

“Diseño y Simulación del Control de un Sistema de Generación Fotovoltaico Basado en un Convertidor DC-DC de Doble Punte Activo, un Convertidor DC-AC Monofásico Desconectado de la Red y un Banco de Baterías”

Marlon Cevallos⁽¹⁾, Desiré Jumbo⁽²⁾, Sífifo Falcones⁽³⁾
Facultad de Ingeniería en Electricidad y Computación
Escuela Superior Politécnica del Litoral (ESPOL)
Campus Gustavo Galindo, Km 30.5 vía Perimetral
Apartado 09-01-5863. Guayaquil-Ecuador
mrceval@espol.edu.ec⁽¹⁾, djumbo@espol.edu.ec⁽²⁾, sixifo@espol.edu.ec⁽³⁾

Resumen

El presente trabajo consiste en diseñar el control un sistema de generación fotovoltaico desconectado de la red, que transforma la energía proveniente de paneles fotovoltaicos a energía eléctrica. Para la verificación del diseño, se desarrolla un modelo de conmutación utilizando MATLAB/SIMULINK en conjunto con el software especial de simulación de sistemas de electrónica de potencia PLECS. El sistema modelado está formado por los siguientes elementos: paneles fotovoltaicos, batería, convertidor DAB, convertidor Boost, inversor monofásico, capacitor de enlace y la carga. Cada elemento que forma parte del sistema de generación fotovoltaico debe ser seleccionado de tal forma que cumpla con las especificaciones de potencia nominal, voltaje nominal y amplitud de rizados máximos de corrientes y voltajes. El control del sistema se diseña de tal forma que las perturbaciones que se le apliquen al sistema sean compensadas rápidamente con un comportamiento dinámico adecuado. El funcionamiento de todo el sistema se verifica mediante simulación, para asegurar que cumple con el principio de operación detallado en la teoría y que satisface las especificaciones básicas de diseño.

Palabras Claves: Generación fotovoltaica, DAB, convertidor Boost, inversor.

Abstract

The present work is to design the control of an off-grid photovoltaic generation system, which transforms energy from photovoltaic panels to electrical energy. For design verification, develops a model of switching using Matlab/Simulink in conjunction with the special software simulation of electric power systems PLECS. The modeling system consists of the following elements: photovoltaic panels, battery, DAB converter, Boost Converter, inverter phase, capacitor and the load link. Each element that is part of the generation photovoltaic system must be selected in such a way that meets the specifications of rated power, rated voltage and maximum amplitude of curls of currents and voltages. The control of the system is designed in such a way that the shocks that you apply to the system are quickly compensated with a dynamic behavior appropriate. The operation of the entire system is verified through simulation, to ensure that it complies with the principle of operation in the detailed theory and that meets the basic specifications of design.

Keywords: Photovoltaic generation, DAB, Boos converter, inverter.

1. Introducción

En el mundo se calcula que al menos una cuarta parte de la población no tiene acceso a la energía eléctrica, por varios motivos, pero en casi cualquiera de estos lugares se dispone de energía en forma de luz solar; si se dispone de un sistema que convierta este

tipo de energía en eléctrica, se podría hacer frente a este problema.

El problema al cual nos enfrentamos es la falta de explotación de energía limpia, que sea realizable desde un enfoque económico así como ambiental, aprovechando recursos que están al alcance de todos, tanto en zonas muy pobladas como en zonas remotas, sin quitarle nada a la naturaleza.

El presente proyecto se propone diseñar un sistema de generación fotovoltaico desconectado de la red. El producto final es un modelo de simulación detallado del sistema de generación, que puede ser utilizado para la implementación de un prototipo en el futuro.

2. Proyecto Propuesto

Con todo lo antes expuesto se propone afrontar el problema con el diseño un Sistema de Generación Fotovoltaica. El sistema constará de dos convertidores DC – DC, el doble puente activo se utilizará para los paneles fotovoltaicos y el elevador no aislado para el banco de baterías, como también un convertidor DC-AC monofásico, como se muestra en la figura 1.

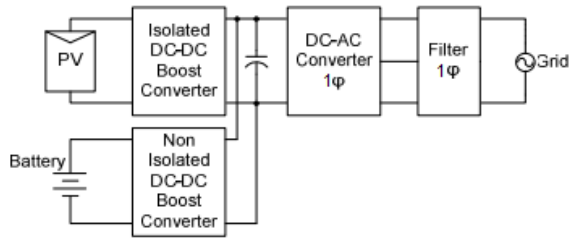


Figura 1. Sistema de Generación Fotovoltaica desconectado de la Red con Batería.

Se diseñará y seleccionará los elementos y controladores adecuados, aplicando técnicas de modelamiento y simulación de un sistema dinámico utilizando Matlab/Simulink y PLECS, garantizando el funcionamiento del sistema, así como que el sistema permanezca estable bajo perturbaciones.

3. Dimensionamiento de los Convertidores

Para poder dimensionar cada uno de los convertidores se debe tener en cuenta algunos aspectos generales del funcionamiento del sistema fotovoltaico.

En el proyecto se utilizan tres convertidores, como se observa en la figura 1. El objetivo del convertidor de los paneles fotovoltaicos es obtener el voltaje variable, según el MPPT su valor máximo puede llegar a ser de 91.5VDC.

La potencia que entregan los paneles depende del nivel de energía solar que reciba, es decir, la potencia que entrega el arreglo varía, cuando esto suceda, entrará en funcionamiento el convertidor de la batería. El flujo de potencia del convertidor de la batería es en ambos sentidos. Cuando la carga requiera más potencia de la que entregan los paneles, la batería suministrará la faltante. Y cuando la carga demande menos potencia, la batería consumirá el sobrante y se cargará. El inversor es el encargado de suministrar potencia a la red desconectada.

Los elementos de fuerza que se utilizan en el proyecto están diseñados en base a voltajes directos, de ese modo soportarán voltajes inverso pico, corrientes nominales, corrientes pico. Además de los elementos de fuerza de cada convertidor, también se encuentran: banco de baterías, paneles fotovoltaicos, capacitor de enlace DC, inductancias y capacitancias de cada uno de los convertidores. Este

dimensionamiento se basa en cálculos matemáticos y simulaciones.

Tabla 1. Parámetros del Diseño.

Parámetros iniciales	
Voltaje de Salida del sistema	120[V _{rms}]
Potencia del Sistema	3000 [W]
Frecuencia de conmutación	17000 [Hz]

3.1 Parámetros iniciales

Para comenzar a dimensionar cada uno de los convertidores se necesita determinar algunos parámetros, como el voltaje de enlace de los convertidores, voltaje de entrada de los convertidores DC-DC. Cada uno de estos se irán calculando según sean necesarios.

Como el voltaje que se desea en la salida es de 120 voltios RMS, se ha determinado como voltaje de enlace de los convertidores 200 voltios, así se obtiene el índice de modulación del inversor a partir de:

$$m = \frac{V_{opico}}{V_b} \quad (1)$$

$$m = 0.85$$

Teniendo en cuenta los parámetros elegidos se calcula la corriente máxima que podrá entregar el sistema; según [1] la ecuación para la potencia aparente:

$$S_o = V_{ORMS} * I_{ORMS} \quad (2)$$

$$I_{ORMS} = 25 [A_{rms}]$$

Para conocer la corriente de entrada del inversor se recurre a:

$$I_{i_inv} = \frac{i_p}{m} \quad (3)$$

$$I_{i_inv} = 41,59 [A]$$

3.2 Diseño del convertidor DAB

Para el diseño de este convertidor se requiere los parámetros de entrada y de salida, con estos datos se parte para simular el circuito del convertidor.

Tabla 2. Especificaciones Técnicas del panel fotovoltaico SunSet Solar.

Especificaciones técnicas			
Potencia Nominal (±5%)	P_{max}	250	[W _P]
Corriente Nominal	I_{MP}	8.17	[A]
Voltaje Nominal	V_{MP}	30.5	[V]
Corriente en cortocircuito	I_{SC}	8.80	[A]
Voltaje en circuito abierto	V_{OC}	37.4	[V]

Con los datos de la tabla 2 se forma el arreglo de paneles fotovoltaicos de tal manera que entregue al sistema 3 Kilowatts.

En este caso se obtiene la potencia deseada a través de un arreglo serie-paralelo.

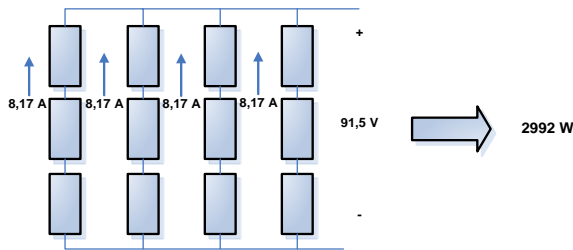


Figura 2. Potencia de un arreglo en serie-paralelo de paneles fotovoltaicos.

Con el arreglo listo se procede a obtener cada uno de los parámetros que se necesita en las simulaciones, en este caso el inductor L_p y el capacitor C_{PV} , ambos se muestran en la figura 4.

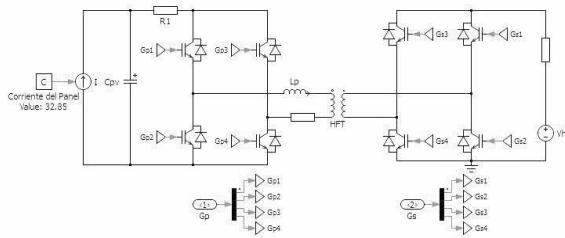


Figura 3. Configuración del DAB, potencia de entrada de arreglo fotovoltaico.

Para calcular estos parámetros se ejecuta la simulación en el punto de máximo, cuando la potencia que entrega el DAB sea la máxima. Esto sucede cuando el ángulo ϕ se encuentra en el máximo de su rango de trabajo.

La relación de vueltas que tiene el transformador se calcula mediante los parámetros V_a y V_b .

Tabla 3. Datos en el Convertidor DAB.

Datos del Doble Punteo Activo	
Potencia de entrada	2990 [W]
Voltaje de Entrada	91,5 [V]
Voltaje de Salida	200 [V]
Relación de Vueltas	1:2,22

3.2.1 Selección de la inductancia del DAB. Para hallar la inductancia usaremos el circuito de la figura 4.

Con los parámetros elegidos anteriormente se procede a aplicar la ecuación

$$I_a = \frac{V_b'}{2\pi f_s L} \phi \left(1 - \frac{|\phi|}{\pi}\right) \quad (4)$$

3.2.1 Selección de la capacitancia de los paneles. Con el valor de la inductancia determinado, se calcula el valor del capacitor de los paneles fotovoltaicos, para esto se observa la corriente de entrada del DAB

en la figura 3. El rizado de ésta corriente se muestra en la figura 4.

Entre los cursores de la figura 4 se muestra el área bajo la curva del periodo de la onda donde se realizan los cálculos, Se aplica la ecuación del voltaje del capacitor:

$$v_c = \frac{1}{C_{PV}} \int idt. \quad (5)$$

$$\int idt = 9,30111e - 4.$$

Se desea un rizado no mayor del 10 %, así que para hallar el capacitor se tiene:

$$C_{PV} = \frac{\int idt}{v_c} \quad (6)$$

$$C_{PV} = 101.65 [\mu F]$$

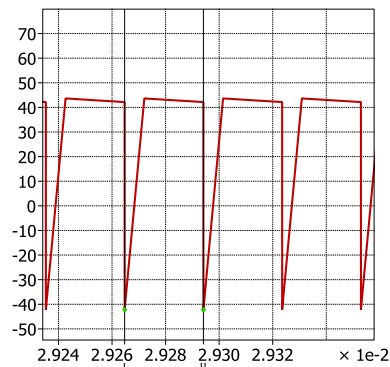


Figura 4. Corriente de entrada del DAB en estado estable.

3.3 Diseño del convertidor elevador para la batería

Para el voltaje de entrada, se ha elegido baterías de automóvil, éstas tienen un voltaje de 12 Voltios, así que para que el convertidor funcione se conectan 8 baterías en serie, así se tiene 96 Voltios en la entrada del convertidor.

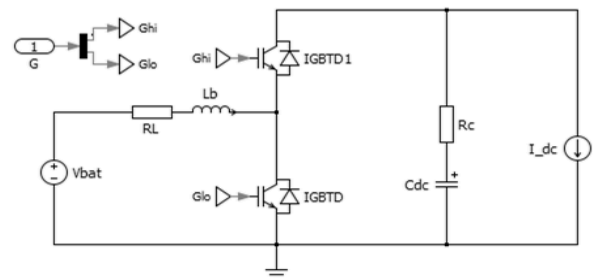


Figura 5. Esquema usado en la Simulación del Convertidor Elevador.

Se conoce que:

$$L = \frac{V_{DcLink} * \delta * (1 - \delta) * T_s}{\Delta I_{bat}}. \quad (7)$$

Reemplazando datos se tiene:
 $L = 3157.49 \text{ } [\mu H]$

3.3.1 Cálculo del capacitor del convertidor elevador. Se parte nuevamente de la ecuación del voltaje en el capacitor, esta vez con un rizado del 1%;

$$v_c = \frac{1}{C_{DClink}} \int idt \quad (8)$$

$$C_{DClink} = 225.12 \text{ } [\mu F]$$

3.4 Diseño del convertidor DC-AC

Para este convertidor ya se han analizado todos los voltajes y corrientes, tanto de entrada como de salida, detallados en la tabla 4.

Tabla 4. Datos del Inversor

Datos del Inversor	
Potencia de Salida	3000 [W]
Voltaje de Entrada	200 [V]
Voltaje de Salida	120 [V _{RMS}]
Índice de modulación	0,85

En la figura 6 se muestra el modelo del convertidor, el filtro a la salida del inversor se diseña con los parámetros de la tabla 4.

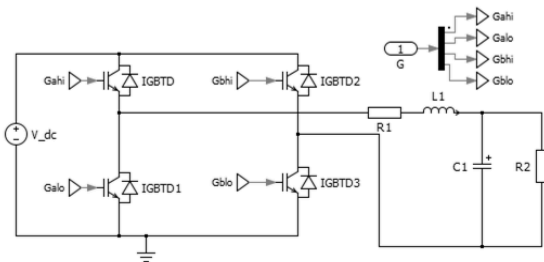


Figura 6. Esquema del Inversor, con un filtro LC a la salida.

3.4.1 Cálculo del filtro LC. El filtro LC consta de una inductancia y una capacitancia, su función es atenuar la componente de alta frecuencia de la onda de salida.

Primero se calcula la inductancia, para esto usaremos la configuración de la figura 7.

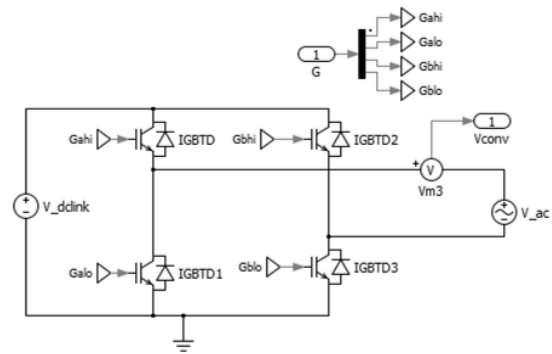


Figura 7. Esquema del Inversor usada para calcular la inductancia del filtro LC.

La forma de onda del voltaje del inductor se reproduce en la gráfica 7. Para obtener la zona crítica en la cual el área es mayor (mayor rizo) se aplica la integral a la señal y se identifica esta zona en la figura 7. Se procede a calcular la inductancia a través de la ecuación de la corriente del inductor.

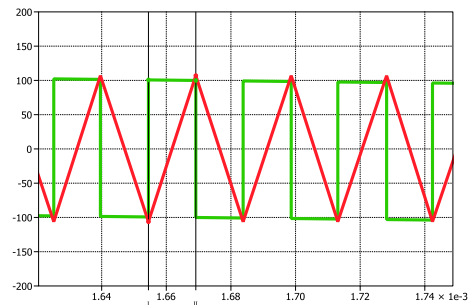


Figura 8. Área mayor de la caída de voltaje de la Inductancia en el filtro LC.

Teniendo en cuenta el área positiva seleccionada por los cursores de la figura 8 Calculamos el área A_L :

$$L = \frac{\int V_{Lconv} * dt}{\Delta I_{Lconv}} \quad (9)$$

$$L = 1,3916 \text{ } [mH].$$

Una vez calculada la inductancia, se obtiene la capacitancia. Se sigue el esquema de la figura 9.

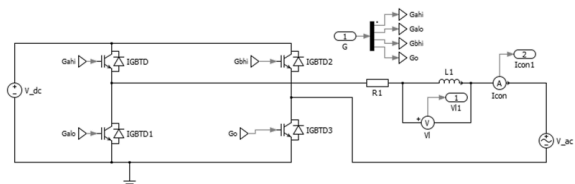


Figura 9. Configuración del Inversor para obtener el capacitor del filtro LC.

Se observa la gráfica 10 que contiene la corriente de salida del convertidor. En la zona donde el área sea

mayor se obtiene el valor de la integral en la ecuación del voltaje del capacitor.

$$v_c = \frac{1}{C_1} \int idt. \quad (10)$$

$$C_1 = 2.2715 [\mu F]$$

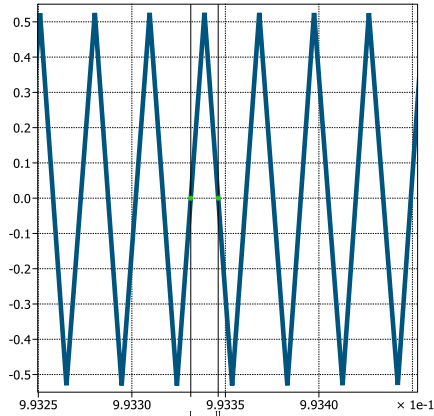


Figura 10. Corriente de Salida del Inversor.

3.4.2 Cálculo del capacitor de enlace. Al simular cada uno de estos circuitos, a la entrada se ubicó una fuente de voltaje, simulando una entrada de voltaje constante, pero en realidad se tendrá un capacitor, éste además de alimentar al inversor, tiene la función de filtrar la señal de 120Hz generada por el inversor en su entrada.

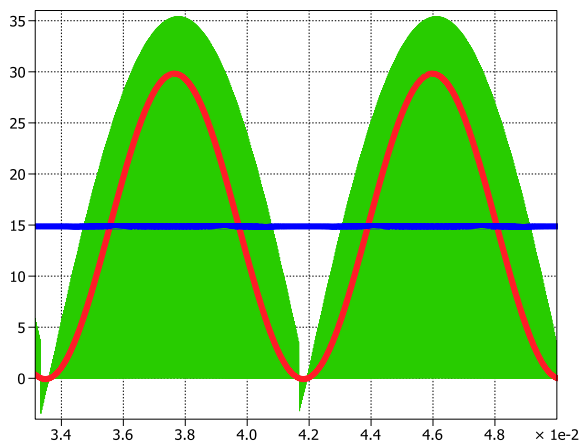


Figura 11. Corriente de entrada del Inversor.

Para calcular el capacitor se utiliza la ecuación del voltaje del capacitor;

$$v_c = \frac{1}{C_{dc}} \int idt. \quad (11)$$

$$w = 240\pi$$

$$\int idt = 7,8060e - 3.$$

$$C_{dc} = 3930 [\mu F]$$

El capacitor de enlace será el que una a todos los convertidores de potencia, a través del diseño de cada

uno de los convertidores por separado, se han obtenido dos valores especificados en la tabla 5.

Tabla 5. Valores de la Capacitancia de Enlace.

Convertidor	Capacitancia [μF]
Boost	225.12
Inversor	3930

El valor que se elige es el obtenido a partir del inversor, debido a que debe filtrar la componente dominante de 120 Hertz de la señal de corriente de este convertidor.

4. Diseño de los controladores

A partir de los convertidores ya diseñados, en este capítulo se presenta el modelamiento de cada etapa del sistema de generación para encontrar sus respectivas funciones de transferencia, y de este modo diseñar los controladores.

4.1 Aspectos generales

Como se mencionó anteriormente, primero se buscará el modelo matemático de cada convertidor por separado, para encontrar la función de transferencia en lazo abierto. Antes de pasar a ese paso primero se ahondará en las técnicas de control utilizadas para diseñar los controladores.

4.1.1 Técnica del factor K. Una herramienta matemática conveniente para controlar la forma y las características de una función de transferencia es la técnica del factor K.

4.1.2 Polo resonante. Se ubica un polo en la frecuencia deseada para de este modo obtener ganancia infinita, si se sintoniza el polo adecuadamente, es decir se sintoniza la frecuencia de operación en la frecuencia de resonancia.

4.2 Diseño del controlador del DAB

Para obtener este controlador primero se debe modelar el sistema para obtener la función de transferencia.

4.2.1 Lazo: Control de energía del DAB en la barra A. Para este lazo se tiene la Energía del DAB en la barra A como variable a controlar. Se parte del siguiente gráfico:

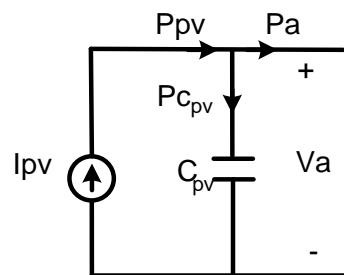


Figura 23. Distribución de potencias en la barra A del DAB.

La energía en el capacitor de entrada del DAB se define mediante la siguiente ecuación:

$$E_{C_{pv}} = \int P_{c_{pv}} dt = \int P_{pv} - P_a dt. \quad (12)$$

La función de transferencia a usar es:

$$\frac{E}{\phi} = -\frac{4.427e4}{s}. \quad (13)$$

Se aplica el método del factor K, para esto se siguen los pasos que se detallan en [2]. Primero se saca el margen de fase del Controlador, a través de la fórmula 4.1, el phi ϕ deseado es de 60° ya que así se considera que se tendrá un tiempo de respuesta rápido para el correcto funcionamiento del controlador. El ángulo de desfase del sistema se obtiene a través de la gráfica 4.4, en este es de $\phi_{sys} = -90$, de esa forma se tiene el controlador del DAB:

$$G_c = \frac{1.548s + 2216}{5.017e - 5s^2 + s} \quad (14)$$

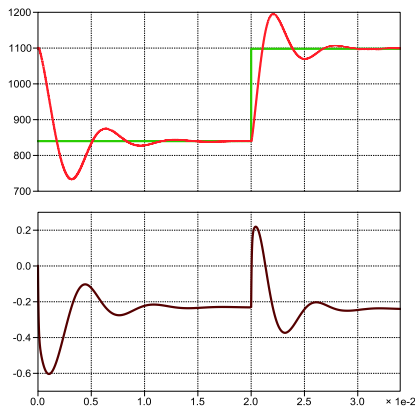


Figura 34. (a) Potencia en el capacitor de entrada del DAB, instantáneo y referencia. (b) Cambios del ángulo phi ϕ dependiendo de los cambios en (a).

4.3 Diseño del controlador del convertidor elevador

El control del convertidor Elevador está dado por un lazo interno y un lazo externo. En el lazo interno la variable de salida es la corriente del inductor I_L y la variable de entrada el ciclo de trabajo d .

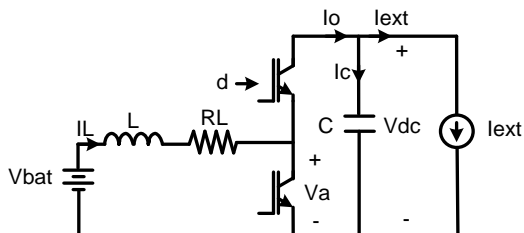


Figura 15. Esquema del convertidor Elevador.

$$d \frac{I_L}{d} = -\frac{V_{DC}}{L} \frac{1}{s + \frac{1}{\tau}} \quad (15)$$

$$\tau = \frac{L}{R_L}.$$

$$\frac{I_L}{d} = -\frac{63341.45}{s + 3.167}. \quad (16)$$

$$G_{ci} = \frac{1678.58(s + 1433)}{s(s + 19910)}. \quad (17)$$

4.3.1 Lazo externo: Control de energía del convertidor. El lazo externo relaciona la energía almacenada en el capacitor como variable de salida y la corriente del inductor como variable de entrada.

El objetivo de este convertidor es controlar el voltaje de la barra V_{DC} , esto es posible ya que:

$$E_c = \frac{I_o V_{DC}}{s} \quad (18)$$

$$\frac{E_c}{I_L} = \frac{96}{s}.$$

$$\frac{E_c}{I_L} = \frac{96}{s}.$$

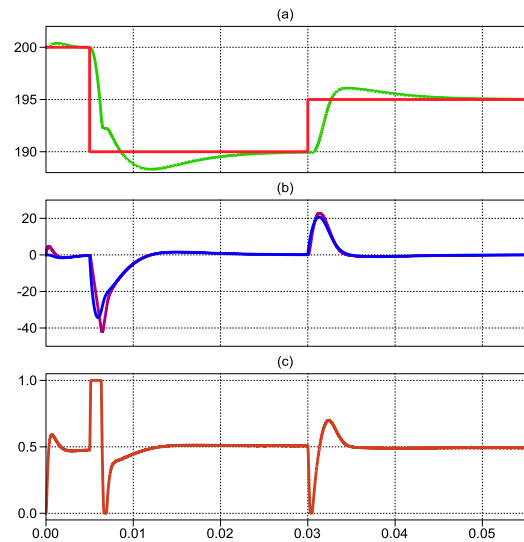


Figura 46. (a) Voltaje de la barra DC, instantáneo y referencia. (b) Corriente del inductor, instantáneo y referencia. (c) Duty cycle.

En la figura 16 se puede observar que se cumplen con los requerimientos iniciales, propuestos para este convertidor.

4.4 Diseño del controlador del inversor

Se encuentra la función de transferencia, del controlador, teniendo en cuenta que la variable a controlar será el voltaje de salida, esto se lo hará a través de la modulación, entonces la función de transferencia sería

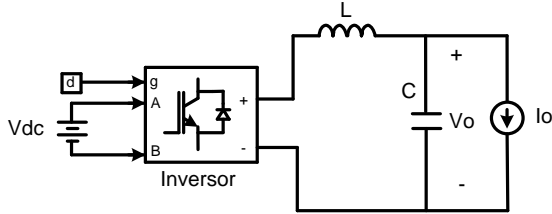


Figura 57. Esquema básico de un inversor monofásico.

La función de transferencia se dividirá en un lazo interno y otro externo, de la figura 4.18 la variable a controlar es el voltaje de salida del inversor, variando la modulación del voltaje de entrada, entonces para el lazo interno se tendrá que controlar la corriente a través del duty cycle, según ecuación 4.37.

4.4.1 Lazo interno: Corriente de salida del inversor. El lazo interno es el de corriente, este controla que la corriente no sea mayor a la que puede entregar el sistema completo. Entonces siguiendo el esquema de la figura 17 la corriente en el inductor es:

$$i_L(s) = \frac{V_{DC}d(s) - V_o}{Ls + RL} \quad (19)$$

$$\frac{i_L(s)}{d(s)} = \frac{200}{0.001392s + 0.01}$$

El control obtenido a través de la técnica del factor K es el siguiente:

$$\frac{i_L(s)}{d(s)} = \frac{200}{0.001392s + 0.01} \quad (20)$$

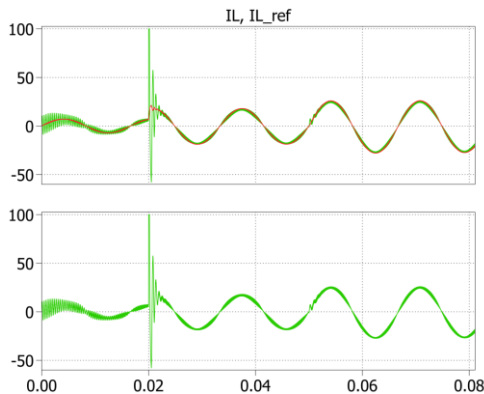


Figura 68. En la figura de arriba se visualiza la referencia y la respuesta de la planta, mientras que abajo se observan los cambios del duty cycle.

4.4.2 Lazo externo: Voltaje de salida.

El lazo externo controla que el voltaje que entrega el sistema se encuentre siempre regulado a través de la corriente de salida. Entonces siguiendo el esquema de la figura 4.18 el voltaje de salida es:

$$\frac{i_L(s)}{d(s)} = \frac{200}{0.001392s + 0.01} \quad (21)$$

$$\frac{v_o(s)}{i_L(s)} = \frac{1}{2.27 - 6s}$$

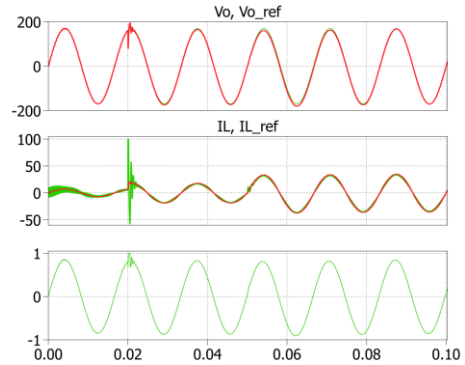


Figura 19. Respuesta del Inversor a un cambio de carga en $t=0.02s$ y $y=0.05s$.

5. Simulación del Sistema fotovoltaico

Hasta ahora se ha calculado cada parte del Sistema Fotovoltaico de forma separada, tratando de cumplir diferentes especificaciones, de modo que cuando funcionen conjuntamente no exista ningún inconveniente, de esta forma se llega a este capítulo, en el cuál se comprueba a través de la simulación el Sistema Completo, con diferentes tipos de cargas, éstas a su vez tendrán diferentes valores y se conectarán en diferentes tiempos.

5.1 Descripción del modelo de simulación

Al haber diseñado cada uno de los convertidores por separado cumpliendo con los requisitos que se necesita para que el Sistema Completo funcione, se unen cada una de las partes antes mencionadas.

Se ha dividido el sistema en dos partes, que se pueden observar en la figura 20, el bloque de la derecha es la parte de fuerza o también conocida como la etapa de potencia, que está constituida por los convertidores, y el bloque de la izquierda es la parte de control, la cual tiene la función de mantener estable la etapa de potencia variando las señales de disparo en cada convertidor.

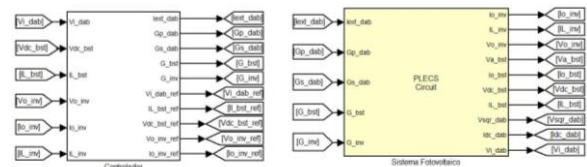


Figura 20. Sistema Fotovoltaico Completo.

5.2 Respuesta del sistema a perturbaciones

En esta sección se añaden diferentes perturbaciones, las cuales servirán para comprobar el funcionamiento del sistema. Primero se analiza el sistema en carga nominal, luego de esto se agregan cargas a diferentes tiempos. También se varía la corriente de entrada del arreglo de paneles fotovoltaicos y el voltaje de la batería.

5.2.1 Sistema en carga nominal. En la figura 21 se observa el sistema con su carga en valor nominal. El arreglo fotovoltaico recibe la máxima luminosidad solar, figura 21 (c), como consecuencia el convertidor DAB entrega su máxima potencia.

El funcionamiento del boost en este caso está determinado principalmente por el inversor. Para explicar esto de otra manera, tenga en cuenta una robusta batería conectada directamente con el inversor, como se sabe éste provoca una corriente sinusoidal de 120 Hertzios con un nivel DC en la entrada, idealmente la batería no cambiará su voltaje por esta corriente, concluyendo en que el inversor entregará los 120 voltios AC sin problemas. Si en lugar de la batería se conecta un capacitor para alimentar el inversor, éste difícilmente mantendrá un voltaje constante debido a la complicada corriente sinusoidal del inversor en la entrada. El boost es el encargado de controlar el voltaje del capacitor de la barra DC inyectando al sistema una corriente sinusoidal inversa, figura 21. (c).

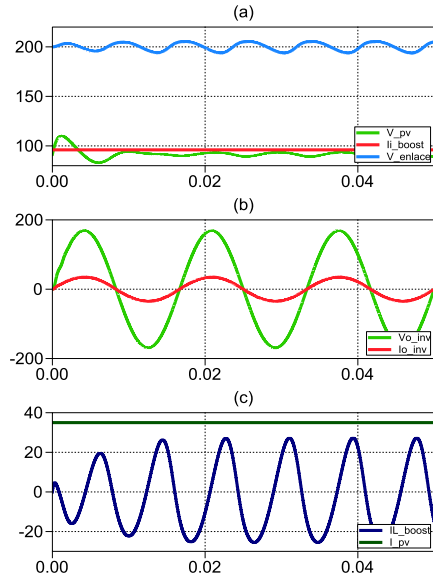


Figura 21. (a) Voltaje en la barra DC, Corriente de salida del boost, Voltaje de entrada del DAB (b) Voltaje de salida del Inversor, Corriente de salida del Inversor (c) Corriente del arreglo fotovoltaico, Corriente del Inductor en el boost.

En el caso del inversor, este se alimenta de la barra DC y entrega a la carga la potencia nominal.

5.2.2 Cambio de carga AC. Los cambios realizados con carga AC se pueden visualizar en la figura 22. Cuando el sistema inicia tiene un 33.3% de la carga nominal, en este caso el arreglo de paneles fotovoltaicos funciona a máxima potencia.

La carga conectada en el inversor no consume toda la potencia generada por el arreglo fotovoltaico, así que para que capacitor no se sobrecargue, el boost trabaja de tal forma que absorbe potencia de la barra DC, cargando la batería y generando una corriente negativa, como se observa en la figura 22. (c).

En $t=0.015$ segundos se agrega una carga, de tal forma que el inversor consuma toda la potencia generada por los paneles fotovoltaicos (carga nominal), el boost controla el voltaje en la barra DC inyectando corriente, de tal forma que anule la componente que tiene el inversor monofásico en su entrada. En la figura 22. (a) se visualiza que a pesar de que el boost actúa, el voltaje en la barra comienza a tener un pequeño rizado. En el cambio de carga en $t=0.1$ segundos, la carga que se tiene es el 50% de la nominal, el boost consume potencia y el voltaje en la barra DC deja de tener un rizado tan grande.

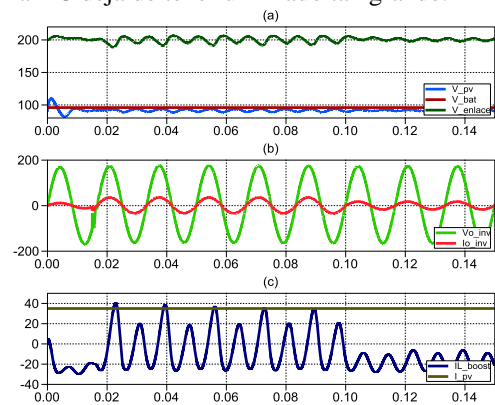


Figura 22. (a) Voltaje en la barra DC, Voltaje de la Batería, Voltaje de entrada del DAB (b) Voltaje de salida del Inversor, Corriente de salida del Inversor (c) Corriente del arreglo fotovoltaico, Corriente del Inductor en el boost.

5.2.3 Cambio de carga en DC

Inicialmente el DAB entrega máxima potencia, la batería del boost se carga, una vez estabilizado el sistema, se introduce una carga DC, el boost consume menos potencia a fin de mantener el voltaje en la barra y el rizado de la corriente aumenta debido al aumento de la corriente en el inversor. Se verifica en la figura 23. (c) que la salida del inversor no se ve afectada por el cambio de carga DC.

Una vez estabilizado el sistema se aplica el último cambio de carga DC, se da que la potencia demandada por la carga DC es tan grande que provoca que el boost comience a entregar potencia, figura 23. (c).

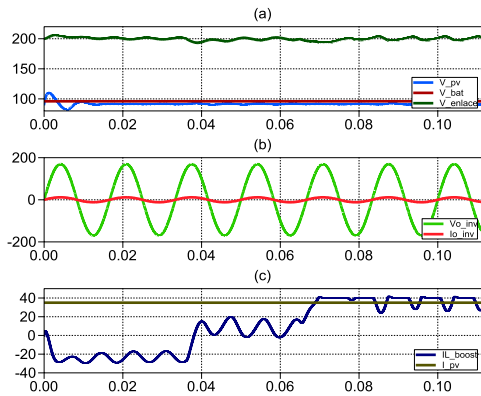


Figura 23 (a) Voltaje en la barra DC, Voltaje de la Batería, Voltaje de entrada del DAB (b) Voltaje de salida del Inversor, Corriente de salida del Inversor (c) Corriente del arreglo fotovoltaico, Corriente del Inductor en el boost.

5.2.4 Cambio de corriente en el arreglo fotovoltaico

La corriente en el arreglo fotovoltaico es un factor muy variable en esta clase de sistemas, ya que la energía que entrega el sol puede variar en minutos, por ejemplo el cielo suele oscurecerse con bastante facilidad en la época de lluvia, y durante el verano los atardeceres son más cortos, en determinadas horas del día las nubes son más densas; de esta forma la simulación del sistema con esta clase de perturbación tan recurrente es necesaria.

En la figura 24 al inicio de la simulación el arreglo fotovoltaico entrega 5 amperios al DAB, en este caso el sistema para estabilizarse recurre a la energía almacenada en la batería, de tal forma que la corriente en el boost es positiva, entrega potencia a la barra para poder mantener el voltaje constante. La carga que tiene el inversor corresponde al 50% de la nominal en todos los casos. En $t=0.02$ segundos se inyecta más corriente en el DAB, el valor final al que llega la corriente de los paneles es de 20 amperios, con esto el voltaje del capacitor de entrada del DAB aumenta, pero rápidamente se estabiliza debido a la acción del boost. El convertidor boost ya no entrega potencia desde la batería, solo compensa el rizado generado por el inversor. En $t=0.04$ segundos se agrega la última perturbación, en ese momento se trabaja con la máxima potencia que puede entregar el arreglo fotovoltaico, y la batería comienza a cargarse, ya que la potencia demandada por el inversor no es lo suficientemente grande para consumir toda la generada por los paneles.

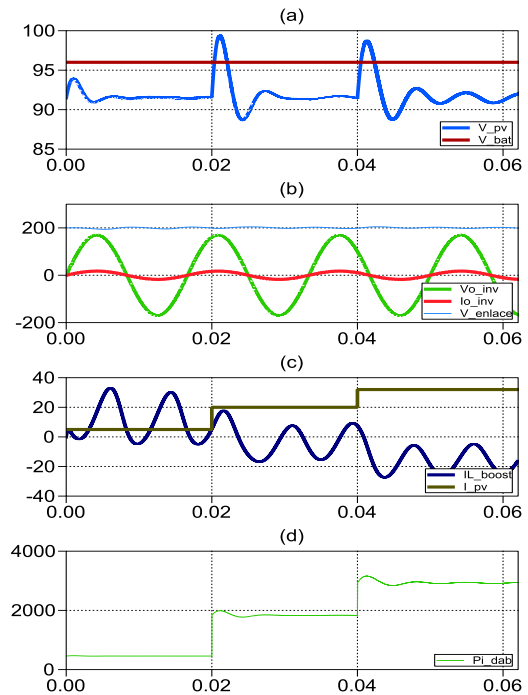


Figura 24. (a) Voltaje de salida del Inversor, Corriente de salida del Inversor, Voltaje de la barra DC. (b) Corriente del arreglo fotovoltaico, Corriente del Inductor en el boost. (c) Potencia de entrada al DAB.

Con esto tenemos que en cada perturbación que se realizó, el sistema realiza la acción necesaria para seguir trabajando, teniendo en cuenta que la potencia máxima que puede entregar el sistema son 3000 VA.

5.2.5 Cambio de voltaje en la batería

Los cambios de voltaje en la batería se dan principalmente en la noche, en esta parte del día no existe luz solar y la corriente que entregan los paneles fotovoltaicos es nula. La forma de mantener el voltaje en la barra DC es a través de la energía almacenada en la batería, al transcurrir un determinado tiempo en esta situación, la batería comienza a descargarse. Se asume nuevamente que la potencia consumida por el inversor es el 50% de la nominal.

En la figura 25 se muestra que al inicio de la simulación el sistema se estabiliza solo, al no existir potencia entregada por el DAB, la barra DC depende sólo de la energía que el convertidor boost le puede suministrar, se simula una descarga en la batería disminuyendo su voltaje en un 15% del nominal, el boost compensa este cambio entregando más potencia. Al introducir la perturbación se observa que el voltaje de la barra se estabiliza rápidamente.

Al bajar el voltaje en la batería, la potencia que suministra el boost disminuye, pero la carga conectada al sistema solo consume el 50% de la nominal, esta es la razón por la cual se observa que el voltaje en la barra DC no varía drásticamente.

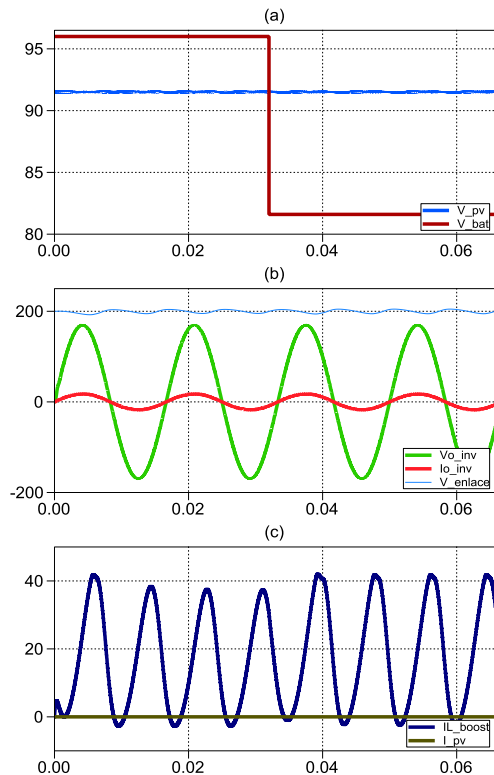


Figura 25. (a) Voltaje en el arreglo fotovoltaico, Voltaje de la batería, (b) Voltaje y Corriente de salida del inversor, voltaje del capacitor dc_link (c) Corriente de entrada del boost, corriente del arreglo fotovoltaico

6. Conclusiones

Se concluye que los valores de los filtros capacitivos e inductivos seleccionados satisfacen las especificaciones de potencia, voltaje y porcentajes de rizado de voltaje y corriente.

Los cambios en las señales del sistema debido a variaciones de carga se compensan rápidamente por acción de los controladores en cada convertidor, teniendo como respuesta las simulaciones, las cuales satisfacen los requerimientos del diseño.

La interacción entre los diferentes convertidores se desarrolla sin problemas, manteniendo en la salida un voltaje constante y corriente según la carga instalada, siendo esto un indicador del correcto diseño de del control de cada uno de ellos.

Con respecto a las diferentes perturbaciones que se realizaron, basados en los resultados de simulación, se puede concluir que:

- El sistema reacciona adecuadamente a fuertes cambios en la carga AC, tal como se describe en la sección 5.2.3.
- Los cambios en la intensidad luminosa reflejados en variaciones de corriente en el panel fotovoltaico se controlan fácilmente por acción del convertidor boost provocando cambios casi imperceptibles en la barra DC.
- La situación descrita en la sección 5.2.5, en el cual se simula el decaimiento del voltaje de la

batería, cuando este límite sea alcanzado el sistema colapsa por la falta de potencia para alimentar al inversor.

7. Recomendaciones

Se recomienda no arrancar el sistema con la carga al 100%, esto podría causar un mal funcionamiento.

En las simulaciones siempre se tiene al capacitor cargado, así que si se llegase a implementar se debería tener en cuenta que antes de arrancar el sistema debería elegirse la opción más adecuada para cargarse.

En el punto 5.3.5, se debe tener en cuenta al momento de la implementación que el DAB debe ser desconectado cuando no haya luz solar, ya que igualmente el controlador consume energía tratando de tener el capacitor de entrada del DAB a un determinado voltaje.

8. Bibliografía

- [1] Qin, Hengsi, Dual Active Bridge Converters in Solid State Transformers, http://scholarsmine.mst.edu/thesis/pdf/Qin_09007dcc8097478b.pdf.
- [2] Ayyanar, R, K-factor approach, Seminario de graduación “Power Converters for Photovoltaic Generation Systems”.
- [3] Córdoba, R., “Evolución del consumo final de energía en el mundo”, habitat.aq.upm.es/boletin/n34/arcor_3.html, fecha de consulta agosto 2012.
- [4] **Error! Reference source not found.Error! Reference source not found.Error! Reference source not found.**Ministerio de Ciencia y Tecnología de España. Elaboración propia. Departamento de Urbanismo y Ordenación del Territorio (DUyOT). Rafael Córdoba Hernández, <http://habitat.aq.upm.es/boletin/n34/img/img35.jpg>, fecha de consulta agosto 2012.
- [5] Castro, J., Perspectivas de la demanda energética global, <http://www.petrotecnica.com.ar/febrero2011/sin/Demanda.pdf>.
- [6] La energía solar, Una energía garantizada para los próximos 6.000 millones de años, <http://www.censolar.es/menu2.htm>, fecha de consulta agosto 2012.
- [7] Sistemas Fotovoltaicos Domésticos Conectados a la Red, <http://www.permacity.com/lac/pdf/ejemplo1.pdf>.
- [8] González, A., Eficientes, flexibles... y baratas, <http://www.fisica.uh.cu/bibvirtual/vida%20y%20tierra/celdasolar/index.htm>, fecha de consulta agosto 2012.
- [9] Energía Solar Fotovoltaica, <http://www.electricidad->

- gratuita.com/energia%20fotovoltaica.html, fecha de consulta agosto 2012.
- [10] Pacco Ramírez, K., La energía solar fotovoltaica y sus aplicaciones, <http://www.monografias.com/trabajos82/energia-solar-fotovoltaica-y-sus-aplicaciones/energia-solar-fotovoltaica-y-sus-aplicaciones2.shtml>, fecha de consulta septiembre 2012.
- [11] Doménech, D., Caracterización de mini paneles fotovoltaicos con iluminación monocromática, <http://upcommons.upc.edu/pfc/bitstream/2099.1/4928/1/memoria.pdf>.
- [12] Gasquet, H., Conversión de la Luz Solar en Energía Eléctrica, <http://www.enalmex.com/docpdf/libro/ch04a.pdf>.
- [13] Ruiz, L., Beristáin, J., Sosa, I, Hernández, J., Estudio del Algoritmo de Seguimiento de Punto de Máxima Potencia Perturbar y Observar, http://www.itson.mx/publicaciones/rieeyc/Documents/v8/art3vf_estudio_del_algoritmo_de_seguimiento_de_punto_de_maxima_potencia_perturbar_y_observar.pdf.
- [14] Gasquet, H., Conversión de la Luz Solar en Energía Eléctrica, <http://www.enalmex.com/docpdf/libro/ch06.pdf>.
- [15] Mendez, S., Convertidores de Potencia, http://catarina.udlap.mx/u_dl_a/tales/documentos/lep/mendez_s_j/capitulo2.pdf.