

CAPITULO 1

ESTADO DEL ARTE

1.1 Introducción

El consumo global de energía eléctrica incrementará de 14,275 TWh en el 2002 a 26,018 TWh en el año 2025 (Figura 1.1), en un aumento promedio del 2.4 % anual de acuerdo a la Administración de Información de la Energía de Estados Unidos de Norte América (EIA, por sus siglas en inglés) [11] [13].

Dado que muchos países han ratificado el tratado de Kyoto, el cual tiene como objetivo la reducción de emisiones de gases de invernadero, se estima que los requerimientos para satisfacer la generación adicional de energía no podrán ser logrados por el método tradicional de quema de combustibles fósiles tales como: carbón, petróleo, gas natural, etc. [12] [13].

Esta situación representa una oportunidad significativa para el desarrollo de pequeños sistemas de generación de energía eléctrica, utilizando fuentes alternativas de

energía (solar, eólica, celdas de combustible, etc.); en donde los inversores de estado sólido han demostrado ser la tecnología que permite aprovechar de manera eficiente estas fuentes alternativas [13] [14].



Figura 1.1. El consumo global de energía eléctrica incrementará de 14,275 TWh en el 2002 a 26,018 TWh en el año 2025 [11].

En los pequeños sistemas de generación de energía, el inversor usualmente es la interfase entre la fuente primaria de energía (panel solar, banco de baterías, celdas de combustible, etc.) y la carga monofásica o trifásica, ver figura 1.2 [13] [14].

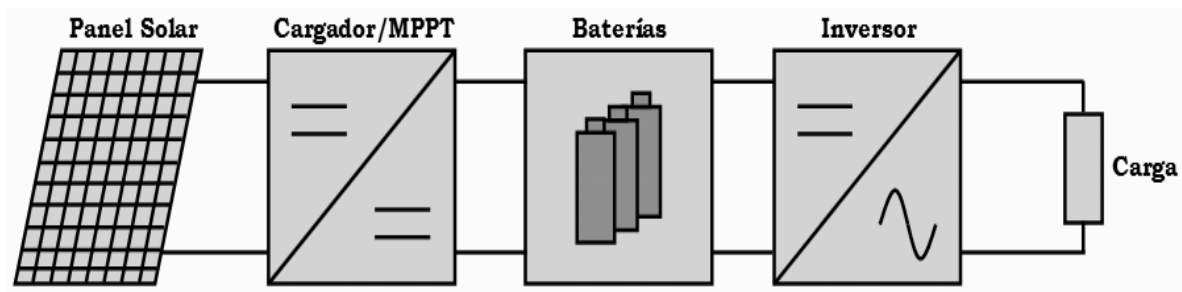


Figura 1.2. Pequeño sistema de generación de energía, el cual utiliza una celda fotovoltaica como fuente primaria de energía [13].

Las funciones de un convertidor CD – CA o inversor se pueden resumir en 4 puntos

[13]:

- 1) Conversión de un voltaje de CD, variable o no, a un voltaje de CA, fijo ó variable tanto en amplitud como en frecuencia.
- 2) Asegurar una señal de salida con una baja Distorsión Armónica Total (THD), baja desviación de frecuencia y voltaje.
- 3) Protección a sistemas de generación de potencia eléctrica de valores anormales de voltaje, corriente, frecuencia y temperatura. Se puede incluir el aislamiento eléctrico de ser necesario.
- 4) Obtener una alta eficiencia del sistema, lo cual se logra con un control óptimo del flujo de energía.

Las aplicaciones de los inversores son muy variadas, pero se pueden agrupar en las siguientes áreas [13] [15]:

- 1) Control de motores, donde la frecuencia y la tensión de salida deben ser variables.
- 2) Sistemas de alimentación ininterrumpibles, donde la frecuencia y tensión de salida son fijas.

- 3) Filtros activos, para reproducir distorsiones en la red eléctrica y mejorar la forma de onda de la tensión de línea.

Su importancia deriva de la amplia utilización de este tipo de convertidores, sin embargo, presentan ciertas limitantes debido principalmente a los dispositivos semiconductores y a las técnicas de modulación empleadas en ellos [13] [15].

Los inversores pueden tener aislamiento eléctrico entre la entrada y la salida, dicho aislamiento se puede lograr utilizando transformadores que manejen la frecuencia de línea (60 o 50 Hz), ver figura 1.3, o transformadores de alta frecuencia tal como se muestra en la figura 1.4 [13] [15].

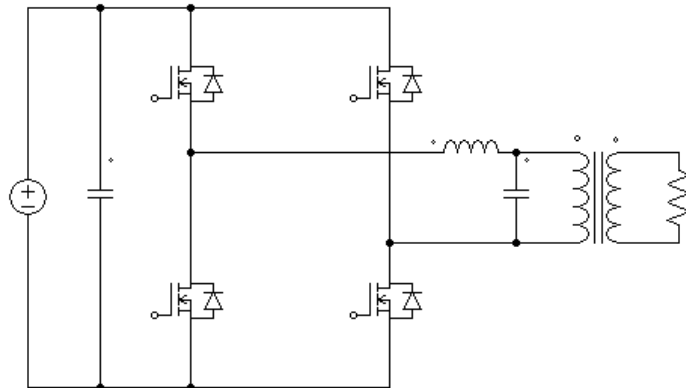


Figura 1.3. Inversor de puente completo con aislamiento eléctrico, mediante transformador de frecuencia de línea [13] [14].

Dependiendo de la capacidad de un inversor para producir una salida mayor o menor, comparada con el voltaje de entrada, los inversores pueden clasificarse en: Inversor Reductor, Inversor Elevador o Inversor Reductor – Elevador. En las figuras 1.3 y 1.4

podemos observar que la etapa inversora (Puente H) por si sola es reductora, la topología completa logra la capacidad de elevación (Inversor Elevador o Reductor – Elevador) mediante Modulación por Ancho de Pulso (PWM) o elevación de voltaje mediante transformadores de alta o baja frecuencia [13] [14].

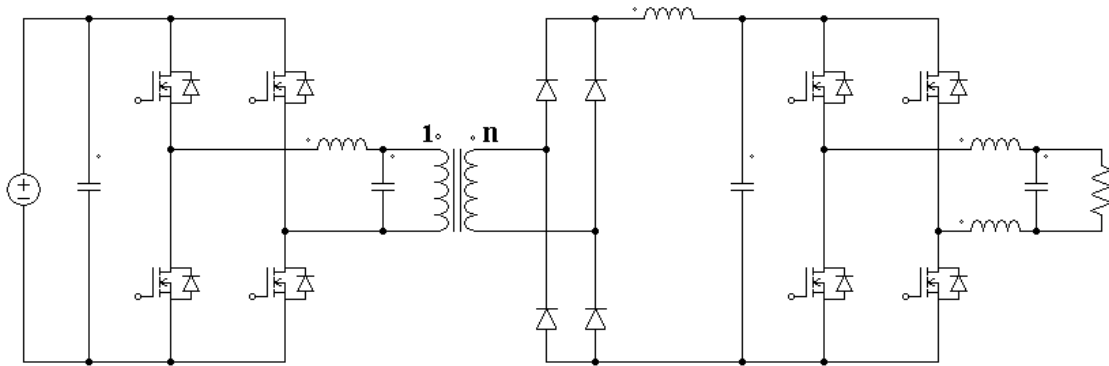


Figura 1.4. Inversor de puente con aislamiento eléctrico, mediante transformador de alta frecuencia [13] [14].

El tradicional inversor de puente completo, considerado como un Inversor Reductor, actualmente se encuentra en muchas aplicaciones de alta potencia. Sin embargo, se continúan utilizando transformadores de baja frecuencia que resultan pesados y voluminosos, lo que trae como consecuencia directa altos costos y una baja eficiencia. Esto lleva a la búsqueda de topologías inversoras cuyas estructuras sean simples, con un número reducido de componentes y un diseño compacto.

La búsqueda de una estructura que fuera capaz realizar una conversión CD – CA y proporcionar un voltaje de salida mayor al de entrada, trajo como consecuencia el diseño de los Inversores Elevadores Multi – Etapa. Estos se definen como aquellos inversores constituidos con más de una etapa de conversión de energía. En este tipo de inversor se

cuenta con una o más etapas que efectúan la elevación de voltaje y aislamiento eléctrico, de ser necesario, mientras que la última etapa realiza la conversión CD – CA. Los Inversores Multi – Etapa se pueden clasificar en 3 grupos [13] [14]:

- 1) Topologías CD – CD – CA;
- 2) Topologías CD – CA – CD – CA;
- 3) Topologías CD – CA – CA.

A continuación se hace una breve revisión de algunas estructuras de inversores elevadores monofásicos.

1.2 Topologías de Inversores Elevadores Monofásicos

1.2.1 Inversores Multi - Etapa

Como ya se ha mencionado, este tipo de inversores cuentan con más de una etapa de conversión de energía. Por ejemplo, en un inversor elevador de dos etapas, la primera eleva el voltaje de entrada y proporciona aislamiento eléctrico, si así se requiere, mientras que la segunda etapa realiza la inversión del voltaje de entrada. Cada etapa puede ser controlada individualmente o de manera sincronizada [13] [14].

Para conseguir que un inversor logre la función de Reductor – Elevador se han desarrollado algunas topologías de múltiples etapas. Mientras que para lograr la operación

de reducción o elevación, se puede utilizar un convertidor CD – CD o CD – CA – CD como primer etapa. El acoplamiento de CD (DC Link) se puede realizar con un Bus de CD seguido de un inversor PWM, o con un Seudo Bus de CD seguido de un inversor operado a la frecuencia de línea (50 Hz o 60 Hz) [13] [14].

1.2.1.1 Topologías CD – CD – CA

Si se agrega un convertidor CD – CD elevador entre la fuente primaria de energía y un inversor reductor, se obtiene un Inversor Elevador de Dos Etapas, ver figura 1.5. Esta topología es comúnmente usada en sistemas para generación de energía eólica [13] [14] [15].

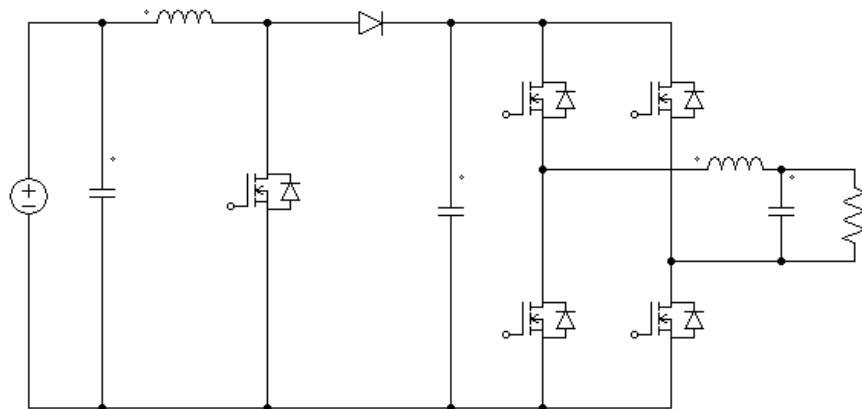


Figura 1.5. Inversor Elevador Multi – etapa [13] [14].

En esta estructura, de la primera etapa se obtiene un voltaje de CD elevado, con un rizo aceptable, mientras que como segunda etapa se utiliza un inversor reductor PWM para generar el voltaje de CA. En este caso, no es necesario sincronizar las etapas y la potencia de salida es controlada en la segunda etapa [13] [14].

Una forma de reducir el costo de la topología es omitiendo el capacitor del Bus de CD. Esto se logra controlando la primera etapa de tal manera que genere una senoidal rectificada de onda completa. Por lo que la segunda etapa solo debe convertir dicha forma de onda en una señal de salida alterna, tal como se muestra en la figura 1.6b [13] [15] [16] [17] [18].

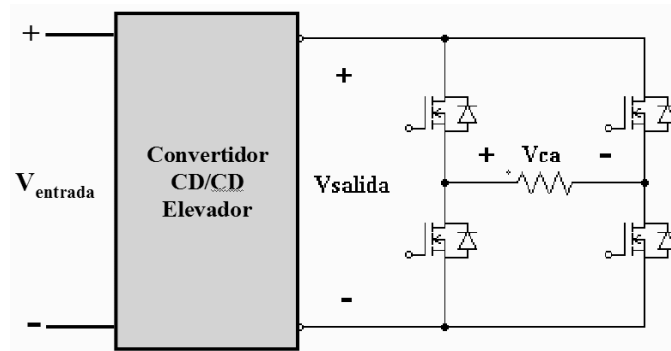


Figura 1.6. a) Inversor elevador sin Bus de CD [13].

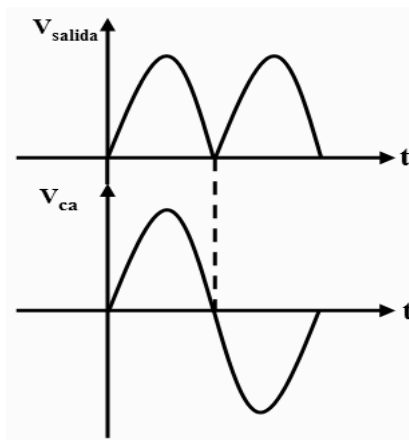


Figura 1.6. b) Principales formas de onda [13].

En la figura 1.7 se muestra un Inversor Reductor – Elevador. El voltaje de entrada es procesado primero por la etapa Elevadora – Reductora, en la primera parte del ciclo de conmutación, la energía es almacenada en el capacitor intermedio C_s . En la segunda etapa del ciclo, el convertidor Flyback procesa dicha energía. Por último en la tercera etapa, la energía almacenada en la inductancia de magnetización es transferida al devanado secundario del transformador. Antes de suministrarse a la carga, el voltaje de salida del Flyback debe ser filtrado (C_f y L_f) [13] [20] [21].

El capacitor intermedio C_s es utilizado como un buffer de energía, donde el voltaje a través de él está formado por una componente de CD y una de CA. La componente de alterna tiene el doble de la frecuencia que el voltaje aplicado a la carga (100 / 120 Hz). El beneficio de esta topología es la opción de poder utilizar un capacitor de pequeño valor, en vez de un capacitor electrolítico de gran valor de capacitancia [13] [20] [21].

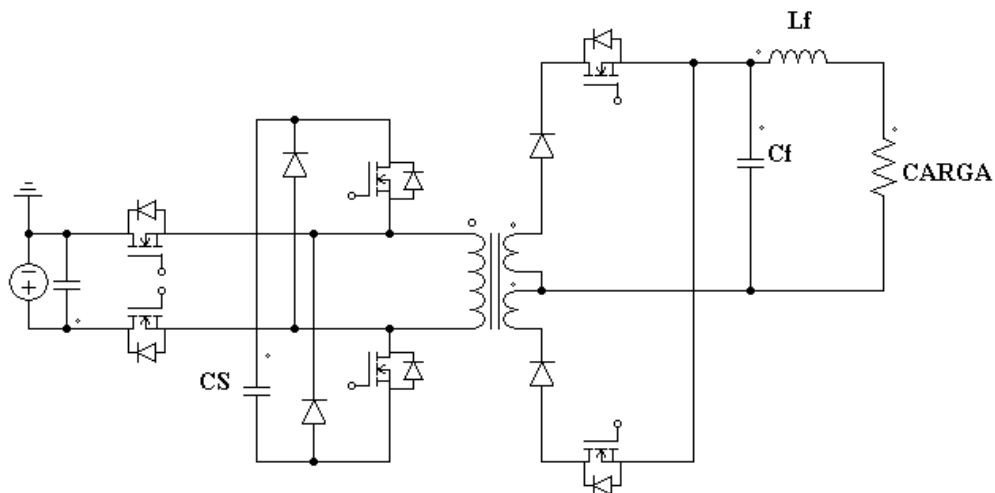


Figura 1.7. Inversor Reductor – Elevador [13].

1.2.1.2 Topologías CD – CA – CD – CA

Si se requiere tener un acondicionamiento mayor de la entrada en CD, por ejemplo, cuando se tiene una entrada fluctuante, se puede utilizar un convertidor CD – CA – CD y un inversor operado en alta frecuencia o en frecuencia de línea, para lograr la salida en CA requerida. Las topologías que utilizan la técnica anterior pueden utilizar dos tipos de Buses de CD intermedios [13]:

- 1) Bus de CD tradicional: Se denomina así debido a que el voltaje presente en el Bus es constante o con una fluctuación mínima y sin caer a cero. El inversor mostrado en la figura 1.4 es un ejemplo tradicional, la inversión y la elevación del voltaje de entrada se logra mediante un inversor PWM, un transformador elevador de alta frecuencia, rectificador, filtro de CD y un inversor de frecuencia de línea (50/60 Hz). Dado que existen varias etapas, la eficiencia total del sistema es baja y el costo de construcción es alto.
- 2) Pseudo Bus de CD; Nombrado así debido a que el voltaje presente en el Bus está formado por pulsos PWM de CD. El tren de pulsos consiste en múltiples pulsos, cuyos anchos están distribuidos en forma sinusoidal o semi – sinusoidal. Comparado con la topología de la figura 1.4 el filtro de CD es omitido (ver figura 1.8) y el inversor de la última etapa, quien invierte este tren de pulsos de alta frecuencia en CD, es operado a la

frecuencia de línea (50/60 Hz) para reducir pérdidas por conmutación. Es necesario un filtro pasa bajas para asegurar un THD aceptable del voltaje de salida en CA.

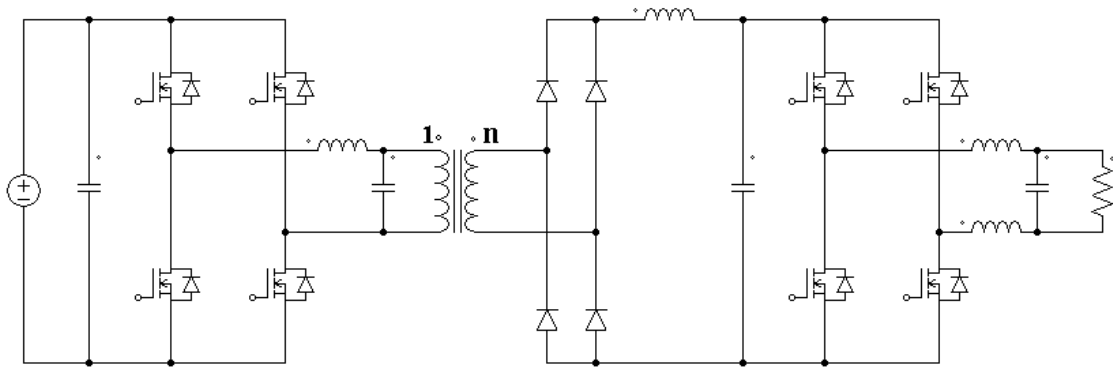


Figura 1.8. Inversor elevador Multi – Etapa con el uso de Pseudo Bus de CD [13] [14].

1.2.1.3 Topologías CD – CA – CA

La figura 1.9 muestra la configuración básica de esta clase de Inversores Multi – Etapa, cuya primera etapa está constituida por un inversor PWM y un transformador de alta frecuencia; la segunda etapa está formada por un convertidor CA – CA conocido como Cicloconvertidor, con lo cual se elimina el Bus de CD intermedio y el filtro pasa bajas de salida. El transformador puede cambiar el nivel del voltaje, que proviene del inversor PWM, mediante una relación de vueltas mayor en el secundario ($1: n$, donde $n > 1$) y además proporciona aislamiento eléctrico [13] [22] [23].

En esta configuración se utiliza la capacidad del Cicloconvertidor para sintetizar una señal de alta frecuencia generada por el inversor PWM, en una señal de menor frecuencia. Esta disminución de la frecuencia reduce las pérdidas por conmutación [13] [22] [23].

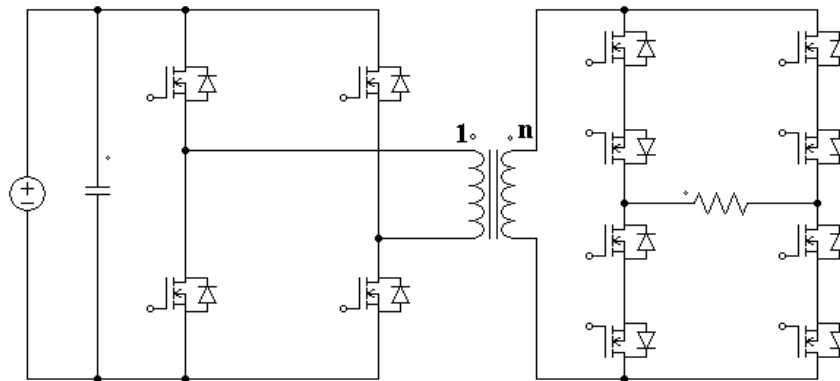


Figura 1.9. Inversor Elevador utilizando un cicloconvertidor a la salida [13].

Como característica importante de esta estructura, se puede mencionar que el voltaje de salida puede ser controlado proporcionalmente mediante la señal senoidal de referencia, utilizada para generar los pulsos PWM, que en este caso es una senoidal rectificadora de onda completa (100/120 Hz) [22] [23].

1.3 Técnicas de Modulación

La técnica más utilizada para generar un voltaje senoidal a la salida de un inversor es la modulación por ancho de pulso (PWM, por sus siglas en inglés) [23] [27]. La figura 1.10 muestra la modulación de un solo ancho de pulso, esta técnica es la manera más

simple de generar una tensión de CA a partir de una tensión en CD. La principal característica de la modulación PWM basada en una portadora [23] [27] consiste en que el filtrado del voltaje de salida es más sencillo, ya que la frecuencia de portadora es generalmente elevada, y por lo tanto el tamaño del filtro a la salida del inversor es reducido. Sin embargo, esta técnica presenta algunas desventajas, entre las cuales se pueden mencionar las siguientes:

- ❖ Atenuación de la componente fundamental del voltaje PWM.
- ❖ Incremento de las frecuencias de conmutación, lo cual significa un esfuerzo mayor en los dispositivos de potencia asociados, y por lo tanto, una degradación de los mismos.
- ❖ Generación de componentes armónicos de alta frecuencia.

1.3.1 Modulación De Un Solo Ancho De Pulso

Esta técnica proporciona a la salida un solo pulso de tensión cada medio ciclo. Por esta razón, el contenido armónico es alto y se obtiene que su armónico dominante es el tercero. Como ventaja se tiene que es fácil de implementar y además que las pérdidas por conmutación en los dispositivos semiconductores son bajas. Su forma de onda para la tensión entre fases en un sistema trifásico se muestra en la figura 1.10.

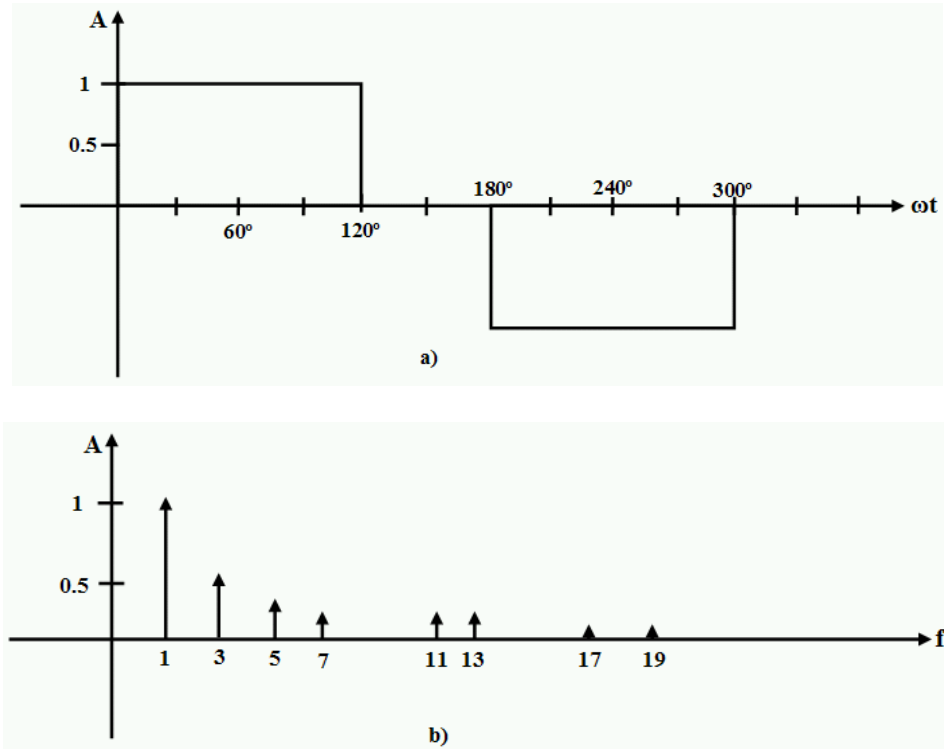


Figura 1.10. Modulación de un solo ancho de pulso, a) voltaje de salida, b) contenido armónico.

1.3.2 Técnica PWM Senoidal

Esta técnica se basa en la comparación de niveles de tensión entre una portadora (señal triangular o rampa) y una señal moduladora de referencia (señal senoidal). La tensión de salida y el contenido armónico se muestra en la figura 1.11 [26] [27].

Su principal ventaja consiste en que genera un espectro de CA sin armónicos de bajo orden. La principal desventaja de esta técnica en un sistema trifásico es que la máxima ganancia posible en CA (G_{CA}) es igual a 0.866 en la tensión entre fases. En muchas

aplicaciones la ganancia en CA se tiene que elevar mediante el uso de un transformador lo cual es un inconveniente [26].

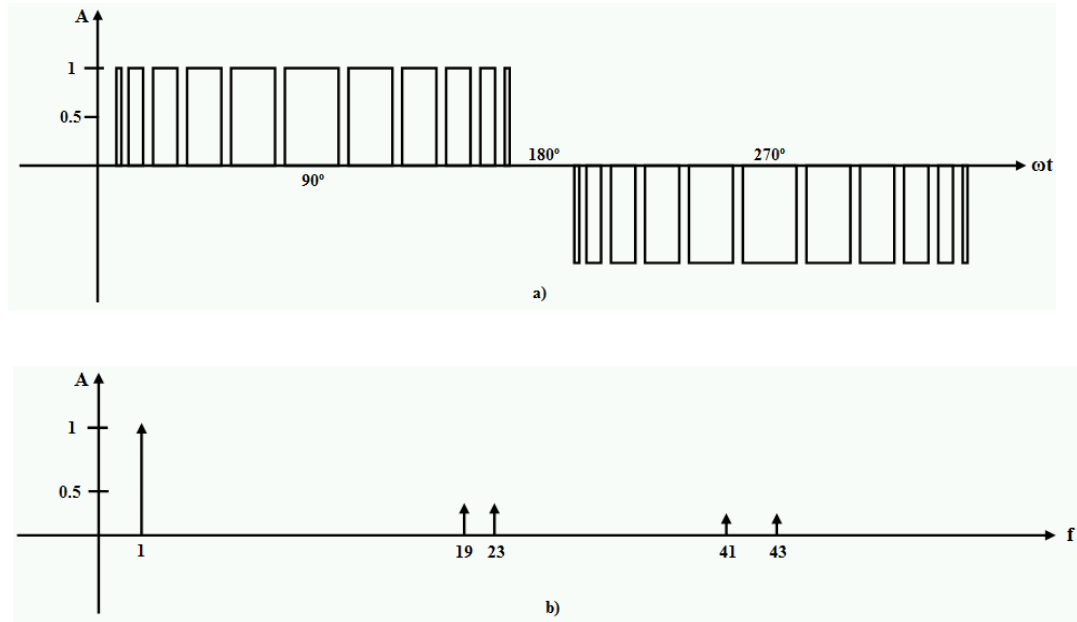
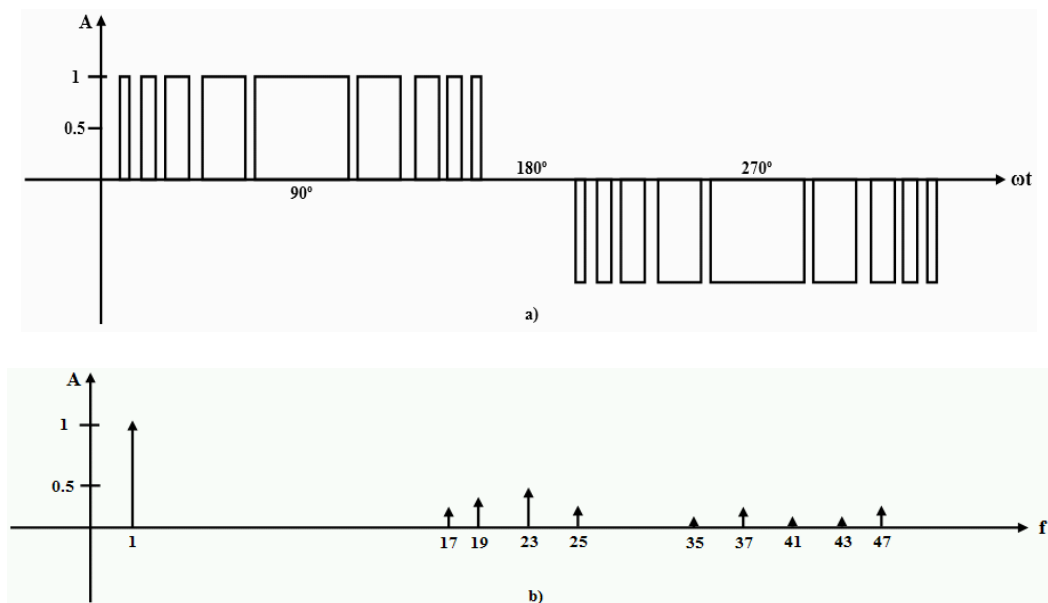


Figura 1.11. Modulación PWM senoidal, a) voltaje de salida, b) contenido armónico [26].

Sin embargo, el filtrado a la salida del inversor para obtener la señal fundamental es más eficiente, debido a que la frecuencia de conmutación es alta, básicamente la de la portadora f_c . Lo anterior reduce el tamaño del filtro en la salida, pero debido a la frecuencia a la que están conmutando los dispositivos semiconductores aumentan las pérdidas por conmutación [26].

1.3.3 Técnica PWM Senoidal Modificada (MSPWM)

Esta técnica proporciona un aumento en la ganancia de CA, comparada con la técnica PWM senoidal. Sin embargo, su implementación es más compleja. También, genera un aumento de alrededor del 21% en comparación con la técnica anterior en el tercer armónico de CA de línea a neutro en el caso de un inversor trifásico. La salida de tensión y de contenido armónico se observa en la figura 1.12 [26] [27].



1.12. Modulación PWM senoidal modificada, a) tensión de salida, b) contenido armónico [26].

La técnica MSPWM presenta ventajas sobre técnica PWM senoidal respecto al tamaño del filtro de salida, pero las pérdidas por conmutación siguen siendo elevadas. Aun así, presenta un mejor desempeño [26].

1.4 Problema De Tierras (Grounding)

La importancia de la utilización de una referencia física a tierra, en un pequeño sistema de generación de energía (PSGE), radica en la necesidad de aumentar la seguridad durante el mantenimiento del PSGE. Además se logran las siguientes ventajas [13] [14]:

- ❖ Protección contra descargas atmosféricas,
- ❖ Disminución del acoplamiento magnético (EMC, por sus siglas en inglés),
- ❖ Protección contra pulsos electromagnéticos (EMP, por sus siglas en inglés).

La referencia física a tierra se utiliza en aplicaciones en donde el nivel de voltaje de CD de entrada supera los 100 Voltios. Al mismo tiempo, un inversor monofásico conectado a la línea de distribución de energía, el cual posea una conexión de línea a neutro, debe utilizar dicha referencia física a tierra [13].

Las topologías con aislamiento físico, entre el PSGE y las líneas de distribución de energía no tienen problemas en la utilización de dicha referencia. Sin embargo, la mayoría de las topologías sin aislamiento no pueden cumplir con dicho requerimiento. Esto puede traer como consecuencia que no puedan utilizarse en aplicaciones que requieran conexión a las líneas de distribución de energía [13] [14].

La figura 1.13 muestra un inversor con capacidad elevadora, el cual tiene una naturaleza inherente para la utilizar una referencia física a tierra, tanto en el PSGE y en la línea de distribución. Por otro lado, en la figura 1.14 se muestra otro inversor con capacidad elevadora; dicha topología puede ser controlada, para lograr el aislamiento eléctrico entre el PSGE y la línea de distribución de energía, mediante la utilización de dos transistores de potencia adicionales (E y F) [13].

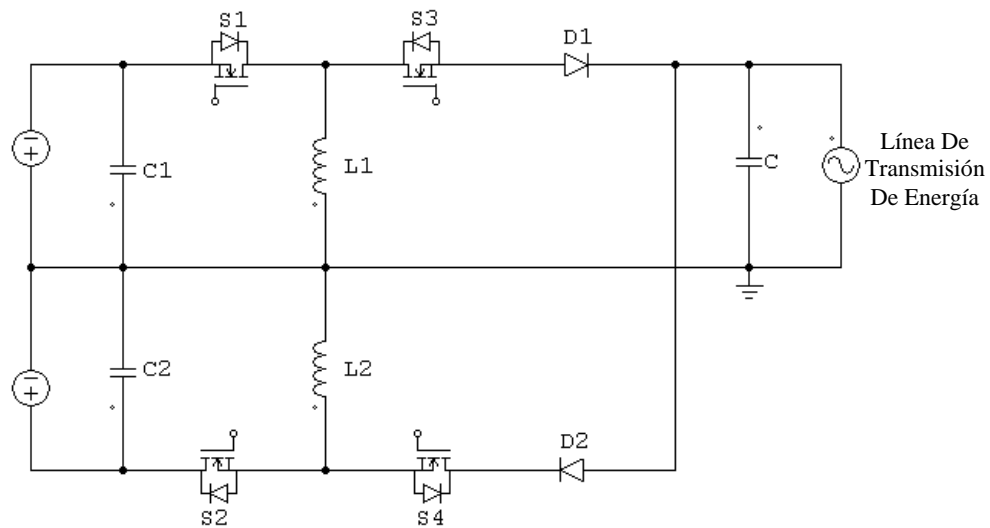


Figura 1.13. Inversor Reductor – Elevador propuesto por Kasa et al. [13].

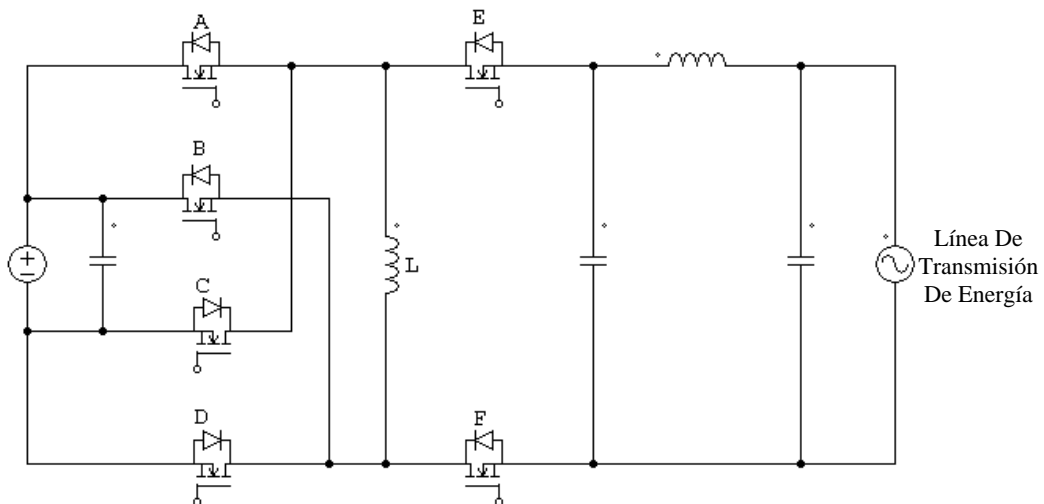


Figura 1.14. Inversor Reductor - Elevador propuesto por Kusakawa et al. [13].

1.5 Inversor Elevador Mono – Etapa

Con el fin de reducir el número de componentes, para alcanzar una alta eficiencia y bajo costo, en la figura 1.15 se muestra un Inversor Elevador Mono – Etapa que fue propuesto por Ivo Barbi y Ramón O. Cáceres [2] [7].

Este inversor está constituido por dos convertidores elevadores bidireccionales en corriente, ver figura 1.15. Cada uno de ellos produce un voltaje de salida senoidal con un nivel de CD, ambos voltajes de salida están desfasados 180° entre sí. Esto se logra modulando de manera senoidal el ciclo de trabajo D.

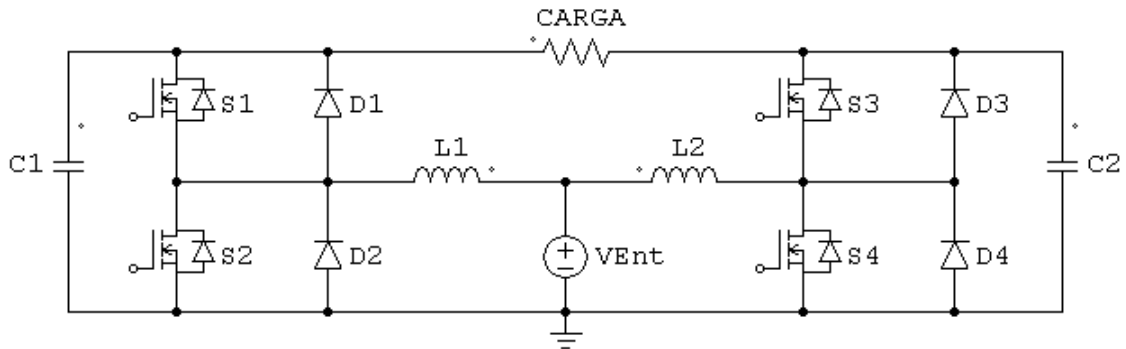


Figura 1.15. Inversor Elevador Mono – Etapa, convertidor constituido por dos convertidores elevadores bidireccionales en corriente.

Esta topología presenta dos Modos de operación, el Modo II fue analizado en el Centro Nacional De Investigación Y Desarrollo Tecnológico por el Ph.D. Nimrod Vázquez Nava [7]. En el capítulo siguiente se analiza el convertidor de la figura 1.15, en su Modo I de operación.

1.5.1 Conmutación Suave

Incrementar la frecuencia de operación de los convertidores de potencia es deseable, ya que esto permite disminuir el tamaño de los componentes magnéticos y capacitores, dando como resultado un circuito mas compacto y de menor costo. Sin embargo, aumentar la frecuencia operación implica tener mayores pérdidas por conmutación, debido a la conmutación dura, y por lo tanto se reduce la eficiencia del sistema [29] – [39].

Una solución a este problema es utilizar un interruptor “resonante” en las topologías de fuentes conmutadas (SMPS, por sus siglas en inglés), el cual utiliza la resonancia de un circuito formado por un inductor y un capacitor (cuyos valores de inductancia y capacitancia, respectivamente, son fijos) para modificar la señal eléctrica, ya sea de voltaje o de corriente, presente en el interruptor. El objetivo de dicha modificación es lograr, en el momento que ocurre la conmutación, que no exista al mismo tiempo voltaje y corriente en el interruptor, disminuyéndose así las pérdidas de potencia por conmutación [29] – [39].

Un circuito que emplee dicha técnica es conocido como un convertidor resonante o convertidor cuasi resonante (QRC, por sus siglas en inglés), cuando solo se utiliza una parte de la forma de onda senoidal obtenida mediante la resonancia. En un convertidor cuasi resonante que utilice conmutación a cero voltaje (ZVS – QRC, por sus siglas en inglés), se modifica la forma de onda de voltaje presente en el interruptor, mientras que en un convertidor cuasi resonante que utilice conmutación a cero corriente (ZCS – QRC, por sus siglas en inglés), la forma de onda de corriente es modificada [34] – [39].

Como ya se ha mencionado, la técnica de cuasi resonancia utiliza dos elementos adicionales, un inductor y un capacitor de valores fijos, para lograr la conmutación suave. El hecho de tener valores fijos de inductancia y capacitancia implica que tanto el tiempo de encendido, para la conmutación a cero voltaje, y el tiempo de apagado, para la conmutación a cero corriente, se mantiene constante.

Esto constituye una fuerte limitante para la aplicación de técnicas de cuasi resonancia al Inversor Elevador Mono – Etapa, estudiado en esta tesis. Esto se debe a que el inversor utiliza un ciclo de trabajo modulado de forma sinusoidal, como se verá en el capítulo II, lo que trae como consecuencia que tanto el tiempo de encendido, y por ende el tiempo de apagado, de los interruptores utilizados no sea constante.

This document was created with Win2PDF available at <http://www.win2pdf.com>.
The unregistered version of Win2PDF is for evaluation or non-commercial use only.