

" Diseño del Control y Simulación de un Sistema de Generación de Energía Eléctrica Basado en Módulos Fotovoltaicos, un Inversor Trifásico Desconectado de la Red y Batería Como Unidad de Almacenamiento"

Marcelo Gavilanez Delgado(1), Eber Ordoñez Abarca(2), MSc. Sixifo Falcones(3)

Facultad de Ingeniería en Electricidad y Computación (1)(2)(3)

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL.(1)(2)(3)

Campus Gustavo Galindo, Km. 30.5 Vía Perimetral

P. O. Box 09-01-5863, Guayaquil, Ecuador

Email: magade_ec@hotmail.com(1), jordone@espol.edu.ec (2), sixifo@espol.edu.ec (3)

Resumen

El presente proyecto consiste en el diseño del control de un sistema de generación eléctrica basado en energía fotovoltaica. El sistema de generación está formado por módulos fotovoltaicos, un inversor trifásico desconectado de la red y baterías como unidad de almacenamiento de energía. El dimensionamiento de los elementos del sistema es presentado así como también el modelamiento de los convertidores, lo que permitirá determinar los respectivos controladores.

Las señales a controlar son el voltaje de los módulos fotovoltaicos, la corriente de carga/descarga de las baterías. Se comprueba la validez de los controladores mediante la simulación del sistema completo usando SIM POWER SYSTEM de MATLAB/SIMULINK.

Palabras Claves: Energía Solar, Convertidores, Panel Fotovoltaico

ABSTRACT

This project involves the design of the controls of a power generation system based on photovoltaic energy. The generation system consists of photovoltaic modules, an off-grid three-phase inverter and batteries as the energy storage unit. The calculation of the ratings of the system parameters is presented as well as the modeling of the converters, which will determine the control design.

The control signals are the voltage of the photovoltaic modules, the charge/discharge current of the batteries. The validity of controls is verified by using full system simulation through SIM POWER SYSTEM within MATLAB/SIMULINK.

Keywords: Solar Energy, Converters, Photovoltaic Panel

1. Introducción.

Los continuos cambios energéticos que día a día está sufriendo el mundo en torno a las energías no renovables han dado origen a la evolución y crecimiento de las energías renovables, como sustitución de aquellas que se están agotando.

La demanda energética crece cada día más y más, es por tal motivo que el mundo se ha visto en la necesidad de generar nuevas formas de energía, teniendo como materia prima las energías renovables. Para disminuir el déficit de energía eléctrica que existe actualmente en países como el nuestro, y teniendo como principal materia prima las energías renovables y entre ellas a la energía solar

fotovoltaica, nos hemos visto en la necesidad de hacer un diseño de un convertidor trifásico para aprovechar la energía solar y llevarla a energía eléctrica. El presente proyecto tiene como objetivo principal el diseño del control y simulación de un sistema de generación de energía eléctrica basado en módulos fotovoltaicos, un inversor trifásico desconectado de la red y batería como unidad de almacenamiento. Se dimensionarán los componentes de cada uno de los convertidores tales como resistencias, capacitancias e inductancias tomando en cuenta los estándares en rizados de voltajes, corrientes y se diseñarán los controladores para cada uno de los convertidores, todo esto con la ayuda del software MATLAB/SIMULIK/SYMPOWERSYSTEMS.

2. Propuesta de Proyecto

La finalidad de este proyecto es diseñar el control y simular un sistema de generación eléctrica basada en módulos fotovoltaicos para dar servicio a una carga trifásica, la cual se encuentra desconectada de las redes de distribución eléctrica.

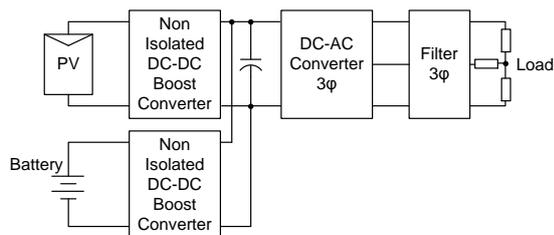


Figura1 Diagrama inicial del convertidor estático

La motivación principal del proyecto es el creciente uso de los paneles fotovoltaicos debido a su reducción de costos y el aumento de la demanda eléctrica.

3. Herramientas Disponibles

A continuación las herramientas disponibles de manera general para cumplir con la propuesta de proyecto

3.1. Panel Fotovoltaico

Los paneles fotovoltaicos, están formados por un conjunto de celdas (células fotovoltaicas) que producen electricidad a partir de la luz que incide sobre ellos (electricidad solar).[1]

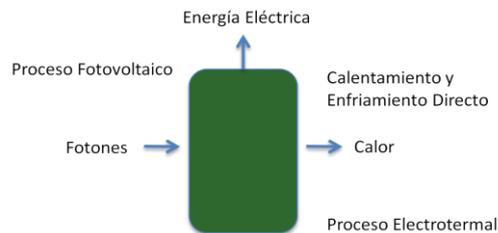


Figura 2 Proceso de conversión de energía de un panel fotovoltaico

3.2. Convertidor DC-DC tipo Boost

El convertidor Boost recibe el voltaje del arreglo de paneles fotovoltaicos y lo convierte en un voltaje de mayor magnitud, utiliza la modulación por anchos de pulsos mediante los switches.[2], [4]

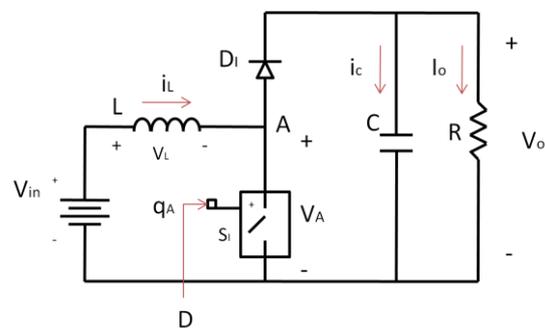


Figura 3 Circuito del Convertidor DC-DC Boost

Donde:

V_o : Voltaje de la resistencia

V_L : Voltaje en el inductor

D : Ciclo de trabajo

V_{in} : Voltaje de la fuente

V_A : Voltaje en el switch

3.3. Convertidores DC-AC Trifásicos (Inversor)

Este convertidor se lo utilizara para convertir el voltaje directo que se recibe del arreglo de paneles fotovoltaicos y convertirlo en un voltaje alterno para alimentar la carga final.[3]

A continuación un diagrama esquemático del inversor trifásico:

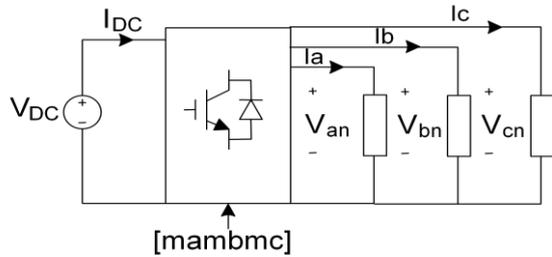


Figura 4 Circuito Simplificado del Convertidor DC-AC Trifásico

Donde:

V_{an} : Voltaje en la fase a

V_{bn} : Voltaje en la fase b

V_{cn} : Voltaje en la fase c

V_{dc} : Voltaje directo

I_{dc} : Corriente directa

m_a, m_b, m_c : índices de modulación

4. Dimensionamiento de los componentes y diseño de los controladores.

El dimensionamiento de los componentes de los convertidores se baso en el rizado de corriente sea máximo de un 10% en inductores y el rizado de voltaje en capacitores sea de 1% máximo.

4.1. Dimensionamiento del Convertidor DC-DC Boost del panel fotovoltaico

El rizado máximo permitido para la corriente en el inductor es del 10% para esto se tomo un valor de inductancia de 8 [mH]. La corriente en el inductor se muestra a continuación:

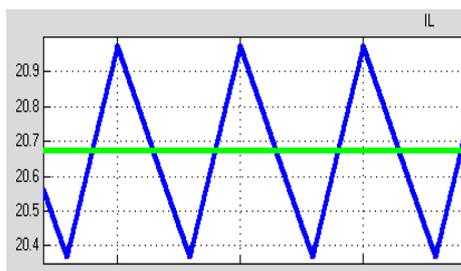


Figura 5 Corriente en el Inductor del Convertidor DC DC Boost

El rizado máximo permitido para el voltaje en el capacitor es del 3% para esto se tomo un valor de capacitancia de 20[mF]. El voltaje en el capacitor se muestra a continuación:

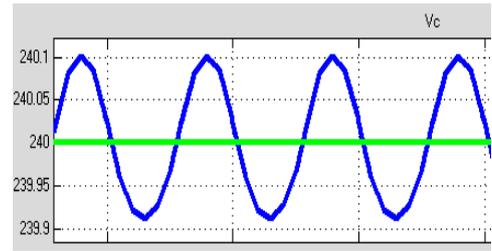


Figura 6 Voltaje en el Capacitor del Convertidor DC DC Boost

4.2. Dimensionamiento del Convertidor DC-DC Boost de la batería.

Para el dimensionamiento del Boost de la batería se utilizan los valores de resistencia, e inductancia dimensionados para el convertidor DC-DC del panel fotovoltaico, a diferencia que existe un capacitor que sirve como enlace entre los convertidores que se necesita dimensionar.

El rizado máximo permitido para el voltaje en el capacitor es del 3% para esto se toma un valor de capacitancia de 1[mF]. El voltaje en el capacitor se muestra a continuación:

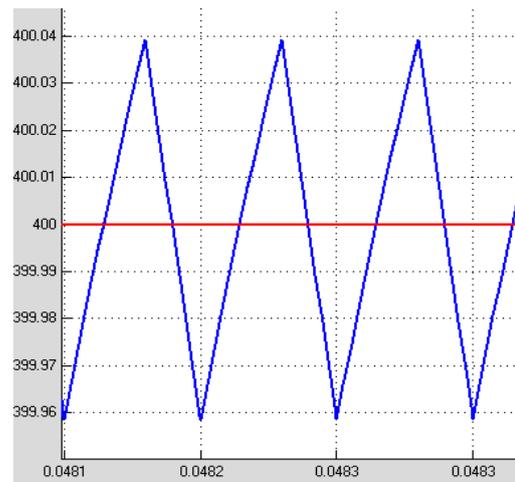


Figura 7 Rizado de voltaje en el capacitor del enlace DC

4.3. Dimensionamiento de los elementos del convertidor DC-AC.

Se toman valores similares de inductancia, resistencia y capacitancia a los tomados en los convertidores anteriores y se tienen los siguientes resultados

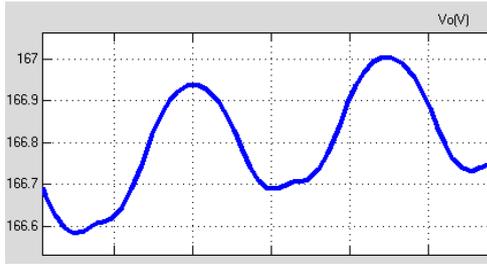


Figura 8 Rizado de voltaje en el Convertidor DC – AC



Figura 9 Rizado de corriente en el Convertidor DC – AC

4.4. Diseño del controlador de voltaje del DC-DC Boost.

Para el diseño de este controlador se utilizó la técnica del factor K, con un margen de fase de 60° y un ancho de banda de 500 HZ. El diagrama de bloques de donde se partió para el controlador es el siguiente:

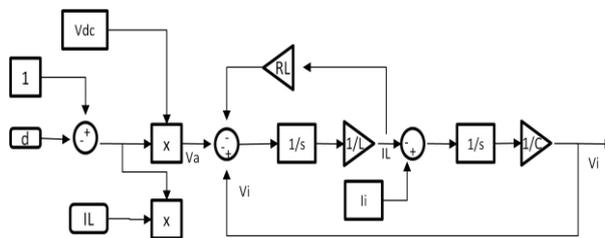


Figura 10 Diagrama de bloques del Convertidor DC-DC Boost del panel fotovoltaico

La ganancia de la planta G_p es la siguiente:

$$G_p = \frac{-2.5e009}{s^2 + 30s + 6.25e006}$$

La ganancia del controlador G_c es el siguiente:

$$G_c = \frac{-4.61e-007 s^2 - 0.0004005 s - 0.087}{1.937e-009 s^3 + 8.803e-005 s^2 + s}$$

A continuación diagrama de bode de la ganancia de la planta, del controlador y la ganancia en lazo cerrado:

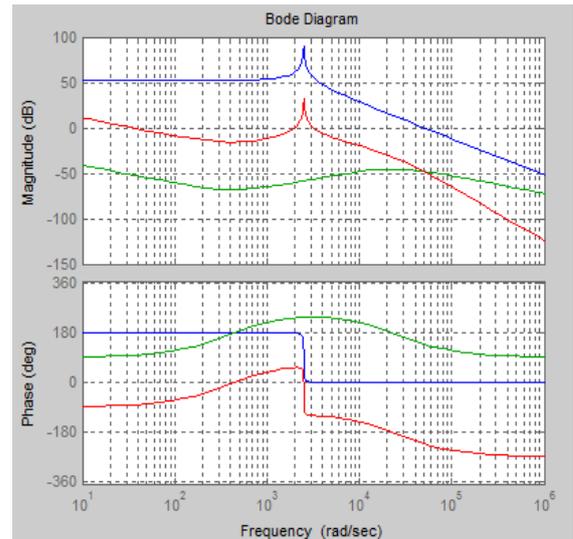


Figura 11 Diagrama de bode del controlador de voltaje del convertidor DC-DC del panel fotovoltaico

4.5. Diseño del controlador de voltaje de la Batería.

Para el diseño de este controlador se utilizó la técnica del factor K, con un margen de fase de 60° y un ancho de banda de 500 HZ. El diagrama de bloques de donde se partió para el controlador es el siguiente:

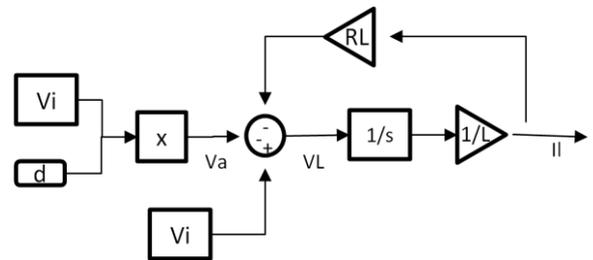


Figura 12 Diagrama de bloques del Convertidor DC-DC Boost del panel fotovoltaico

La ganancia de la planta G_p es la siguiente:

$$G_p = \frac{-1.5e009}{s^2 + 30s}$$

La ganancia del controlador G_c es el siguiente:

$$G_c = \frac{-2.094e-006 s^2 - 0.001765 s - 0.3716}{1.822e-009 s^3 + 8.536e-005 s^2 + s}$$

A continuación diagrama de bode de la ganancia de la planta, del controlador y la ganancia en lazo cerrado:

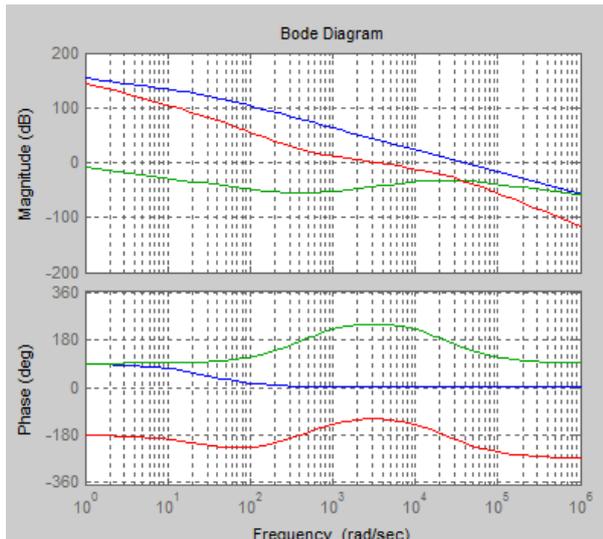


Figura 13 Diagrama de bode del controlador de voltaje del convertidor DC-DC de la batería

4.6. Diseño del controlador del Inversor

Para el diseño de este controlador se utilizó la técnica del factor K, con un margen de fase de 60° y un ancho de banda de 1000 HZ. Partimos de una serie de ecuaciones y se obtiene la ganancia de la planta G_p :

$$G_p = \frac{V_o(s)}{m(s)} = \frac{V_{DC} * R_{load}}{2((s^2 LC * R_{load}) + s(L + RL + C * R_{load}) + RL + R_{load})}$$

Mediante la técnica del factor k obtenemos la ganancia del controlador G_c :

$$G_c = \frac{3.429e - 006 s^2 + 0.01503 s + 16.48}{3.083e - 009 s^3 + 0.000111 s^2 + s}$$

A continuación diagrama de bode de la ganancia de la planta, del controlador y la ganancia en lazo cerrado:

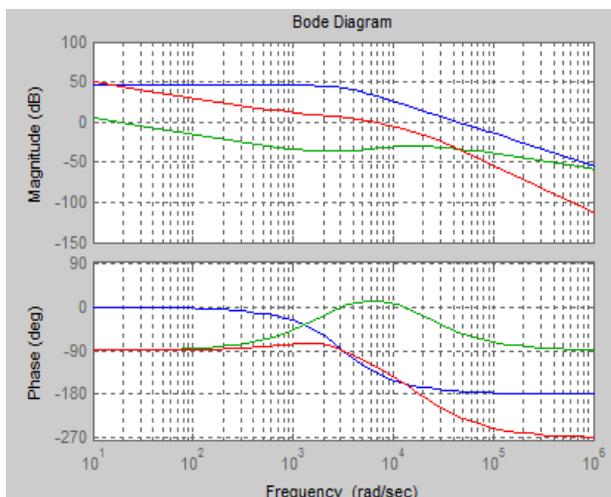


Figura 14 Diagrama de bode del controlador del Inversor

5. Simulación del funcionamiento del sistema completo

El funcionamiento individual de los módulos fue analizado, ahora se analizará el funcionamiento en conjunto de cada uno de los módulos para las diferentes situaciones de trabajo del convertidor.

5.1. Funcionamiento de los módulos Panel Fotovoltaico – Batería

El funcionamiento colectivo del módulo del panel fotovoltaico y del módulo de la batería se da cuando no existe una carga o existe poca carga conectada a la salida del convertidor, en esta situación el módulo del panel fotovoltaico trabaja cargando la batería, por lo tanto el módulo del panel fotovoltaico inyecta una corriente dc a la batería.

Para este caso de funcionamiento se tomará en cuenta variaciones en el voltaje a la salida del panel fotovoltaico, analizando lo que ocurre con la corriente dc inyectada a la batería.

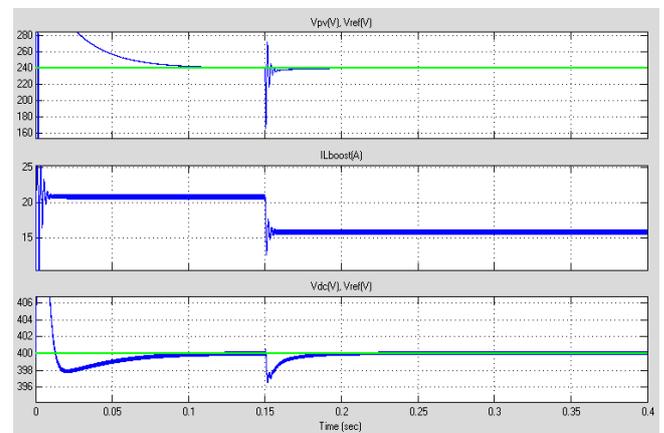


Figura 15 Voltajes y corrientes en el panel fotovoltaico y la batería.

5.2. Funcionamiento de los módulos Batería – Convertidor AC –DC

El funcionamiento en conjunto del módulo de la batería y del módulo del convertidor se da cuando no existe una luz solar por lo tanto el panel fotovoltaico no puede alimentar la carga, y entra el sistema de almacenamiento en este caso la batería, se espera que la corriente fluya desde la batería hacia la carga.

Para este caso de funcionamiento se tomará en cuenta variaciones en la carga conectada a la salida del

convertidor AC-DC, primero la batería alimenta una carga de 15 [Ω], luego de un tiempo se conectara una carga de 20[Ω] en paralelo

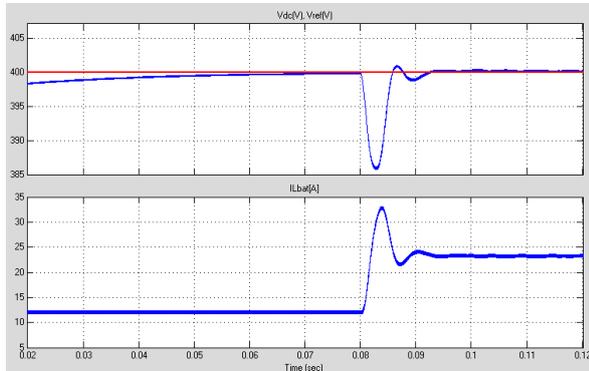


Figura 16 Voltajes y corrientes en la Batería

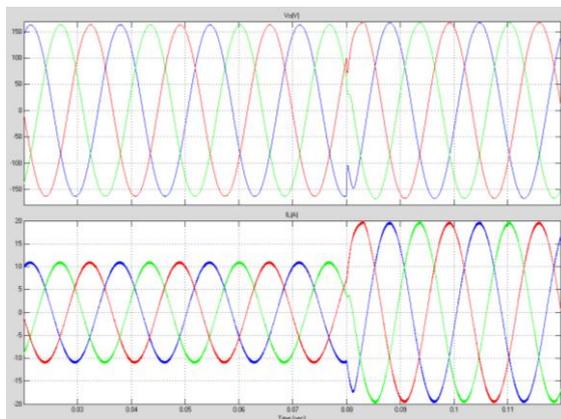


Figura 17 Voltajes y corrientes en la Carga

5.3. Funcionamiento de los módulos Panel Fotovoltaico – Batería- Convertidor DC-AC

El funcionamiento en conjunto de los tres módulos se da para suplir la necesidad de los casos explicados anteriormente, en caso de falta de luz solar entra en funcionamiento la batería, con baja carga o sin carga el panel fotovoltaico carga la batería, trabajando con carga nominal la corriente fluye desde el panel fotovoltaico hacia la carga.

Para este caso se tomara en cuenta variaciones en la corriente del panel fotovoltaico así como variaciones de carga, con estas consideraciones se espera que la corriente en la batería con poca carga fluya hacia la batería de tal manera que se esté cargando, aumentando la carga la corriente fluya hacia la carga de tal manera que supla la parte de la carga que el panel fotovoltaico no pueda suplir, cuando varia el voltaje en el panel fotovoltaico varia el voltaje en el enlace DC ligeramente hasta estabilizarse.

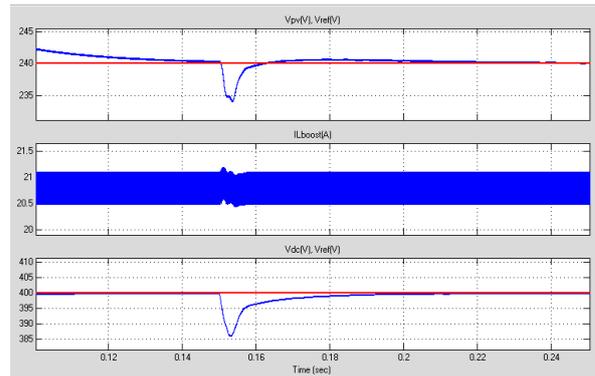


Figura 18 Voltajes y corrientes en la batería y panel fotovoltaico

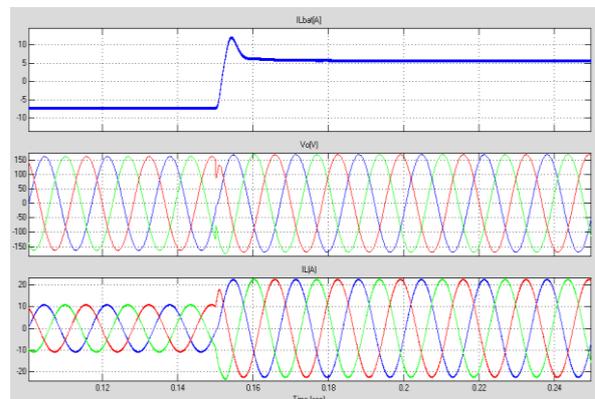


Figura 19 Voltajes y corrientes en la batería y la carga

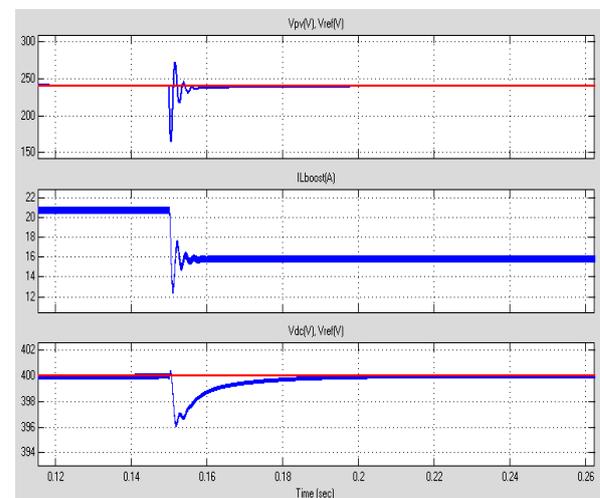


Figura 17 Voltajes y corrientes en el panel fotovoltaico

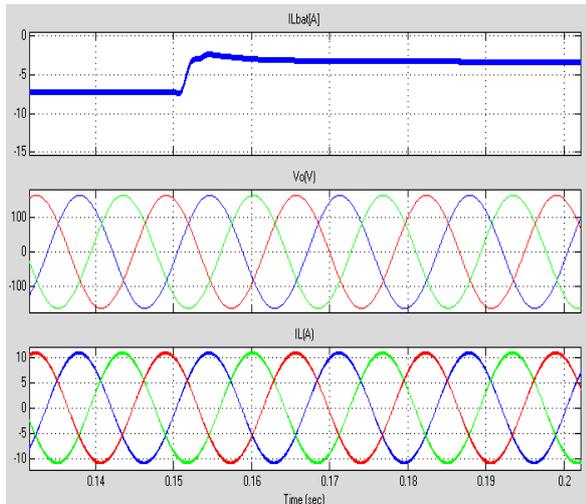


Figura 20 Voltajes y corrientes en la batería y en la carga

5.4. Controlador principal del sistema completo

El controlador principal es el encargado de controlar el sistema completo dependiendo de los diferentes factores y condiciones que afecten al sistema.

En el momento del arranque el primer módulo en arrancar es el de la batería ya que sin el enlace DC el resto de convertidores no funcionan correctamente, luego el módulo del convertidor DC –DC Boost y finalmente en convertidor DC-AC junto con la carga.

Luego de arrancar todo el sistema el controlador principal se encargará de buscar el punto de máxima potencia en el arreglo de paneles fotovoltaicos, así aprovechar al máximo la luz solar que le llega a los paneles.

En el día el controlador se encargara de regular la potencia de salida del arreglo de paneles fotovoltaicos así como la potencia de salida del arreglo de baterías para alimentar la carga, si hay mucha demanda de potencia los dos arreglos inyectan potencia hacia la carga, en caso de existir poca demanda el controlador regulara la potencia del panel fotovoltaico de tal manera de alimentar la carga y también de cargar las baterías.

En la noche donde no existe luz solar, se desconecta el convertidor DC-DC Boost junto al arreglo de paneles fotovoltaicos, en caso de ser una carga sensible que necesita estar energizada continuamente es alimentada por el arreglo de baterías caso contrario se desconecta el sistema completo, primero se desconecta la carga, luego el convertidor DC-DC Boost y finalmente el arreglo de baterías.

En caso de existir una falla en la carga, para evitar daños a los convertidores se desconecta el convertidor DC-AC del sistema hasta reparar el daño en la carga, si el arreglo de baterías necesita cargarse los dos convertidores seguirán conectados entre sí caso contrario se desconecta todo el sistema.

Conclusiones.

Se concluye mediante lo observado en las simulaciones que el objetivo principal del proyecto se cumplió satisfactoriamente, se pudo diseñar los controladores y simular un sistema de generación de energía eléctrica basado en módulos fotovoltaicos, un inversor trifásico desconectado de la red y una batería como unidad de almacenamiento.

Mediante un análisis de conservación de la potencia y basado en las simulaciones, se concluye que cuando no hay demanda máxima de potencia del arreglo de paneles fotovoltaicos, la potencia restante sirve para cargar la batería.

Por medio de las simulaciones realizadas se concluye que se han seleccionado los controladores correctos, ya que ante cualquier perturbación de voltaje o de corriente el sistema responde de una manera satisfactoria.

El dimensionamiento de las reactancias, inductancias y capacitancias de cada convertidor fue el correcto, cuando funcionaron los tres convertidores juntos se obtuvieron los rizados de voltaje y de corriente dentro del rango permitido.

Recomendaciones.

Se recomienda que cuando el sistema esté conectado, el capacitor de enlace DC debe estar cargado; en caso contrario el sistema podría no funcionar adecuadamente, para esto se puede implementar un circuito adicional para cargar el capacitor antes del arranque del sistema.

Se recomienda no arrancar el sistema con cargas elevadas, esto podría causar un mal funcionamiento.

Bibliografía.

[1] ECOPOWER, energías renovables, http://www.ecopowerchile.com/blog/?page_id=492 , Julio 20 del 2010

[2] Fast Fourier Transform Laboratory, convertidor DC-DC Boost, <http://fftlab.com/Electronica%20de%20Potencia/Convertido%20Elevador/Boost.htm>, Agosto 9 del 2010

[3] Mohan, Ned, "First course on Power Electronics and Drives", MNPERE, 2003 Mohan, Undeland, Robbins, "Power Electronics: Converters, Applications, and design", Wiley, 2003, Septiembre 10 del 2010

[4] Wikipedia, Modulación por anchos de pulsos, [es.wikipedia.org/.../Modulación_por_ancho_de_pulsos](https://es.wikipedia.org/.../Modulaci3n_por_ancho_de_pulsos) Octubre 20 del 2010