

Desarrollo de un Inversor Monofásico de 150 Watts Aplicado a Sistemas de Iluminación mediante una ISF.

Gabriel López Reyes, Luis Alberto Reyes López, Perla Paola López González,
Tecnológico Nacional de México, Instituto Tecnológico de Toluca,
Departamento de Ingeniería Eléctrica y Electrónica
gabomicros@gmail.com, luisreyes1990@gmail.com, bang12snk@gmail.com.
Meteppec, Estado de México

Resumen

Los dispositivos de la electrónica de potencia son los encargados de trabajar y transformar la energía eléctrica, se emplean en el desarrollo de nuevas tecnologías y topologías favorables para el medio ambiente, la eficiencia de dichos dispositivos propone el desarrollo de nuevas conexiones en las topologías existentes de dichos convertidores. Este trabajo describe el análisis, desarrollo y fabricación de una de las topológicas de elevación de voltaje en corriente directa, mediante el desarrollo de un convertidor o fuente conmutada llamado convertidor BOOST.

El circuito se alimenta de una instalación solar Fotovoltaica (ISF), capaz de alimentar una carga no mayor de 150 Watts, se utilizan un par de convertidores BOOST conectados en paralelo y un inversor monofásico de onda cuadrada, los cuales se encargan de hacer la conversión de corriente directa a corriente alterna (CD-CA).

Para obtener mejores resultados se propone un estudio metodológico para el desarrollo del proyecto, el cual consiste en: Investigar, calcular, desarrollar y probar el convertidor BOOST [1].

Introducción

Debido a la demanda del uso, control, obtención de energía eléctrica y el alto impacto ecológico que tiene la producción de esta, el hombre se ha dado a la búsqueda de controlar las variables voltaje, corriente y frecuencia de conmutación, en los circuitos de fuentes conmutadas.

La energía solar.

Es la energía que aprovecha la luz emitida por el sol para transformarla en energía eléctrica, una forma de obtener energía es la solar y su almacenamiento en baterías para después pueda ser utilizadas en aplicaciones residenciales o industriales y se recolecta de la siguiente manera:

- **Forma Indirecta.** – se aprovecha el sol para calentar un fluido (Puede ser agua) y convertirlo en vapor, con el fin de producir electricidad mediante el movimiento de un alternador.
- **Forma Directa.** – se aprovecha la luz del sol para convertirla en electricidad mediante el uso de celdas solares.

Las instalaciones solares Fotovoltaicas (ISF) se clasifican en dos tipos:

- **Aplicaciones Autónomas.** – producen electricidad sin ningún tipo de conexión a la red eléctrica y suministran energía donde se encuentran instaladas, como son aplicaciones espaciales, terrestres, telecomunicaciones, electrificación de zonas rurales y aisladas, señalización, alumbrado público entre otras aplicaciones.
- **Aplicaciones conectadas a la red eléctrica.** – en este tipo de aplicación se conecta a la energía generada y es vendida al organismo encargado de suministrar la energía eléctrica a las principales ciudades del país, por medio de centrales fotovoltaicas [2].

En la figura 1 se muestran los elementos de la instalación solar fotovoltaica de este proyecto y son:

- Modulo fotovoltaico
- Batería o acumulador
- Regulador de carga

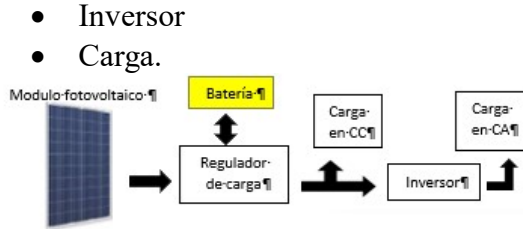


Figura 1.- Elementos de una ISF.

Las celdas de silicio y la tecnología de los paneles solares, los arreglos de conexión en paralelo en celdas solares hacen que trabajen con más corriente y en serie con menos corriente, y mayor voltaje, los tipos de celdas que existen son las de:

- Silicio cristalino (mono cristalino y policristalino).
- Silicio amorfo.

La instalación fotovoltaica se compone de un módulo M55 de la compañía ARCO SOLAR, con las siguientes características eléctricas, las cuales se observan en la siguiente tabla 1.

Tabla 1. Características del módulo M55.

Características Eléctricas	Modelo M55
Potencia (Watts típico +/- 10 %)	53 watts
Voltaje en circuito abierto	21. 8 Volts
Corriente en corto circuito	3.27 Amperes.
Voltaje en plena carga	17.4 Volts
Corriente en plena carga	3.05 Amperes.

En este proyecto se utiliza una batería LTH de aplicaciones solares, modelo L-31T/S-190, las características físicas y eléctricas de la batería LTH y la curva de operación de incidencia solar de 1000W/m² a un máximo de temperatura de 47 °C, se pueden analizar en [3], la tabla 2 muestra que esta batería sirve para el almacenamiento de la energía de este proyecto.

Tabla 2 Características de batería LTH L31T/S-190.

Voltaje	12 V
Peso húmedo	29.84 Kg.
Aplicación fotovoltaica	104 Amper-Hora
Capacidad reserva	190 minutos

El conocimiento de una ISF, es importante para su funcionamiento y la obtención de la irradiación del sol, hace que los módulos solares obtengan la energía en ella [4].

Regulador de carga

Se utiliza un Phocos CX 20, con las características de funcionamiento, se monitorean y se observan en la tabla 3 [5].

Tabla 3. Características eléctricas del regulador.

Características eléctricas	CX20 /CX 10 / CX40
Tensión	12, 24 Volts
Corriente máxima de carga	20 amperes
Tensión de flotación	13.7/28.8
Máxima tensión del campo solar	30/ 50 V c. c.

Los parámetros del proyecto se muestran en la tabla 4 ya con los cálculos del convertidor BOOST en cascada, se tiene una corriente de salida de 1.3 amperes.

Tabla 4 Parámetros de diseño de los convertidores BOOST.

Parámetro	Valor	Definición
V_i	12 V.	Voltaje de entrada
V_{o2}	135 V	Voltaje de salida
I_{o2}	1.5 A.	Corriente de salida
F_{s1}, F_{s2}	40 KHz	Frecuencia de conmutación de los convertidores.
$\Delta V_1, \Delta V_2$	100 mV.	Voltaje de rizo de ambos convertidores.

Los convertidores de energía se clasifican:

- C. A. a C. D. Rectificadores.
- C. D. a C. A. Inversores.
- C. D. a C. D. Convertidores D. C. y
- C. A. a C.A. Convertidores A.C.

En este trabajo se tratará la conversión de energía de C.D a C.D. y C. D. a C. A.

Desarrollo.

El objetivo del proyecto es el desarrollo y construcción de un prototipo de un convertidor doble tipo BOOST de 12 Vc.d de entrada tomado de una batería o celda, para ser filtrado y salida de 135 Vc.d. y 1.5 Amperes de c.d. regulado, conmutado a

40 KHz, controlado por ancho de pulso (PWM), conectado a un puente de 4 MOSFETS canal N, con conmutación de 60 Hz, para que se pueda conectar unas lámparas incandescentes (120-240Vc.a), con un voltaje de salida de 135 V c. a, potencia de salida 150 Watts promedio, con un sistema fotovoltaico, como se observa en la figura 3.

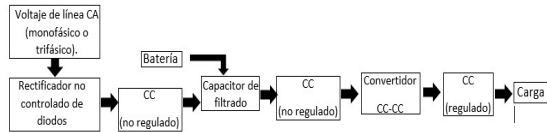


Figura 3 elementos de los 2 convertidores e inversor del proyecto.

La topología de elevación doble de voltaje y corriente directa tipo BOOSTS se observa en la figura 4.

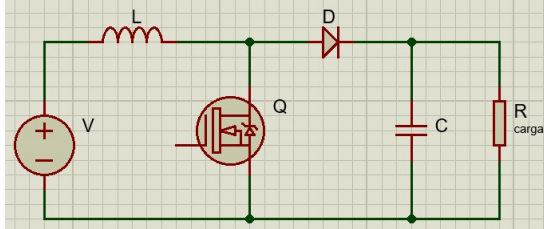


Figura 4. Convertidor BOOST de una etapa.

Esta topología tiene el funcionamiento en dos estados, estado 1, cuando el transistor se pone en saturación (Mosfet cerrado), la corriente de entrada (I_{in}) carga al inductor (L), y el voltaje de salida que suministra a la carga (R_{carga}) es suministrado por el capacitor (C), Para el estado 2 en modo corte, el circuito se abre (Mosfet abierto), la corriente que se encuentra almacenada en el Inductor (I_L) se descarga a través de (R_{carga}) produciendo un voltaje de salida (V_o), mayor al voltaje de entrada y será el voltaje de entrada al segundo convertidor. Este tipo de topología trabaja en modo continuo, donde la corriente que pasa a través de la bobina jamás llega al valor cero amperes y en modo discontinuo la corriente que pasa a través de la bobina llega a cero. Una vez conectado en paralelo (Cascada) el segundo convertidor trabaja en forma similar al primero, llevando un ciclo de trabajo alto, con una corriente mucho mayor que el primer convertidor, como se observa en la figura 5 [6].

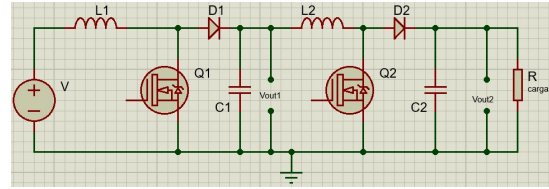


Figura 5. Convertidor BOOST en cascada.

Diseño

Para el diseño del convertidor en cascada partimos del trabajo de los transistores en modo continuo del convertidor como se observa en la figura 6.

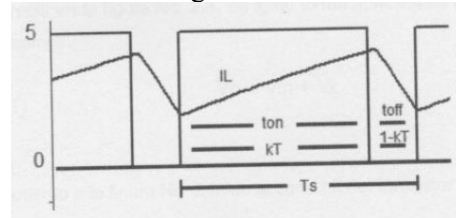


Figura 6. Operación en modo continuo.

Se procede hacer LVK en la malla 1 del circuito 1 en saturación, figura 4 se tiene:

$$V_{in} = V_L \quad 1.1$$

$$V_L = L \frac{di}{dt} \quad 1.2$$

Si se sabe que la I_{L1} se deriva de:

$$(I_L) = I_{in} = \frac{V_o}{V_{in}} (I_o) \quad 1.3$$

Derivado de:

$$V_L = V_{in} = L \frac{di}{dt} = L \frac{\Delta i}{kT} \quad 1.4$$

Despejando Δi se tiene:

$$\Delta i = \frac{V_{in} kT}{L} \quad 1.5$$

Y si

$$V_o = V_{in} + V_L \quad 1.6$$

además:

$$\Delta i = \frac{(V_o - V_{in})(1-k)kT}{L} \quad 1.7$$

Se llega a una expresión completa

$$\frac{V_{in} kT}{L} = \frac{(V_o - V_{in})(1-k)kT}{L} \quad 1.8$$

Se llega con el despeje a:

$$V_o = \frac{V_{in}}{(1-k)} \quad 1.9$$

Donde

V_o = voltaje de salida del convertidor 1.

V_{in} = voltaje de entrada del convertidor.

k = Ciclo de trabajo del conmutador.

Y de la potencia de salida del primer convertidor se iguala con la potencia de entrada al segundo convertidor, además de aplicad ley de ohm:

$$P_{in} = P_o \quad 1.10$$

$$V_{in} I_{in} = V_o I_o \quad 1.11$$

Sustituyendo I_{in} queda:

$$I_{in} = I_L = \frac{V_o}{V_{in}} (I_o) \quad 1.12$$

Derivando una expresión como resultado:

$$I_L = \frac{I_o}{1-k} \quad 1.13$$

Sometiendo el MOSFET a una corriente:

$$I_T = k I_L \quad 1.14$$

$$I_T = \frac{k}{1-k} I_o \quad 1.15$$

De la expresión anterior se ocupa para calcular L del convertidor.

$$L = \frac{V_{in} k}{f_s \Delta i} \quad 1.16$$

Donde:

V_{in} = Voltaje de fuente de alimentación del convertidor.

f_s = frecuencia de conmutación.

Δi = Rizo de corriente pico a pico $0.2L$.

Además de obtener el capacitor.

$$C = \frac{I_o k}{f_s \Delta v} \quad 1.17$$

Donde:

I_o = Corriente del convertidor

Δv = Rizo de voltaje de salida del convertidor.

Para el cálculo de los parámetros de los ciclos de trabajo k_1 , k_2 , se tiene:

$$k_1 = \left(\frac{V_{O2} - V_{in}}{2 + V_{O2}} \right) = \left(\frac{(135 - 12V)}{2 + 135V} \right) = 0.45 \text{ y para}$$

$$k_2 = \left(\frac{k_1}{1 - k_1} \right) = \left(\frac{0.45}{1 - 0.45} \right) = 0.84$$

entonces se procede a sustituir los valores en la expresión desarrollada 1.9:

$$V_o = \frac{V_{in}}{(1-k)} = \frac{12V}{(1-0.45)} = 21.82V$$

Y para V_{o2} , es una expresión similar:

$$V_{out2} = \frac{V_{out1}}{(1-k_2)} = \frac{21.82V}{(1-0.84)} = 134.8V$$

Una vez conocidos los valores de voltaje del primer convertidor se procede a calcular la corriente de este:

$$I_{o1} = I_{L2} = \frac{I_{o2}}{1-k_2} = \frac{1.3A}{1-0.82} = 7.22A$$

Y para la I_{L1} .

$$I_{L1} = \frac{I_{o1}}{(1-k_1)} = \frac{7.22A}{(1-0.45)} = 13.12A.$$

Esta corriente I_{L1} es la corriente mínima que suministrara el banco de baterías, que a su vez pasara por el regulador de carga, para así poder tener los 135 Volts y 1.3 Amperes de salida.

La corriente que soportaran los 4 transistores será de 5.91 A.

El valor de las inductancias será de:

$$L_1 = \frac{V_{in1} * k_1}{f_{s1} * \Delta i_1} = \frac{12 * 0.45}{40kHz * 2.63} = 44.55$$

$$L_2 = \frac{V_{in2} * k_2}{f_{s2} * \Delta i_2} = \frac{0.84 * 21.82}{40kHz * 1.44} = 267.85$$

Y para el cálculo de los capacitores

$$C_1 = \frac{I_{o1} * k_1}{f_{s1} * \Delta v_1} = \frac{7.22 * 0.45}{40kHz * 100mV} = 937.46$$

$$C_2 = \frac{I_{o1} * k_2}{f_{s2} * \Delta v_2} = \frac{1.3 * 0.82}{40kHz * 100mV} = 307.5$$

Por los que el circuito BOOST resultante queda como se muestra en la figura 7.

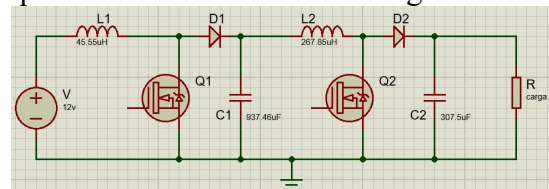


Figura 7. Convertidor en cascada BOOST.

El voltaje de salida se puede ver con una carga de 100Watts, en la figura 8.

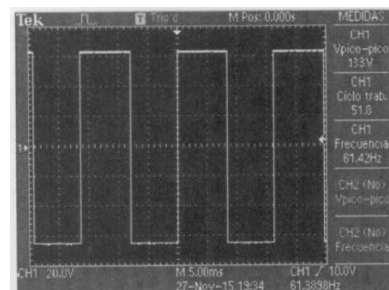


Figura 8. V_o con carga de 100W.

Los cálculos como ΔI y ΔI_2 , red snuber, la protección di/dt, dv/dt diseño de inductores, circuitos de control LM3524 y IRF2110, diseño de pulsos pueden consultarse en la tesis de licenciatura de electrónica [1].

Inversor monofásico de puente completo.

Es un convertidor de c.d. a c.a y se le conoce como inversor, su forma de onda de voltaje de salida es senoidal, en los inversores reales esto no es así, se pueden aceptar los voltajes de onda cuadrada o cuasi-senoidal.

La salida de voltaje del BOOST en cascada se usará como la tensión de 135 V de entrada del inversor monofásico, con una salida en voltaje de 120 V c.a (onda cuadrada), con una frecuencia de 60 Hz.

Este puente trabaja con 4 dispositivos de conmutación, como se observa en la figura 9, y el voltaje de salida V_0 , puede ser $+V_{in}$ (cuando Conmutan Q1 y Q2) y en $-V_{in}$, (cuando conmutan Q3 y Q4), dependiendo de los MOSFETS, se conmutan por parejas, en intervalos de tiempo [1] [6].

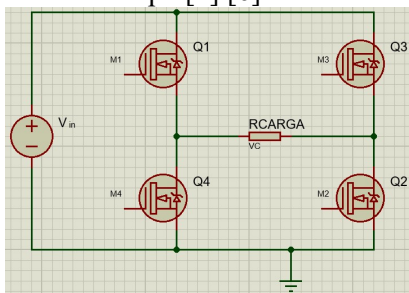


Figura 9 Inversor de puente completo.

Para el control de las compuertas de los MOSFETS se utilizan los circuitos LM3524 Y EL IRF2110, los cuales controlan la frecuencia de conmutación del inversor monofásico y las conmutaciones inferiores y superiores de los MOSFETS, mediante la expresión

$$F_{osc} = \frac{1}{R_T C_T}$$

Para el cálculo de 60 Hz de salida se tiene un capacitor de $3.3 \mu F$ y para R_T .

$$R_T = \frac{1}{(60 \text{ Hz})(3.3 \text{ F})} = 5.05 \text{ K}\Omega$$

Se Ajusta con un potenciómetro de precisión para obtener los 60 HZ, así el proyecto final queda como en la figura 10.

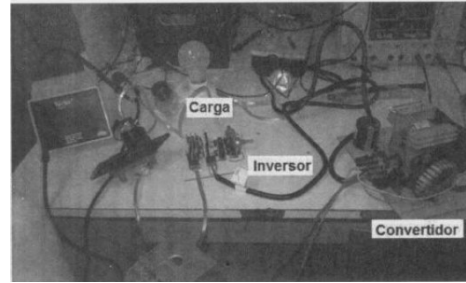


Figura 10. Proyecto completo funcionando.

Conclusiones

Se observa que cada etapa de una instalación ISF se pueden conocer la obtención de energía almacenada V.c.d. con un desempeño óptimo de alimentación, respaldo del sistema inversor u otro circuito de conversión que es necesario para aprender que lo teórico y lo practico son complementarios.

Además, se desarrollaron los cálculos necesarios de los elementos del 'proyecto, para llevar a cabo el desarrollo del convertidor BOOST en cascada y el inversor tipo puente completo, etapas de control y diseños en PCB's.

Es necesario regular la corriente del primer convertidor ya que el segundo convertidor requerirá la corriente necesaria para su operación, de lo contrario se desestabilizará el circuito y se quemaran ambos convertidores, por lo que se procedió a elevar la corriente del primer convertidor.

El ruido provocado por las armónicas eleva el voltaje y se corrige con una bobina de filtro pasa altas y el uso de diodos de recuperación rápida de FR307 a MUR 1520 que son ultra rápidos, obteniendo una salida limpia y estable.

El sistema alimenta por 2 horas el voltaje de salida, pero se puede alargar el tiempo aumentando el número de baterías, así se elevaría el voltaje y la corriente disminuiría [1] [6].

Bibliografía

[1] Luis Alberto Reyes López "Desarrollo de un inversor monofásico de 150 Watts aplicado a sistemas de iluminación mediante una ISF", Tesis de Licenciatura en Ingeniería Electrónica, Instituto Tecnológico de Toluca, mayo 2016.

[2] Arco Solar, installation Guide Solar electric Modules.

[3] Diaz Tomas “Instalaciones Solares Fotovoltaicas” Mc Graw Hill, Primera edition, 2010.

[4] LTH ciclado profundo, manual técnico.

[5] Reguladores de carga. Phocos CX 20.

[6] Mohammad H Rashid, electronica de Potencia, circuitos, dispositivos y aplicaciones, 3ra edición. Editorial person Prentince Hall.

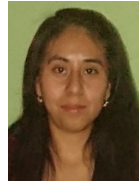
Currículum Vitae y Fotografía.



Luis Alberto Reyes López es Ingeniero en Electrónica egresado del Instituto Tecnológico de Toluca con la especialidad de control, ha trabajado con electrónica de potencia, utilizando inversores, convertidores, sistemas eléctricos y de potencia, además de sistemas de corte, dispositivos embebidos, ensamblador de microcontroladores, PLC's, Instrumentación y control, Forma parte del grupo de investigación en la línea de Diseño de aplicaciones en electrónica.



Ing. Gabriel López Reyes: Es Ingeniero en Electrónica, egresado en 1992 del I.T.T. con especialidad en Sistemas Digitales, ha realizado proyectos de innovación tecnológica para el sector productivo y educativo, dirigido investigaciones académicas con alumnos de diferentes carreras de ingeniería, actualmente labora en el I.T.T. donde es docente en electrónica, sistemas e investigador en el área de instrumentación y control, así como en electrónica digital microcontroladores y microprocesadores. Forma parte del grupo de investigación en la línea de Diseño de aplicaciones en electrónica.



Perla Paola López González es Estudiante de Ingeniería en Electrónica del Instituto Tecnológico de Toluca con la especialidad Automatización Industrial, ha trabajado con electrónica de potencia, utilizando inversores, convertidores, sistemas eléctricos y de potencia, dispositivos embebidos, ensamblador de microcontroladores, PLC's, Instrumentación y control, Forma parte del grupo de investigación en la línea de Diseño de aplicaciones en electrónica.