Diseño del Control y Simulación de un Sistema de Generación Eléctrica Basado en Módulos Fotovoltaicos, un Inversor Monofásico Conectado a la Red y Baterías como unidad de Almacenamiento.

Ronald Carchi [(1)], Manuel Romero [(2)], Síxifo Falcones [(3)]
Facultad de Ingeniería en Electricidad y Computación [(1) (2) (3)]
Escuela Superior Politécnica del Litoral (ESPOL) [(1) (2) (3)]
Campus Gustavo Galindo, Km 30.5 Vía Perimetral
Apartado 09-01-5863. Guayaquil, Ecuador
rorn46@hotmail.com [(1)], manuelrc_1988@hotmail.com [(2)], sixifo@espol.edu.ec [(3)]

Resumen

El presente trabajo 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 monofásico conectado a la red y baterías como unidad de almacenamiento de energía. El dimensionamiento de los elementos constitutivos del sistema (inductancias, capacitancias, baterías, módulos fotovoltaicos, etc.) es presentado así como también el modelamiento matemático de los convertidores, lo que permitirá determinar los respectivos controladores.

Las señales a controlar son el voltaje de los módulos fotovoltaicos, el voltaje de enlace DC y 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: *controladores, energía fotovoltaica, inversor, baterías.*

Abstract

The present work consists in the control design of a PV based electrical generation system. The generation system includes PV modules, a grid-connected single-phase inverter and batteries for energy storage. The calculation of the ratings of all the elements in the system (inductances, capacitances, batteries, PV, etc.) is presented as well as the modeling of the converters, which will be used to determine their respective controllers.

The signals to be controlled are the PV voltage, the DC-link voltage and the battery current. The performance of the controllers is verified through simulation of the complete system using SIM POWER SYSTEM from MATLAB/SIMULINK.

Keywords: *controllers, PV, inverter, batteries.*

1. Introducción

El ser humano en su continua búsqueda de energía fiable y económica, ha abusado de aquella energía que proviene de combustibles fósiles, provocando el más serio problema medio ambiental que es el calentamiento global. Dentro de las opciones que se contemplan para minimizar este inconveniente, está el uso de fuentes alternativas de energía, que son renovables y limpias. En la actualidad una de las energías que más acogida está teniendo a nivel mundial es la solar fotovoltaica.

El presente trabajo consiste en diseñar el control de un sistema de generación de energía eléctrica basado en módulos fotovoltaicos, un inversor monofásico conectado a la red eléctrica y baterías como unidad de almacenamiento. Para comprobar el funcionamiento del sistema se usa la herramienta de simulación SIMPOWERSYSTEM del programa MATLAB/ SIMULINK. De esta forma se busca captar la energía proveniente del sol para convertirla en energía eléctrica por medio del sistema propuesto y disminuir el consumo de la red eléctrica pública, pudiendo existir casos en que la producción de energía del sistema sea mayor a la demanda del hogar, dándose la posibilidad de vender éste exceso de energía.

2. Proyecto Propuesto

El proyecto que se plantea consiste en diseñar los controladores de un sistema de generación de energía eléctrica basado en módulos fotovoltaicos, cuyo funcionamiento será verificado mediante un software de simulación.

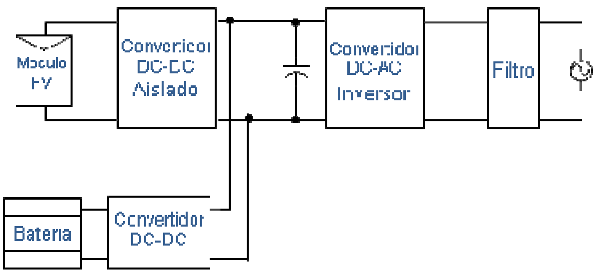

Figura 1. Esquema del Sistema de Generación

Se busca aprovechar la energía del sol para generar energía eléctrica mediante este sistema. Como se sabe, la energía que se consume en los hogares proviene de la red eléctrica pública, por lo que el consumo se debe pagar a la empresa que provee este servicio.

El uso de una batería como almacenamiento permite guardar energía cuando se tenga excedentes, llegando al punto en que se pueda proveer energía a la red eléctrica. Así también se pudiera dar el caso que la demanda eléctrica es mayor a lo que produce el sistema, por lo que tranquilamente se podría tomar esa energía faltante de la red eléctrica pública.

Es necesario aclarar que el sistema que se va a diseñar se lo podrá aplicar, únicamente en sitios donde se reciba una sola fase de alimentación.

3. Descripción del Sistema de Generación

A continuación se describe de manera general el funcionamiento y función de los principales componentes del sistema de generación.

3.1. Módulos Fotovoltaicos.

Son un conjunto de células fotovoltaicas conectadas entre sí, con el objetivo de transformar la luz proveniente del sol, a energía eléctrica.

Se colocan los módulos fotovoltaicos en serie para sumar el voltaje y se colocan en paralelo para sumar corriente, de esta forma obteniendo una potencia determinada.

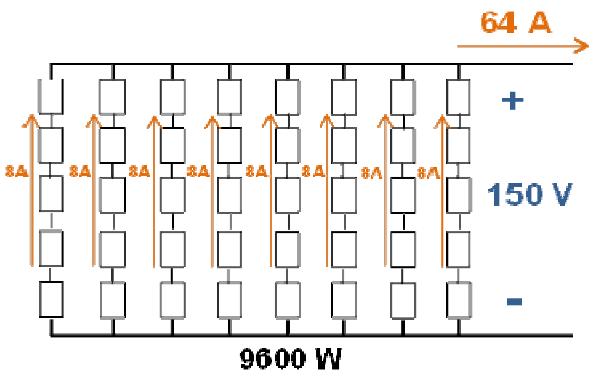

Figura 2. Arreglo de Módulos Fotovoltaicos

3.2 Convertidor DC-DC (Boost Aislado)

Es un circuito eléctrico encargado de tomar la tensión de su entrada y brindar una tensión de salida mayor a la de la entrada.

Los switches que posee le permiten modular un voltaje promedio en su salida, gracias a la carga y descarga del inductor que posee.

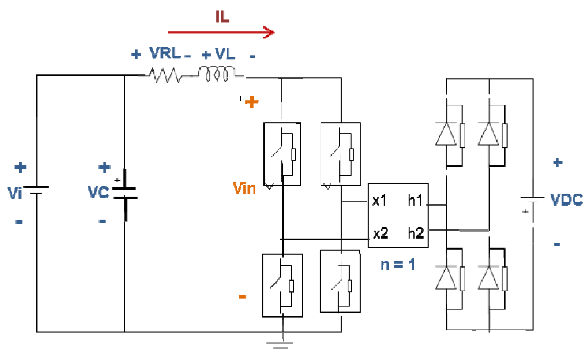

Figura 3. Esquemático del Convertidor Boost Aislado

3.3 Convertidor DC-AC (Inversor)

También llamado inversor, su función principal es la de recibir un voltaje DC en su entrada y mediante técnicas de conmutación de switches, entregar en su salida un voltaje AC, pudiendo ser comúnmente un voltaje sinusoidal o cualquier otro tipo de voltaje variable.

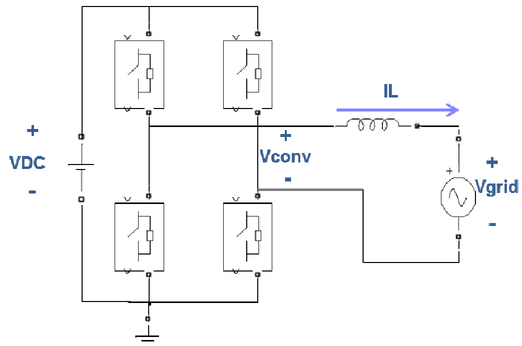

Figura 4. Esquemático del Inversor

3.4 Convertidor DC-DC (Almacenamiento)

Este convertidor va a ser usado para el manejo de la corriente de carga y descarga de la batería. Este convertidor es un tipo de fuente de alimentación conmutada.

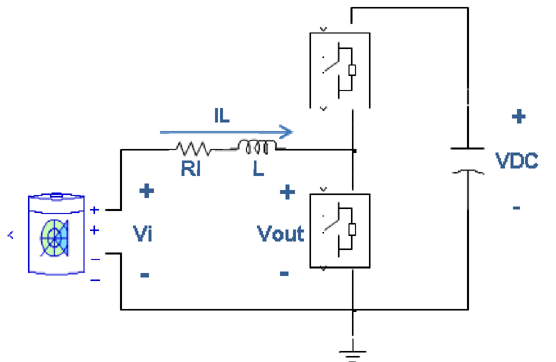

Figura 5. Esquemático del Convertidor para el Almacenamiento

4. Dimensionamiento de Elementos y Modelamiento de los Convertidores.

Se ha tomado los siguientes criterios para el dimensionamiento de los elementos: que el rizado máximo de corriente permitido a través de los inductores sea menor al 10% de la corriente nominal que circula por dicho inductor, así también que el rizado máximo de voltaje permitido en los capacitores sea menor al 1% del voltaje nominal de dicho capacitor.

4.1 Convertidor DC-DC (Boost Aislado)

El valor de la inductancia que se ha seleccionado en base al rizado máximo permitido es de **1 mH.**

A continuación se muestra la correspondiente simulación de la corriente instantánea en el inductor.

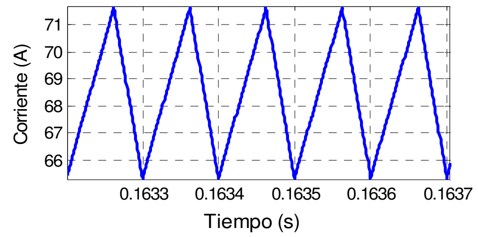

Figura 4. Corriente Instantánea en el Inductor

El valor que ha sido seleccionado para el capacitor es de **100 uF.** Este valor de capacitancia asegura mantener un rizado máximo de voltaje como se puede observar en la siguiente simulación.

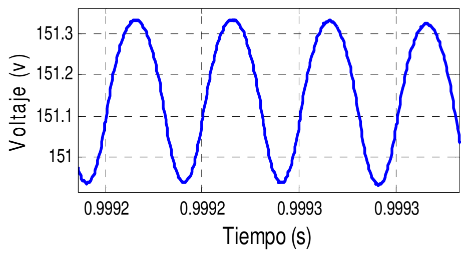

Figura 4. Voltaje Instantáneo en el Capacitor

La siguiente ecuación pertenece a la función de transferencia del convertidor, la cual se la ha obtenido por desarrollo matemático.

$$\frac{Vi}{D} = \frac{-VDC \times Wn^2}{n(s^2 + \frac{1}{\tau}s + Wn^2)}$$

Vi: voltaje de entrada
D: ciclo de trabajo
VDC: voltaje de enlace DC
Wn: frecuencia natural de oscilación

$$Wn = \frac{1}{\sqrt{L \times C}}$$

n: relación de vueltas del trasformador
τ: (tao) constante de tiempo

$$\tau = \frac{L}{Rl}$$

4.2 Convertidor DC-AC (Inversor)

El valor de la inductancia que se ha seleccionado en base al rizado máximo permitido es de **150 uH.** Se muestra la correspondiente simulación de la corriente instantánea en el inductor para verificar lo antes mencionado.

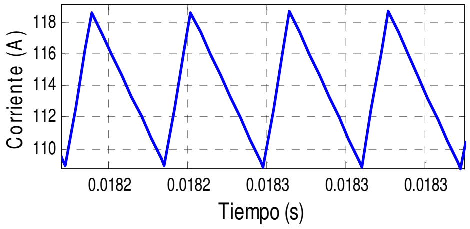

Figura 4. Corriente Instantánea en el Inductor

Se ha seleccionado una capacitancia de **12 mF**, la cual asegura tener un máximo de rizado de voltaje. En este capacitor se debe tener en cuenta que el rizado que se debe minimizar es grande y tiene oscilaciones de 120Hz. En la siguiente gráfica se muestra el rizado para la capacitancia seleccionada.

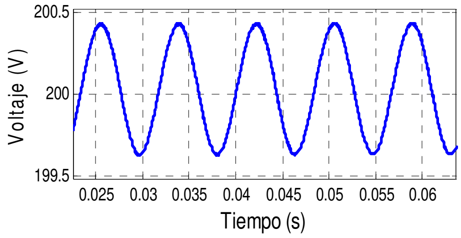

Figura 4. Voltaje Instantáneo en el Capacitor

El modelamiento matemático de este convertidor se lo ha hecho en dos partes, uno basado en la corriente que se inyecta a la red y otro basado en el voltaje de entrada al inversor, aunque realmente este segundo se lo hace basado en la energía del capacitor, la cual es proporcional al voltaje del mismo.

Se presenta la función de transferencia que relaciona la corriente de transferencia con el índice de modulación de este convertidor.

$$\frac{IL(s)}{ma(s)} = \frac{Vdc}{Ls}$$

IL: corriente del inversor
ma: índice de modulación
Vdc: voltaje de entrada al inversor
L: inductancia

Esta función de transferencia se basa en la energía del capacitor de enlace DC, dependiendo de la energía instantánea que posea, se va a generar la corriente de referencia que debe seguir el convertidor, ya sea para que la energía del capacitor aumente o disminuye, pero en promedio se mantenga estable.

$$\frac{E(s)}{IL(s)} = -\frac{Vconv}{2s}$$

E: energía del capacitor de enlace DC
IL: corriente del inversor
Vconv: voltaje del inversor

4.3 Convertidor DC-DC (Almacenamiento)

El valor de la inductancia que se ha seleccionado en base al rizado máximo de corriente permitido es de **600 uH.** A continuación se muestra la simulación de la corriente instantánea en el inductor.

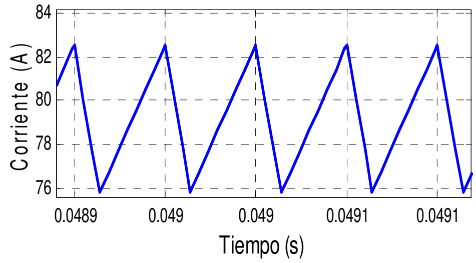

Figura 4. Corriente Instantánea en el Inductor

Se necesita la función de transferencia de este convertidor para diseñar un controlador capaz de regular la corriente de carga y descarga de las baterías, por lo que se hace un análisis matemático obteniendo la siguiente función:

$$\frac{IL(s)}{d(s)} = \frac{-\frac{VDC}{L}}{s + \frac{1}{\tau}}$$

IL: corriente de carga/descarga de la batería
d: ciclo de trabajo
VDC: voltaje de enlace DC
L: inductancia
τ: (tao) constante de tiempo

$$\tau = \frac{L}{Rl}$$

5. Diseño de los Controladores

Son tres los controladores que se diseñarán en esta sección, cada uno con una función específica que se describe posteriormente.

5.1 Control del Voltaje de los Módulos FV

El objetivo de este controlador es regular el voltaje de entrada al sistema, el cual pertenece a los módulos fotovoltaicos, de esta manera obteniendo la máxima potencia de los módulos. Esto garantiza que el sistema de generación se mantenga entregando la máxima potencia posible proveniente de los módulos fotovoltaicos.

Ancho de Banda: 1800 Hz (11300 rad/s)
Margen de Fase: 60 º

$$Gc = \frac{-90164.9728\,(s+1506)^2}{s\,(s+8.492e004)^2}$$

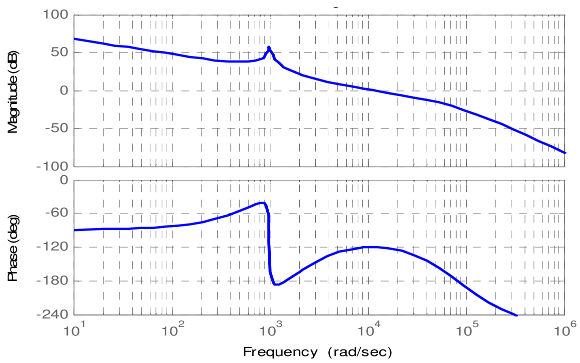

Figura 4. Diagrama de Bode en Lazo Abierto

5.2 Control del Voltaje de Enlace DC

Del voltaje de enlace depende el voltaje de salida del inversor y la corriente de carga y descarga de las baterías, por esto se hace necesario un controlador capaz de mantener el valor de este voltaje lo más estable posible frente a las posibles perturbaciones del sistema.

Este es un control en cascada donde el lazo más rápido va a ser un lazo que controle la corriente que se inyecte a la red y el lazo más lento será el que controle el voltaje del capacitor de enlace DC.

A continuación se hace referencia al lazo interno de corriente:

Ancho de Banda: 1000 Hz (6300 rad/s)
Margen de Fase: 60 º

$$Gci = \frac{110.5016\,(s+1684)}{s\,(s+2.345e004)}$$

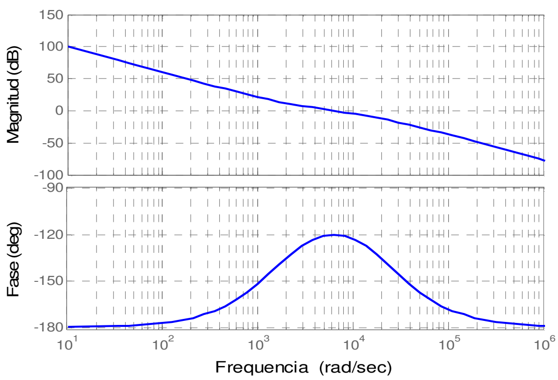

Figura 4. Diagrama de Bode en Lazo Abierto

Ahora se hace referencia al lazo externo correspondiente al voltaje (energía) de enlace DC

Ancho de Banda: 12 Hz (75 rad/s)
Margen de Fase: 60 º

$$Gcv = -\frac{249.6036(s+20.2)}{s(s+281.4)}$$

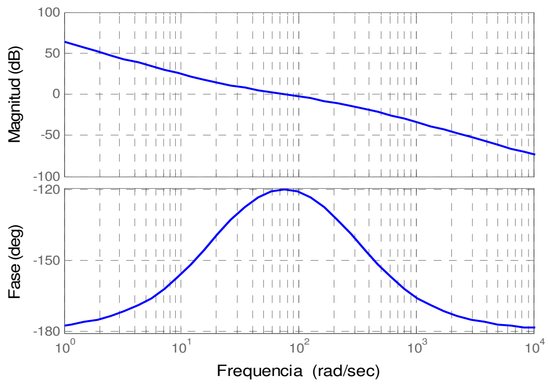

Figura 4. Diagrama de Bode en Lazo Abierto

5.3 Control de Corriente de la Batería

Debido a que el sistema de generación se basa en la energía proveniente del sol, se hace indispensable un almacenamiento de energía capaz de proveer la misma durante las noches, por este motivo debe existir un control capaz de regular la corriente con la que se va a cargar y descargar las baterías.

Ancho de Banda: 1000 Hz (6300 rad/s)
Margen de Fase: 60 º

$$Gc = \frac{-209.9073\,(s+1773)}{s\,(s+2.226e004)}$$

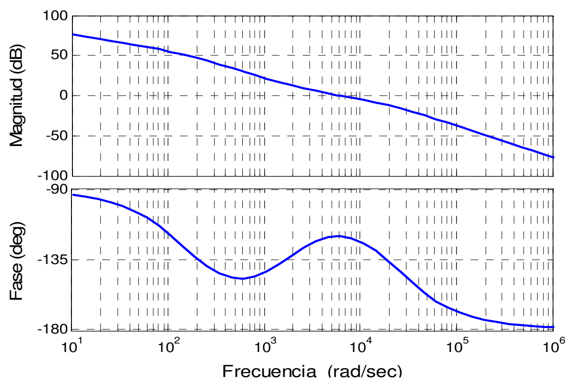

Figura 4. Diagrama de Bode en Lazo Abierto

6. Funcionamiento del Sistema

En esta sección se verifica el correcto funcionamiento del sistema completo, de esta manera quedando comprobada la efectividad de los tres controladores previamente diseñados.

6.1 Inicialización

En el momento que se pone a funcionar el sistema completo, se debe tener presente algunos aspectos que permitan el correcto funcionamiento del mismo.

En primer lugar la estabilización del Voltaje de Enlace DC sin flujo de potencia (Voltaje de circuito abierto en módulos FV). De ahí se realiza un cambio progresivo de voltaje de circuito abierto a voltaje de máxima potencia.

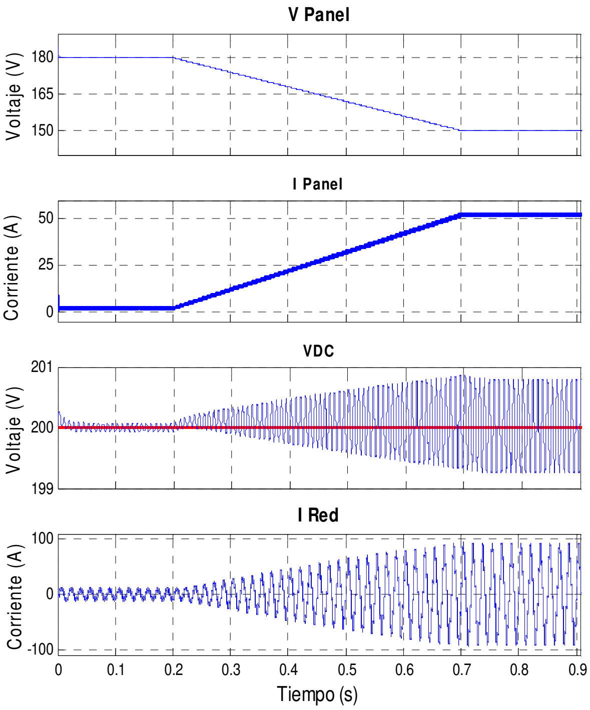

Figura 4. Respuestas a la Inicialización del Sistema

6.2 Aumento y Disminución de la Intensidad Luminosa

La generación FV depende de la luz, esta es una variable que no se puede controlar porque depende de factores ambientales.

Por este motivo este tipo de generación se vuelve intermitente, lo que se convertiría en un verdadero problema, porque no se tiene una fuente de energía perenne.

La simple presencia de una nube, sería una disminución en la intensidad de luz que recibe el panel, lo que se traduce en una menor inserción de corriente hacia el sistema de generación planteado. Así mismo las noches en general sería un problema para el sistema, ya que al no haber presencia de luz queda inactivo, es por este motivo que se requiere un almacenamiento.

Es de mucho interés observar la respuesta del sistema a estas perturbaciones que se dan constantemente.

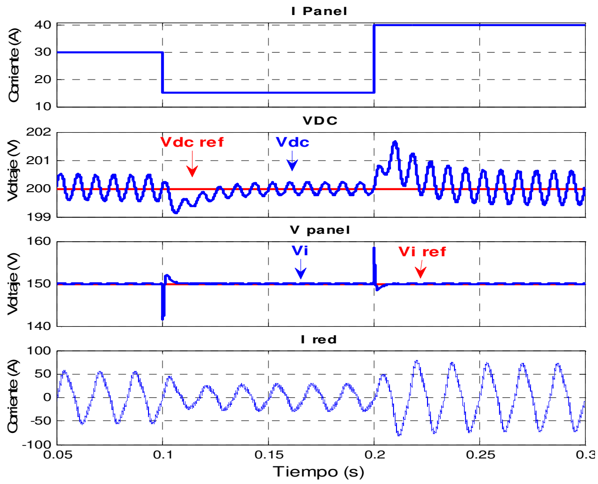

Figura 4. Respuestas a la Intensidad Luminosa

6.3. Carga y Descarga de la Batería

El proceso de carga de la batería consiste en tomar potencia de los módulos fotovoltaicos para almacenarla en la batería. La potencia se traduce en corriente que fluye desde el enlace DC hacia la batería.

La carga se la puede realizar cuando se tiene niveles altos de radiación solar, así se estará almacenando energía para usarla cuando se la necesite.

Se presenta la gráfica de carga de la batería, el valor negativo de la corriente de la batería se debe a que la referencia de la corriente fue definida de forma positiva desde la batería hacia el convertidor Boost.

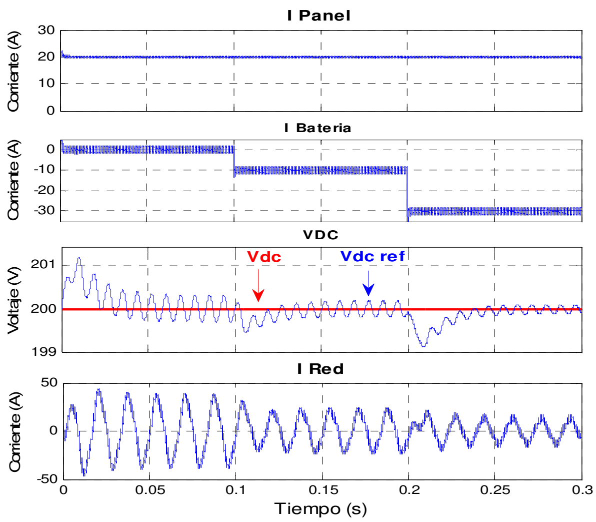

Figura 4. Respuestas a la Carga de la Batería

El propósito de descargar la batería es para aprovechar la energía que se ha almacenado, los momentos adecuados para realizarlo son; en las horas pico de consumo eléctrico para tratar de reducir la demanda y cuando los módulos fotovoltaicos no estén entregando suficiente potencia para el sistema.

Se presenta la gráfica de descarga de la batería, el valor positivo de la corriente de la batería se debe a que la referencia de la corriente fue definida de forma positiva desde la batería hacia el convertidor Boost.

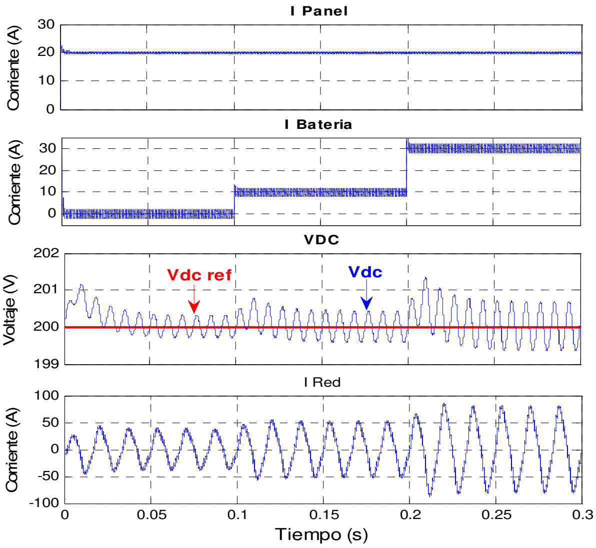

Figura 4. Respuestas a la Descarga de la Batería

Conclusiones

- Tanto el rizado del voltaje de los capacitores, como el rizado de la corriente que circula por los inductores que se ha podido observar en las simulaciones del sistema, se encuentran dentro de los rangos máximos permitidos. Esto permite afirmar que el dimensionamiento de capacitancias e inductancias ha sido correcto.

- El modelo promedio de los convertidores que fue usado para obtener los respectivos controladores responde de forma similar que los modelos de conmutación, frente a las distintas perturbaciones que en su debido momento se aplicaron, lo cual confirma que el modelo promedio representa de excelente manera al sistema.

- Las simulaciones demuestran que la corriente que se inyecta a la red toma menos tiempo en ser estabilizada con respecto al voltaje de enlace, esto sucede tal cual se lo predijo, debido a que el inversor necesitaba un controlador en cascada, donde el lazo interno que regula la corriente es más rápido que el lazo externo que regula el voltaje de enlace.

- El sistema tiene la capacidad de brindar la potencia máxima para la que fue diseñado, sin encontrarse necesariamente los módulos FV brindando su potencia máxima. La razón de esto es que se puede complementar la potencia que entregan los módulos FV con la potencia del almacenamiento.

- La inicialización del sistema que se propuso no presentó inconvenientes, ya que el voltaje de enlace, el voltaje del panel y la corriente de salida del inversor fueron reguladas en un tiempo menor a 0,8s aproximadamente, tiempo considerado como satisfactorio.

Recomendaciones

- Sería importante realizar todos los estudios necesarios tales como factibilidad, sostenibilidad e impacto ambiental para determinar si el tema planteado es aplicable, o si es necesario realizar alguna modificación con la finalidad de satisfacer las demandas de energía en el sector donde el sistema va a ser instalado, si es rentable y finalmente si es amigable con el entorno.

- Ser cuidadoso al elegir la batería a ser usada, ya que el almacenamiento es transcendental. Asegurarse que se va a trabajar a temperaturas adecuadas, a su vez, que pueda soportar los picos de corriente máximo del sistema. Revisarla y darle mantenimiento periódicamente con la finalidad de alargar su vida útil.

- Seleccionar los fusibles para la protección de forma adecuada, ya que por la presencia de inductores en el sistema, al momento de existir un corto circuito, el fusible se acciona cortando el camino de la corriente, algo que el inductor no lo permitirá, por tal motivo el inductor inmediatamente cambia su polaridad con la finalidad de mantener la corriente y este cambio puede producir un rompimiento dieléctrico y ocasionar un incendio.

- Tener presente todos los parámetros de la norma IEEE 1547 para la conexión con la red, ya que de no cumplirse, habrá problemas como desbalance en los voltajes, armónicos, bajones de voltaje o subidas de voltaje en la red, lo que sería perjudicial para todos los abonados de la empresa eléctrica del lugar donde esté instalado el sistema.

- Al momento de dimensionar los elementos que forman parte de los diversos convertidores estáticos usados en el presente proyecto, asegurarse que no se los sobredimensionen, ya que este hecho haría que el sistema se encarezca más innecesariamente.

- La empresa eléctrica provee dos fases de 120 Vrms a la mayoría de viviendas en la actualidad, por lo que sus cargas van divididas entre sus dos fases para tenerlas balanceadas. El sistema que se ha diseñado tiene una salida de voltaje de 120 Vrms, al ser instalado en este tipo de viviendas, causaría un desbalance de las fases. Por este motivo se podría duplicar el voltaje de salida del sistema a 240 Vrms con lo cual no existiría ningún inconveniente. Para lograr este cometido, se debe también duplicar el voltaje de enlace de 200 V a 400 V.

Referencias

[1] Marcelo Romero Tous, “ENERGÍA SOLAR FOTOVOLTAICA”, Primera Edición, Ediciones Ceac, 2008.

[2] Muhammad H. Rashid, “ELECTRÓNICA DE POTENCIA”, Tercera Edición, Pearson Education, México 2004.

[3] Revista Electro Industria, “El Boom de la Generación Fotovoltaica en el Mundo”, http://www.emb.cl/electroindustria/articulo.mv?xid=798&tip=7, 2010.

[4] Dorf Bishop, “SISTEMAS DE CONTROL MODERNO”, Décima Edición, Pearson Education, 2008.

[5] Benjamin Kuo, “SISTEMAS DE CONTROL AUTOMÁTICO”, Séptima Edición, Pearson Education, 1996.

[6] Siliken, Energía Renovable, http://www.siliken.com, 2010.

[7] Diego Oñate Arresti, ¨DISEÑO DE UNA INSTALACIÓN SOLAR¨, Primera Edición, http://www.torres-refrigeracion.com/pdf/art_fot_014.pdf, 2010.