del convertidor.*

Cuando el vector de modulación se sitúa próximo a un vértice de cualquier región del diagrama de vectores de estado, alguno de los estados del convertidor debe permanecer activado un tiempo muy corto, que incluso puede ser menor que el tiempo mínimo de pulso que el convertidor es capaz de generar. Este problema suele denominarse como el problema del pulso estrecho. Diversos autores han abordado este problema y han propuesto soluciones [9]. Por otro lado, en la literatura se encuentra la extensión de la estrategia SVM en la zona de sobremodulación [19].

En cualquier caso, las técnicas de modulación PWM senoidal y SVM están fuertemente relacionadas. Se muestra que se puede obtener una modulación SVM empleando una estrategia PWM senoidal con una adición adecuada de tensión de modo común o secuencia cero, además se indica que la única diferencia entre ambas técnicas reside en la ubicación temporal de los vectores de estado de tensión cero. La adición de una tensión adecuada de modo común se emplea en para mantener equilibradas las capacitores de un convertidor Diode-Clamped de tres niveles.

Algunas de las características de la modulación SVM son:

- Los valores de las tensiones de salida con SVM son hasta un 15% superiores a los obtenidos empleando una modulación PWM senoidal.
- Seleccionando apropiadamente la secuencia de los vectores escogidos, pueden reducirse las pérdidas de conmutación del convertidor.
- La modulación se puede abordar fácilmente desde el dominio de Park o D-Q, lo que facilita su empleo junto con técnicas de control vectorial.
- El cálculo requerido es simple y poco extenso, por tanto es fácil de realizar en un dispositivo de control digital.
- La complejidad de la selección de los vectores de estado y de los estados redundantes se incrementa de forma severa con el número de niveles.

2.3.5 Otras técnicas de modulación.

Se encuentran en la literatura otras técnicas de modulación, que suelen ser variantes en mayor o menor medida de las ya mencionadas. Algunas de ellas son:

- Control directo de par (Direct Torque Control –DTC–).
- Modulación sigma-delta.
- Modulación híbrida.
- Modulación para rectificadores.
- PWM con portadoras a distintas frecuencias.
- SVM basado en portadoras modificadas.
- Control por histéresis.
- Control en modo corriente.
- PWM aleatorio (Random PWM).
- Técnicas de conmutación suave.

CAPÍTULO 3. Simulación de inversores multinivel.

En este capítulo se pretende realizar un análisis de las características armónicas de los inversores multinivel, mediante simulaciones llevadas a cabo en el Simulink del Matlab 6.5. Para esto se establece una comparación entre un inversor convencional de dos, tres y cinco niveles; estos dos últimos pertenecientes a la topología de Neutral-Point-Clamped (NPC), utilizando estrategias de conmutación senoidal y en escalera.

Estos inversores están formado por dos tipos de elementos semiconductores: interruptores de potencia y diodos.

Los interruptores son el elemento principal del inversor, ya que su número, secuencia y frecuencia de conmutación determinan la forma de onda de la tensión de salida del inversor. Estos interruptores deben ser completamente controlables, tanto en la conexión como en la desconexión.

La elección del interruptor depende de las especificaciones de funcionamiento de cada inversor, es decir, de las tensiones, corrientes nominales a las que trabaja, y de la frecuencia de conmutación.

El segundo tipo de elemento a considerar son los diodos, conectados en antiparalelo con los interruptores. La presencia de cargas con un cierto comportamiento inductivo ocasiona un cierto desfase entre tensión y corriente, de manera que en un determinado instante la tensión puede ser positiva y la corriente negativa. El objetivo de estos diodos es permitir que la circulación de corriente sea bidireccional. Los diodos utilizados se conocen con el nombre de diodos de recuperación rápida, ya que es necesario que los retrasos que introducen no sean mayores que los de los interruptores seleccionados.

Las consideraciones realizadas para la elección de los interruptores y diodos son las mismas en los inversores de dos y tres niveles. La única diferencia radica en la tensión máxima que deberán soportar los semiconductores. Para el caso de dos niveles, la tensión de bloqueo es la del bus de continua V_{pn} , mientras que para el inversor de tres niveles la tensión de bloqueo es la mitad, es decir, $V_{pn}/2$, lo cual le permite trabajar al doble de tensión en el bus de continua con la misma corriente. Esta característica es una de las principales ventajas en los inversores de tres niveles, ya que permite trabajar con mayores potencias de entrada.

3.1 Modelos en MATLAB/Simulink.

Este apartado presenta los modelos los inversores multinivel, implementados en el programa MATLAB/Simulink, así como algunas especificaciones necesarias para ejecutar las simulaciones. Además se incluye una breve descripción de los diagramas de bloques y sus parámetros.

La versión de MATLAB / Simulink utilizada en el presente proyecto es la 6.5 y es necesario disponer de esta versión o posteriores para poder ejecutar los modelos.

Todos los inversores simulados son de una sola fase y los interruptores están definidos por su comportamiento matemático, partiendo de la hipótesis de que los interruptores son ideales.

3.1.1 Bloques de control del inversor.

Para el control del inversor se utilizaron las estrategias de conmutación senoidal y escalera y se realizó un análisis del contenido de armónico presente en las señales de salida de los tres inversores, para cada una de estas estrategias.

3.1.1.1 Modulación senoidal del ancho del pulso.

Esta técnica de modulación es ampliamente estudiada y empleada en aplicaciones industriales, debido a su simplicidad y a los buenos resultados que garantiza en todas las condiciones de trabajo, incluida la sobremodulación. Este método de modulación es flexible, lo que permite emplear otras moduladoras. Su funcionamiento consiste en comparar una señal sinusoidal, denominada moduladora, con una señal denominada portadora, usualmente de forma de onda triangular, en algunos casos tipo diente de sierra. La comparación o intersección de estas dos señales da como resultado las órdenes de conmutación de los interruptores del convertidor. Variando la amplitud y frecuencia de la onda moduladora y la de portadora, obtuvimos el pulso deseado para cada instante de tiempo en cada interruptor.

Tomando como ejemplo el convertidor de dos niveles, cuya implementación se desarrolló mediante una modulación senoidal para el control de sus dispositivos de conmutación S_1, S_2, S_3 y S_4 pertenecientes a la Figura 2.1, su orden de conmutación se muestra en la siguiente tabla:

Tabla 3.1 Combinaciones de operación de los interruptores

Interruptores Conectados	Tensión de salida V_{ab}
{S_1 – S_4}	V_{pn}
{S_2 – S_3}	$- V_{pn}$

Para su mejor explicación se divide en dos momentos fundamentales la onda de salida; la parte positiva de la onda ($+ V_{pn} / 2$) y la parte negativa ($- V_{pn} / 2$).

Para obtener el valor del 1er momento ($+ V_{pn} / 2$), que se encuentra en el bloque de control de la Figura 3.1 A, llamado “S_1 y S_4 Positiva” y el del 2do momento ($- V_{pn} / 2$) implementado en el bloque de control “S_2 y S_3 Negativa”, se emplea modulación senoidal con pulsos de frecuencia diferente para cada momento. Tal y como se muestra en la Figura 3.1 B.

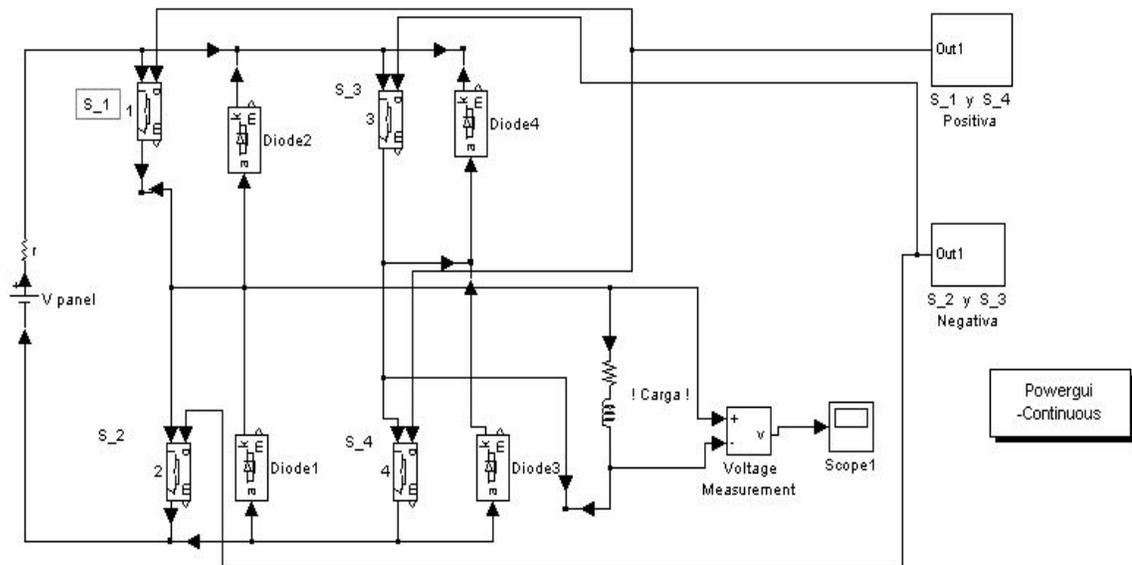


Figura 3.1 A Montaje del esquema de un inversor monofásico de dos niveles en el Simulink.

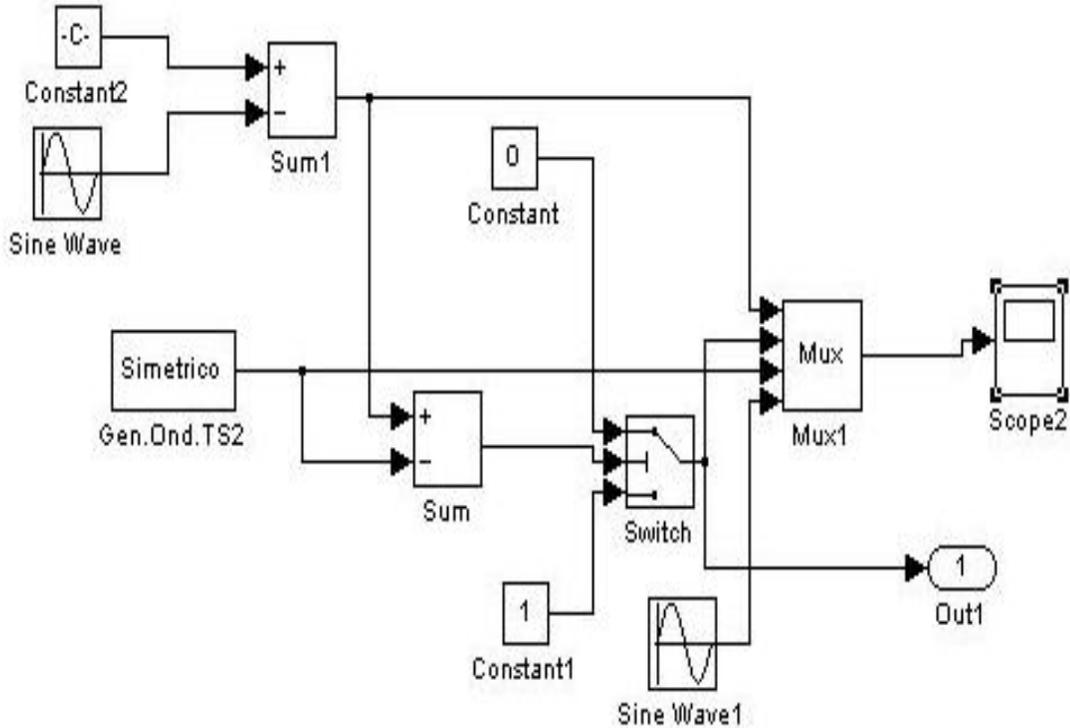


Figura 3.1 B Bloque de control de la modulación PWM senoidal de los pulsos de la parte positive de la onda “S_1 y S_2 Positiva”.

En la Figura 3.2 se puede ver que el pulso de conmutación es obtenido mediante la intersección entre la moduladora sinusoidal de mayor amplitud con la portadora en forma de triángulo. Así de esta manera quedan constituidos lo pulsos, tanto para parte positiva como para la negativa.

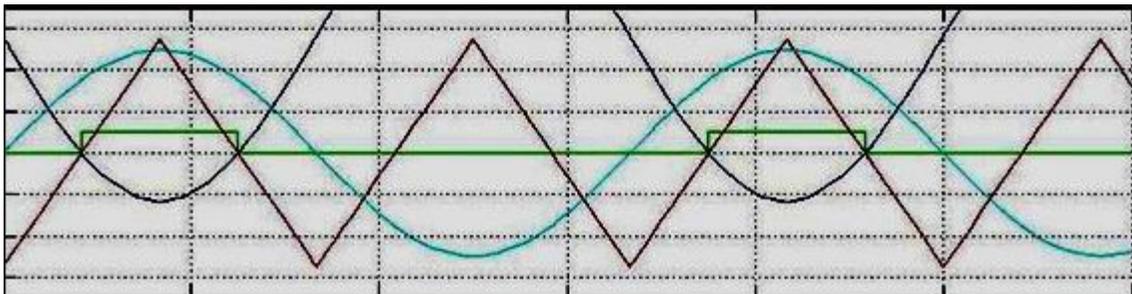


Figura 3.2 Gráfico de la señal de pulsos de la parte Positiva o 1er momento.

Análisis de armónico.

Para analizar la distorsión armónica fundamental (THD), orden del armónico y porcentaje del contenido de cada orden con respecto al armónico fundamental; se utilizó el “Pwergui – Continuous” como herramienta del Simulink

Se representan de manera gráfica, el valor de cada armónico, su orden y el THD (Total Harmonic Distortion) en cada inversor, utilizando para esto un gráfico de barras y uno a modo de lista. Sería válido aclarar, que en estos gráficos de barras, el armónico fundamental, está representado hasta el 50%, 40 % y 30% de su valor real, en los inversores de dos, tres y cinco niveles respectivamente; mientras que los demás armónicos de otros órdenes están en su valor porcentual real

En el gráfico de la Figura 3.3 se muestra un esquema de barras que refleja el contenido de los armónicos de manera gráfica con el orden cada armónico para el caso de un inversor de dos niveles.

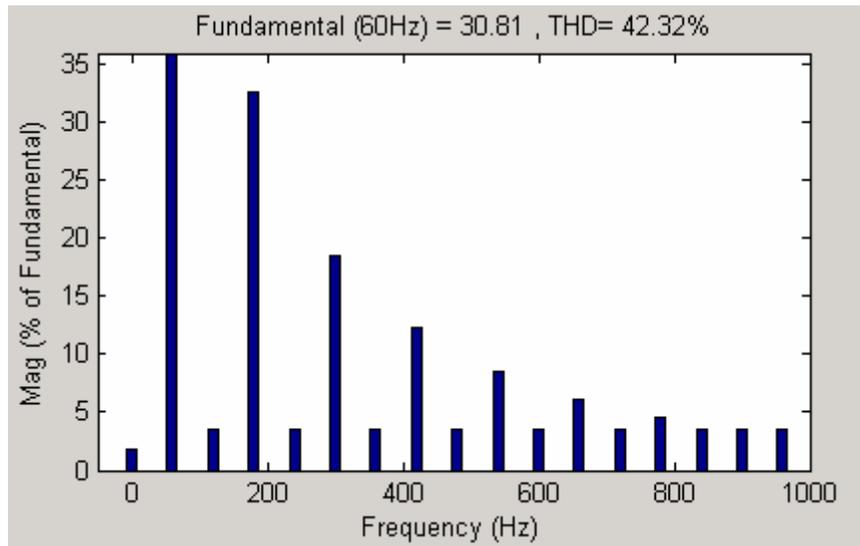


Figura 3.3 Contenido armónico de la onda de voltaje de salida y su orden para un inversor de dos niveles.

En la Figura 3.4 al igual que en caso anterior se muestra un análisis detallado de cada armónico, en la frecuencia que se produce y el porcentaje que alcanza con respecto al 1er armónico. Así como el THD (Total Harmonic Distortion) de su onda de voltaje de salida.

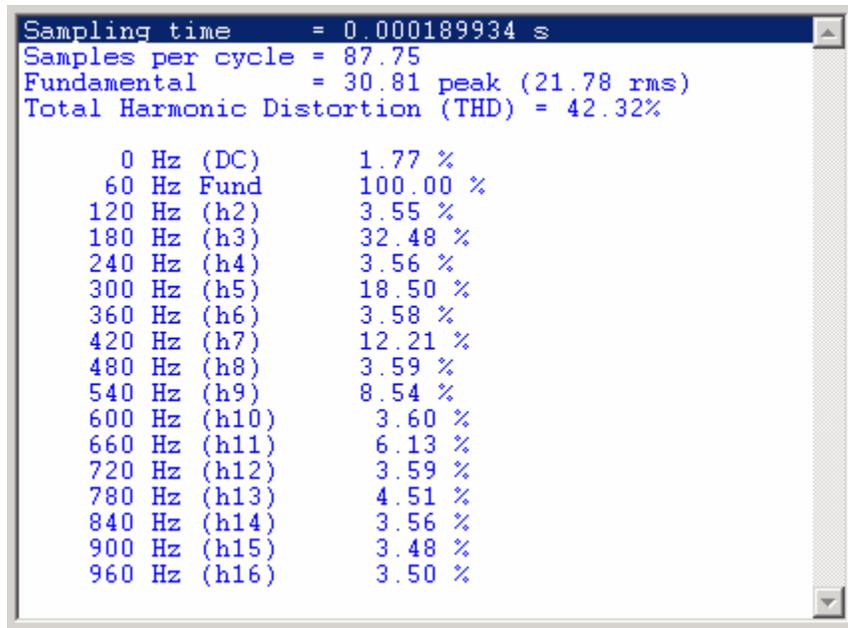


Figura 3.4 Listado de armónicos de la onda de del voltaje de salida en un inversor de dos niveles.

En la Figura 3.5 se puede apreciar como en el inversor de tres niveles, disminuye el THD (Total Harmonic Distortion) y el tercer armónico, con respecto al inversor de dos niveles.

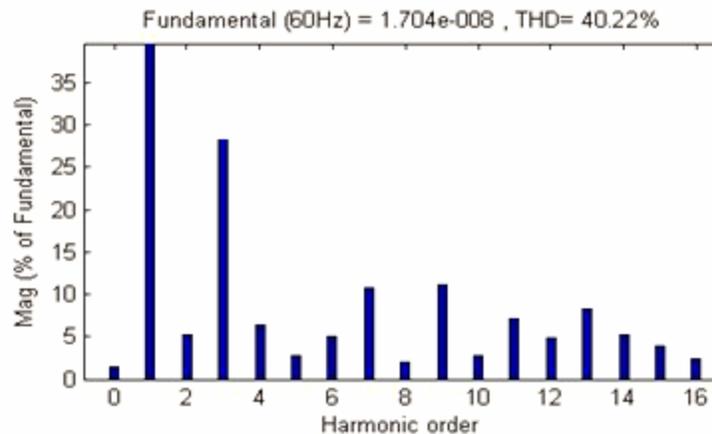


Figura 3.5 Contenido armónico y su orden de la onda de voltaje de salida para un inversor de tres niveles.

La disminución se hace evidente en la Figura 3.6 en la que ya se observa una disminución del THD (Total Harmonic Distortion), en un 2.1% y del tercer armónico, en 3.81%.

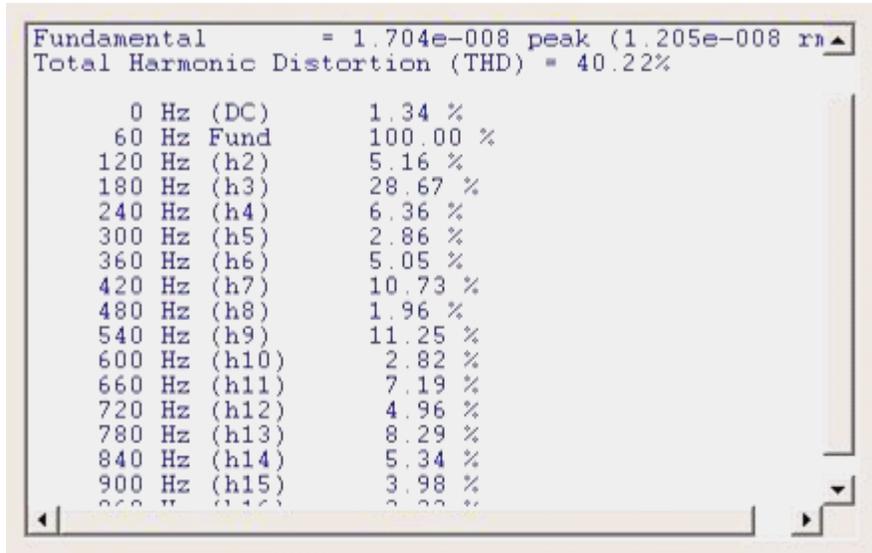


Figura 3.6 Listado de armónicos de la onda de salida de en un inversor de tres niveles.

En este esquema de la Figura 3.7 se puede ver que continúa disminuyendo la distorsión total cuando aumenta el número de niveles.

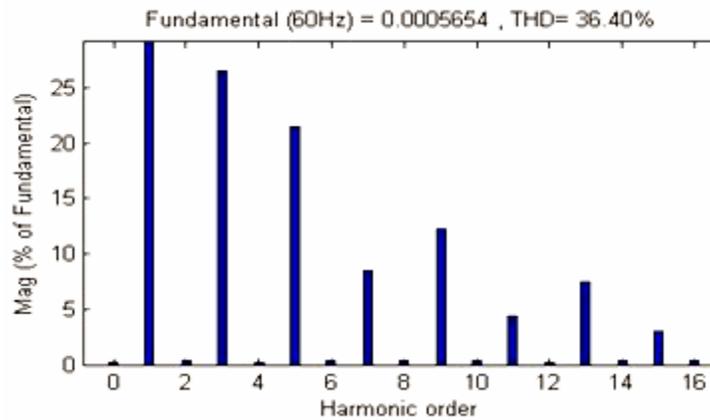


Figura 3.7 Contenido armónico y su orden para un inversor de CC\CA de cinco niveles.

El THD con respecto al inversor de tres niveles ha caído en 3.82% y el valor del tercer armónico experimenta una caída de un 2.16%. Ver Figura 3.8.

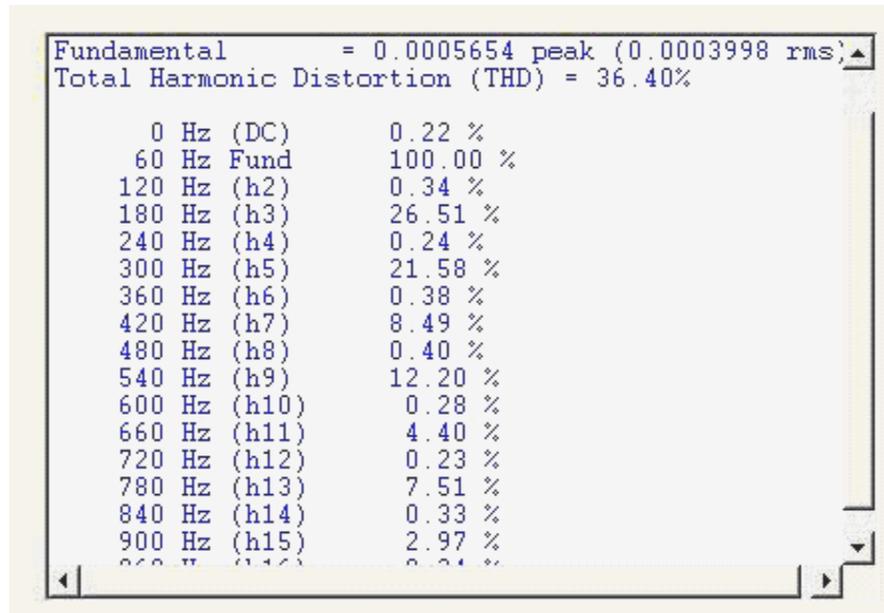


Figura 3.8 Listado de armónicos de la onda de salida de un inversor de cinco niveles.

Modulación en escalera.

Además de la modulación senoidal para el control de inversor se utilizó la modulación en escalera, esta modulación compara una señal escalonada, denominada moduladora, con una señal denominada portadora, usualmente de forma de onda triangular, en algunos casos tipo diente de sierra, presenta una baja frecuencia de conmutación, además se emplea en convertidores de alta potencia. Es fácil de comprobar que el voltaje óptimo no presenta un buen espectro armónico, ofrece una respuesta dinámica más lenta que la modulación senoidal, esto es causa de la baja frecuencia de conmutación que posee.

En las Figuras 3.9 y 3.10 se muestran el bloque de control utilizado y las señales que se obtienen a la salida de este bloque.

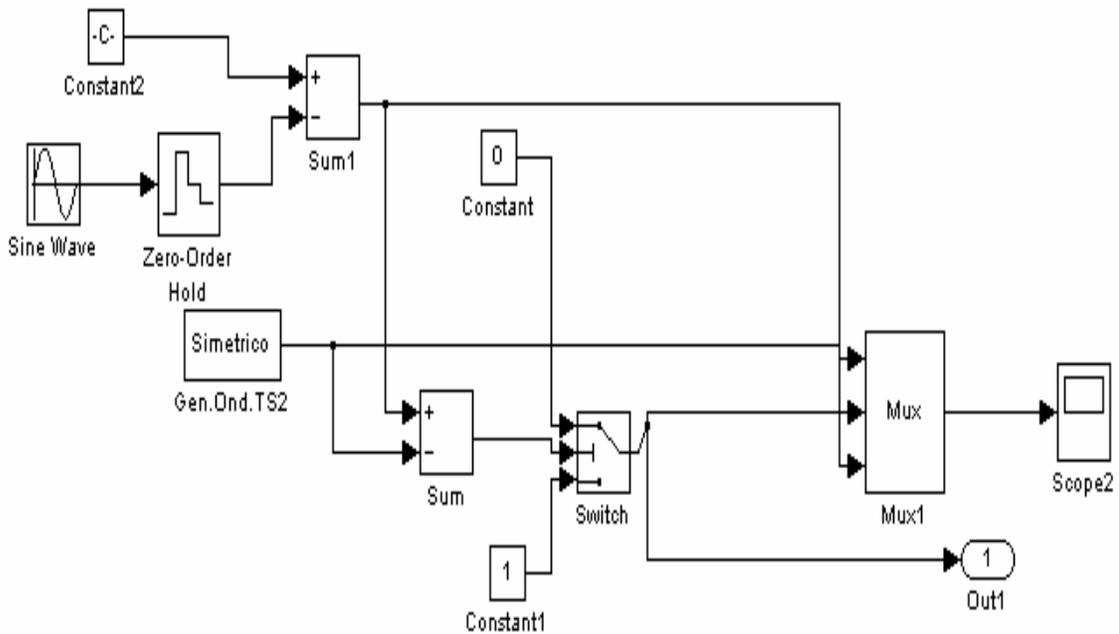


Figura 3.9 Bloque de control de la modulación en escalera.

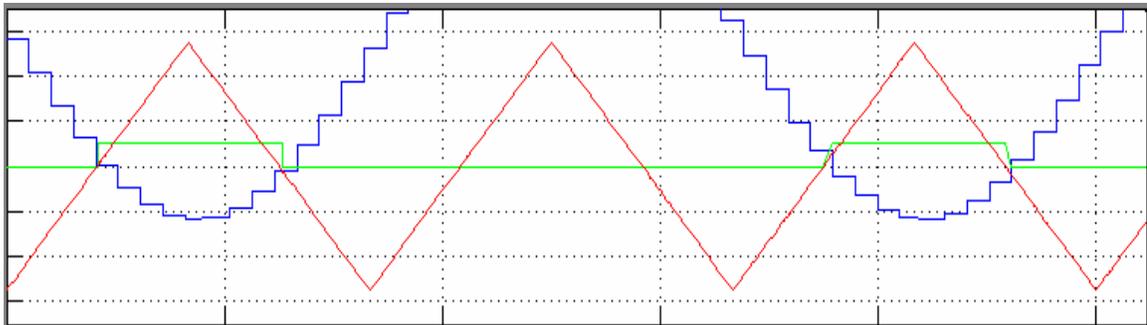


Figura 3.10 Gráfico de la señal de pulsos de la parte Positiva o 1er momento.

Análisis de armónicos

En el gráfico de la Figura 3.11 se muestra un esquema de barras que refleja el contenido de los armónicos de manera gráfica con el orden cada armónico para el inversor de dos niveles.

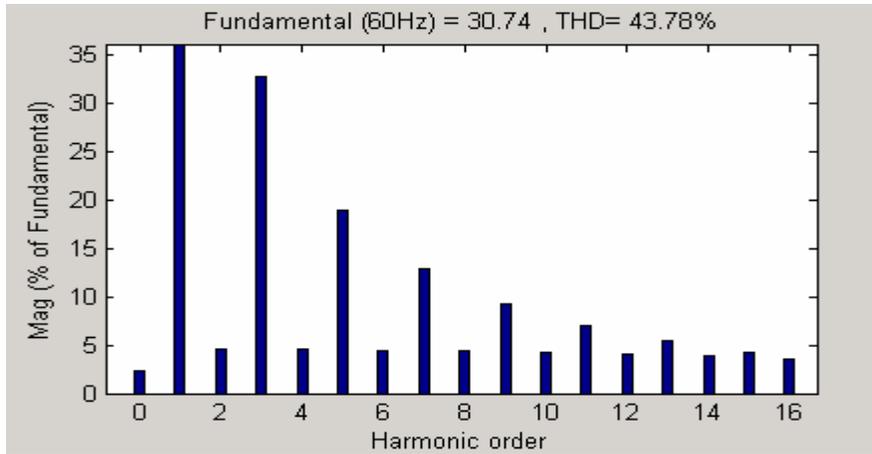


Figura 3.11 Contenido armónico de la onda de voltaje de salida y su orden para un inversor de dos niveles.

Ya en la Figura 3.12 se muestra un análisis más detallado de cada armónico, en la frecuencia que se produce y el por ciento que alcanza con respecto al 1er armónico. Así como el THD (Total Harmonic Distortion) de su onda de voltaje de salida.

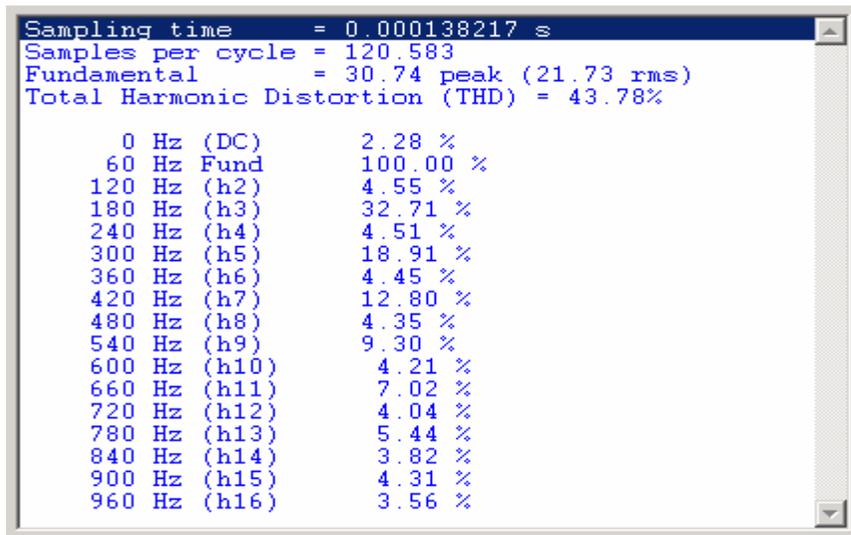


Figura 3.12 Listado de armónicos de la onda de del voltaje de salida en un inversor de dos niveles.

En la Figura 3.13 como rasgo significativo se puede apreciar además de sus estándares armónicas, una disfunción del THD (Total Harmonic Distortion), así como del valor absoluto que alcanza cada armónico, teniendo en cuenta el tercer armónico, siendo este el más dañino.

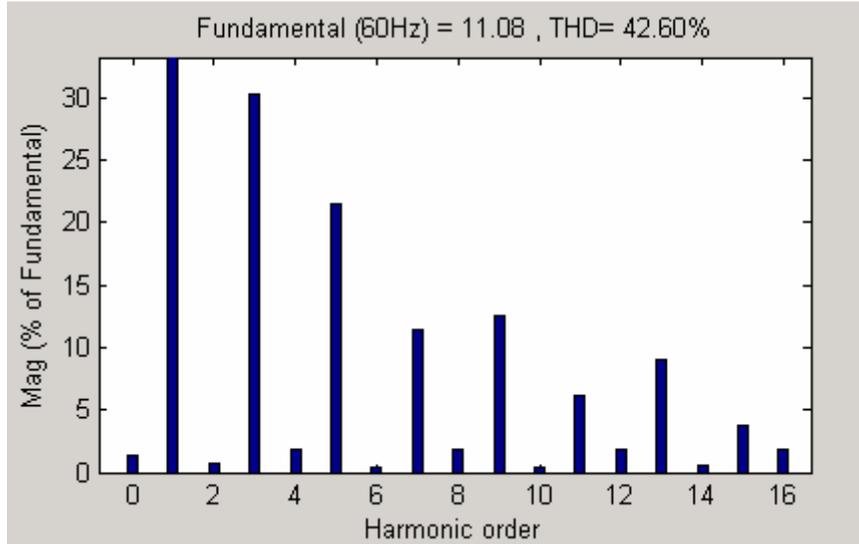


Figura 3.13 Contenido armónico y su orden de la onda de voltaje de salida para un inversor de tres niveles.

La disminución se hace clara en la Figura 3.14 en la que ya se puede apreciar una disminución del THD (Total Harmonic Distortion), en un 1.18% y del tercer armónico, en un 2.47%.

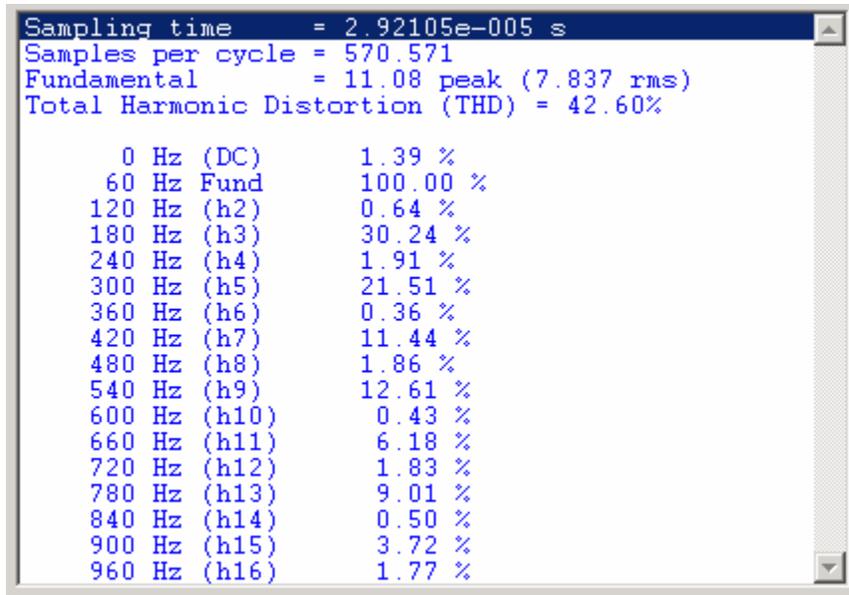


Figura 3.14 Listado de armónicos de la onda de salida de en un inversor de tres niveles.

En este esquema de la Figura 3.15 se puede ver que continúa disminuyendo la distorsión total de los armónicos a medida que aumentan los niveles del inversor.

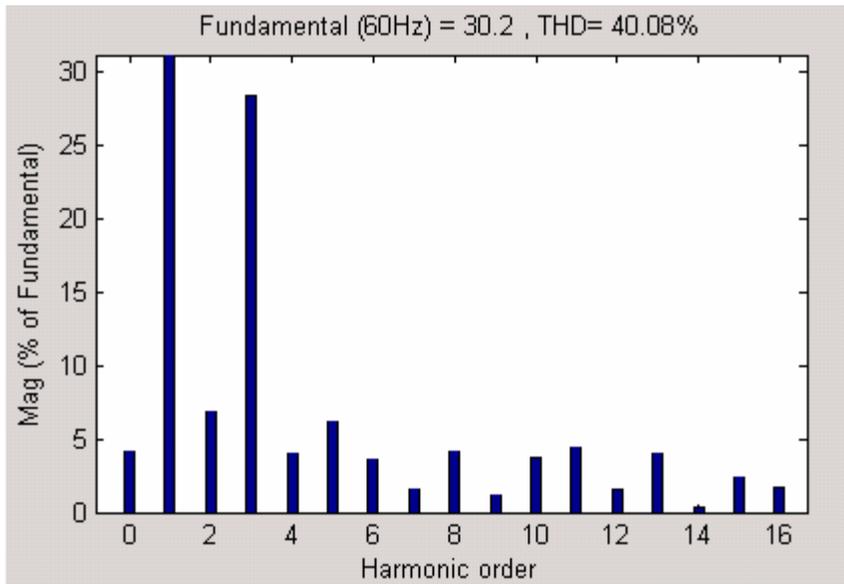


Figura 3.15 Contenido armónico y su orden para un inversor de CC\CA de cinco niveles.

En la Figura 3.16 también se puede apreciar que el THD (Total Harmonic Distortion) con respecto al inversor de tres niveles ha caído en 2.52% y el valor del tercer armónico experimenta una caída de un 1.92%.

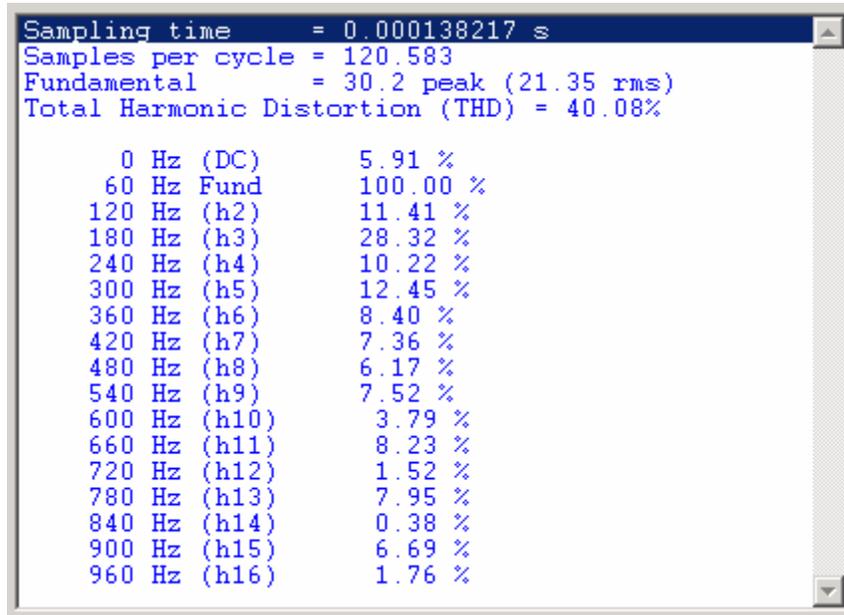


Figura 3.16 Listado de armónicos de la onda de salida de un inversor de cinco niveles.

Se puede notar la disminución del THD (Total Harmonic Distortion) y los armónicos a medida que aumenta el número de niveles.

3.2 Comparación de las técnicas de modulación estudiadas.

Una de las afecciones fundamentales que tienen los inversores, a la hora de su implementación para ser conectados a la red, es el contenido armónico que pueda llevar su onda de salida. No obstante, a su vez, uno de los atractivos de la tecnología multinivel de inversores de corriente, lo constituye esta componente armónica que los caracteriza; ya que si bien es cierto, que se hace más complejo en cuanto a su control y que se incrementa la cantidad de componentes, con el aumento del número de niveles del inversor, también podemos afirmar que ocurre de una disminución notable en el contenido armónico de onda. Por eso se hace este sencillo estudio comparativo entre estas modulaciones: la senoidal y en escalera.

Para una mejor comprensión, a la hora de realizar una comparación con los resultados obtenidos, de manera más significativa, sería bueno referirse a su distorsión general y al valor eficaz en por ciento, que alcanza el tercer armónico en cada uno.

A continuación en las Figura 3.17 y Figura 3.18 se representa gráficamente la disminución en cada modulación del THD (Total Harmonic Distortion) y del tercer armónico.

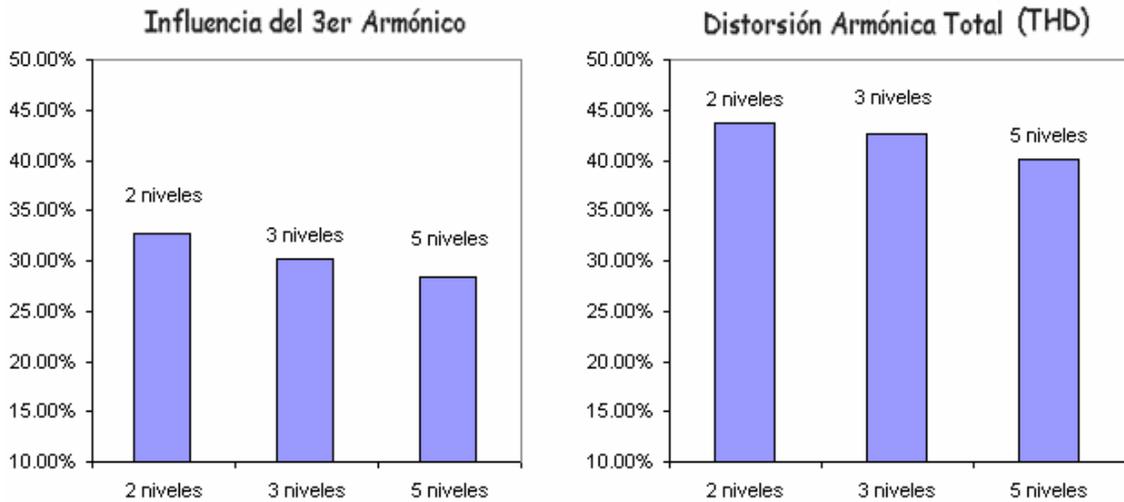


Figura 3.17 Balance comparativo general de (a) del tercer armónico (b) del THD entre los tres tipos de inversores simulados. (Modelación en escalera).

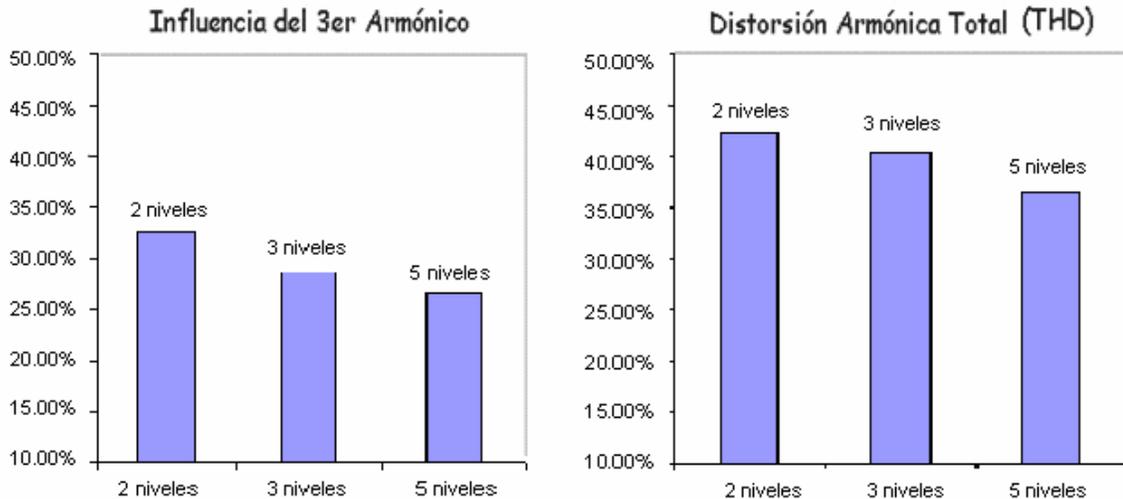


Figura 3.18 Balance comparativo general de (a) del tercer armónico (b) del THD entre los tres tipos de inversores simulados. (Modelación senoidal).

Al comparar estas dos modulaciones se llega a la conclusión que tanto el THD (Total Harmonic Distortion) como el tercer armónico disminuyen a medida que aumentan los niveles.

En la modulación en escalera el tercer armónico en el tercer y quinto nivel disminuyen en un 2.47 y 1.92 por ciento respectivamente y el THD disminuye en un 1.18 y 2.52 por ciento.

En la modulación senoidal también disminuyen pero en mayor promoción. El tercer armónico se reduce en un 3.81 en el inversor de tres niveles y 2.16 por ciento para el de cinco niveles, mientras que el THD (Total Harmonic Distortion) se reduce en el tercer y quinto nivel en un 2.1 y 3.82.

Se llega a la conclusión que la modulación senoidal reduce mejor el tercer armónico y el THD en cada nivel, que la modulación en escalera. Por lo que los resultados del convertidor van a ser mejores en los que tengan la modulación senoidal que los que posean la modulación en escalera.

CONCLUSIONES.

1. Las técnicas de conversión multinivel se han consolidado como una opción competitiva para la conversión de energía en el rango de media-alta potencia y presenta un gran potencial para una amplia aplicación en el futuro
2. En los inversores multinivel a medida que aumentan los niveles de voltaje en la entrada del bus de continua, la distorsión armónica total de la onda de salida disminuye conformándose una onda más sinusoidal.
3. Debido al aumento de niveles, el número de interruptores también aumenta, por tanto la complejidad del control se hace más significativa.
4. La configuración multinivel recomendable a emplear en aplicaciones fotovoltaicas es la de tres niveles, debido a que se obtiene mejores características en la señal de salida que en configuración de dos niveles y la complejidad del control es menor que en el caso de el inversor de cinco niveles.
5. La estrategia de control recomendada para la configuración de inversor propuesta es la modulación senoidal del ancho del pulso.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Referencias

- [1] B. Velaerts, P. Mathy, Z. F. Zendaoui, 'Study of 2 and 3.
- [2] C. Newton, M. Sumner, 'Multilevel convertors. A real solution to medium/high voltage drives?' Power Engineering Journal. (accedido 12/6/07).
- [3] http://www.consumer.es/web/es/medio_ambiente/energia_y_ciencia/2006/02/09/149277.php (accedido 6/5/07).
- [4] <http://www.cuba.cu/noticias.php?idnoticia=17920&orden=6> (accedido 8/5/07).
- [5] http://www.docrenewableenergy.info/es_f-28%7Ed-52442%7En-energias+renovabl+solar+fotovoltaica+Propuesta+para+el+Desarrollo+de+la+Energ%C3%ADa+Solar+Fotovoltaica.PDF%7E (accedido 6/5/07).
- [6] <http://www.ecologistasenaccion.org/spip.php?article2105> (accedido 6/5/07).
- [7] <http://www.enbuenasmanos.com/articulos/muestra.asp?art=1558> (accedido 8/5/07)
- [8] <http://www.energia.inf.cu/PAEC/conten/energias/energias-renovables.htm> (accedido 8/5/07).
- [9] H. L. Liu, G. H. Cho, 'Three-Level Space Vector PWM in Low Modulation Region Avoiding Narrow Pulse Problem', IEEE Trans. On Power Electronics. (accedido 13/6/07).
- [10] <http://www.iie.org.mx/boletin042003/art2.pdf> (accedido 15/5/07).
- [11] J. Rodríguez, P. Corre, L. Moran, 'A Vector Control Technique for Medium Voltage Multilevel Inverter'. Applied Power Electronic Conference and Exposition (APC'01). (accedido 12/6/07).
- [12] Pontificia Universidad Católica de Chile. Escuela de Ingeniería.

- [13] <http://www.portalsolar.com/energia-solar-efecto-fotovoltaico.html> (accedido 6/5/07)
<http://www2.ing.puc.cl/power/paperspdf/dixon/tesis/Elgueta.pdf> (accedido el 8/6/07).
- [14] <http://revista.robotiker.com/revista/articulo.do;jsessionid=5DE1FB1C66AA14F55511AB54167E7322?method=detalle&id=31> (accedido 15/5/07).
- [15] S. K. Mondal, B.K. Bose, V. Oleschuk, J. Pinto, 'Space Vector Pulse Width Modulation of tree.
- [16] <http://saecsaenergiasolar.com/fotovoltaico/introduccion/> (accedido 6/5/07).
- [17] <http://solarfotovoltaica.galeon.com/ARCHIVOS/efecto.htm> (accedido 6/5/07).
- [18] Tesis Doctoral en Xarxa. Publicaciones
http://www.tdx.cesca.es/TESIS_UPC/AVAILABLE/TDX-0104105-081901//02Sam02de15.pdf (accedido 8/6/07).
- [19] Y.Shakweh, E. E. Lewis, 'Assesment os Médium Voltaje PMW Topologies for Multi-Megawatt Variable Speed Drivers Application;. IEEE Power Electrinics Specialists Conference (PESC'99). (accedido 12/6/07).

Bibliografía

- Desarrollo de las celdas fotovoltaicas www.tandar.cnea.gov.ar/grupos/solar/celdas.html.
- Gabriel Salas , "Jornadas sobre Energia Renobables en la Comunidad de Madrid.." 24 abril de 2005.
- J.D. Aguilar, P.J. Peres, J de kas casa, C "Calculo de la energia generada por un sistema fotovoltaico conectado a la red: Aplicación docente." ((accedido el 8/6/07).
- Jose Antonio Beristain Jiménez."Inversores bidireccionales con aislamiento para aplicaciones de energias renobables." Tesis doctoral July 2005.
- Salvador Alepus Menendez, tesis doctoral Aprtacion al control del convertidor.
- Solartronic: Energía Solar. www.solartronic.com/Sistemas_Fotovoltaicos