

Diseño y Simulación del Control de un Transformador de Estado Sólido de Tres Etapas con Entrada Monofásica y Salida Monofásica Basado en un Convertidor DC-DC de Doble Puente Activo y un Convertidor AC-DC Multinivel de Puentes en Cascada

Francisco Xavier Arcentales Bastidas⁽¹⁾, Rubén Darío Viñán Velasco⁽²⁾, PhD. 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
 farcentales@hotmail.com⁽¹⁾, dvinan@gmail.com⁽²⁾, sixifo@espol.edu.ec⁽³⁾

Resumen

El presente artículo muestra el diseño de un Transformador de Estado Sólido y su control, y las pruebas respectivas para verificar su correcto funcionamiento. El transformador diseñado tiene el potencial de ser parte fundamental del modelo de red inteligente. Es capaz de mantener los valores nominales a la salida de cada etapa dentro de un rango tolerable para operación y a la vez es capaz de soportar perturbaciones comunes en los sistemas de potencia. El modelo que se desarrolla consta de tres etapas, la primera es un convertidor AC/DC o rectificador que convierte el voltaje de la red en un voltaje DC, entregando la señal repartida en cuatro niveles utilizando un esquema de convertidores multinivel de puentes en cascada, a continuación se tiene un bloque DC-DC, con tres DAB o Doble Puentes Activos, cuya función es reducir el voltaje a un valor nominal DC específico para su integración con formas alternativas de energía, finalmente se tiene el bloque inversor que convierte el voltaje de salida del bloque DAB a un doble circuito voltaje 110 V AC de valor nominal para uso a nivel de distribución. Entre cada bloque existe un enlace DC, enlace DC de alto voltaje para conexión del rectificador con el bloque DAB y un enlace DC de bajo voltaje para conectar la salida del bloque DAB con el inversor. Finalmente cada bloque con el respectivo lazo de control necesario para darle estabilidad y un rango de operación razonable al SST; el control se realiza sobre la señal moduladora o de conmutación que se emplee en cada tipo de convertidor. Los resultados por etapas y para las diferentes pruebas demuestran el correcto funcionamiento del SST.

Palabras Claves: Inversor, Rectificador, Transformador de Estado Sólido, DAB, Red Inteligente.

Abstract

This paper presents the design of a Solid State Transformer (SST) and its controller, and the respective tests in order to verify its correct operation. The SST designed has the potential to become a fundamental part of the Smart Grid model. It is able to keep output voltages at each stage within a tolerable range of operation, while at the same time handle disturbances common to power systems. The developed model consists of three stages: the first stage is an AC to DC converter or rectifier that convert the grid voltage to DC voltage, but this voltage is delivered in four levels by using a cascaded diode multilevel converter scheme; this is followed by a DC to DC block with three Double Active Bridges (DAB) whose function is to reduce the voltage level to an specific DC nominal value to enable its integration with alternative energy sources; finally, an inverter block convert the DAB's output voltage into two 110 AC nominal voltage circuits that is used for distribution purposes. Between each block pair there is a DC linkage: a High Voltage DC Link for the connection from the rectifier to the DAB block and a Low Voltage DC Link for the connection of the DAB block with the inverter. Lastly, each block has its own control loop required providing stability and an acceptable operating range to the SST. This control loop operates on the switching signal or modulation index that is used in each converter. Results of the simulations by stages and from the different tests proved the correct operation of the SST.

Keywords: Inverter, Rectifier, Solid State Transformer, DAB, Smart Grid.

1. Introducción

El propósito de esta investigación está en diseñar un elemento que responda a los requerimientos de la implementación de una red inteligente, en este caso un

transformador de estado sólido, así como el diseño del control del dispositivo.

El transformador de estado sólido es un elemento fundamental en los nuevos modelos de redes eléctricas desarrollando, dado los nuevos requerimientos de carga y la urgencia de crear una interacción dinámica entre

generación y carga, aplicación de generación distribuida e inclusión de fuentes alternativas de energía, lo que solucionaría gran parte de los problemas energéticos que se tienen hoy en día.

La importancia del SST (Solid State Transformer) radica en su capacidad de integrar otras fuentes de energía, capacidad de permitir conectar indistintamente alimentación DC o AC, y la capacidad de autorregularse ante distintas condiciones de carga. Se plantean como objetivos principales de este artículo diseñar los convertidores respectivos de cada etapa del SST, establecer los parámetros necesarios para el controlador y diseñar el control respectivo en cada etapa del SST y realizar pruebas para operación a carga nominal y perturbaciones con las que se buscará verificar el correcto funcionamiento del SST.

2. Planteamiento del Problema

La energía eléctrica es una de las necesidades más importantes para la sociedad actual pues es el motor de casi toda la industria. El crecimiento de la demanda, el aumento de componentes electrónicos en los equipos, exige a la industria eléctrica estar en constante búsqueda de fuentes de energía, mejora de los servicios en términos de continuidad, niveles de voltaje y frecuencia.

Siendo que el transformador es uno de los principales elementos de un sistema de potencia, y es quien alimenta a las diferentes cargas con el voltaje necesario, es por esto que es necesario desarrollar un elemento que logre reemplazar al transformador tradicional que permita integrar redes inteligentes y formas de energía alternativas.

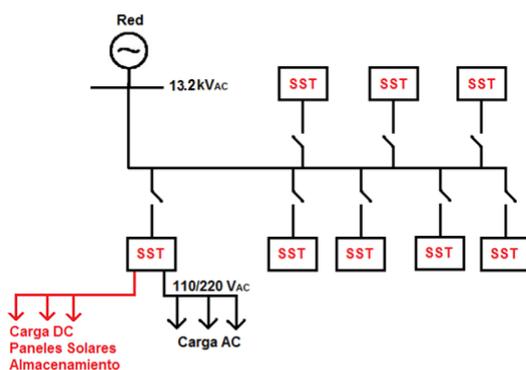


Figura 1. Esquema de Red Eléctrica Conectado a SST

El SST del presente proyecto transformará el voltaje de alimentación a otro nivel que sea requerido por medio de varios bloques. Consistirá en un bloque convertidor AC-DC, seguido de un bloque Dual Active Bridge (DAB) y finalmente con un convertidor DC-AC. Entre los convertidores se tendrán dos enlaces DC, uno para alto voltaje y uno para bajo voltaje según sea el

caso y los parámetros eléctricos del SST serán controlados por el sistema de control diseñado por el SST [1].

3. Fundamento Teórico

La comprensión de este artículo requiere el concepto de algunos aspectos del sistema eléctrico y de sistemas electrónicos.

3.1. Sistema Eléctrico de Potencia

Se denomina de esta forma a los componentes y procesos que forman parte del servicio de la energía eléctrica, desde la generación hasta la distribución de las cargas. El sistema de distribución es en el cual se enfoca este artículo y es que el alimenta de energía a los usuarios del sistema de potencia, con un nivel de 220V/110V.

3.2. Generación Distribuida

La generación distribuida es un esquema de sistema de potencia en el que se tiene fuentes de energía conectadas directamente a la red de distribución o en las instalaciones de los consumidores de forma que el flujo de energía puede ser dinámico y durante una falla de la red podrían suplirse las necesidades de energía sin problema [2].

3.3. Transformador de Alta Frecuencia

El transformador tradicional convierte un nivel de voltaje a otro, pero tiene como desventaja la limitación del gran tamaño que requiere. Los componentes electrónicos en cambio se caracterizan por su tamaño reducido y el transformador de alta frecuencia es el dispositivo que cumple con las mismas funciones que el tradicional, pero mediante el uso de conmutadores realiza la conversión a una frecuencia muy superior a la de la red [3].

3.4. Transformador de Estado Sólido

El transformador de estado sólido es el dispositivo que permite realizar la conversión de niveles de voltaje, pero permitiendo una gran flexibilidad a los valores a los que se puede convertir y permite un flujo dinámico de energía. En este artículo se discutirá el SST con una topología basada en HFT y DABs, recurriendo a un convertidor AC-DC con conmutadores multinivel y un convertidor DC-AC con doble circuito a la salida [1].

4. Dimensionamiento de los Componentes del Transformador de Estado Sólido

En esta etapa se realiza la aplicación topología del SST, la configuración de cada bloque y se realiza el dimensionamiento de los elementos a utilizar.

4.1. Métodos de Dimensionamiento

Es necesario comprender los métodos que se usaron para dimensionamiento de los convertidores, del índice de modulación, y demás componentes.

4.1.1. Dimensionamiento de Conmutadores.

Considerando los requerimientos de voltaje máximo a alimentar, la potencia a servir (100 KVA en total) y los de velocidad de conmutación necesaria para llevar a cabo el proceso de conversión, de igual forma la frecuencia a la que se realizará la conmutación (20 kHz) es un factor importante en la selección.

4.1.2. Dimensionamiento del Índice de Modulación.

Para este detalle del convertidor, el cual se aplica únicamente a los que utilizan modulación de ancho de pulso, se obtiene dividiendo el voltaje pico de ingreso al convertidor sobre el voltaje pico de salida.

$$m_a = \frac{V_{grid\ pico}}{V_{DC}} \quad (1)$$

4.1.3. Dimensionamiento del Inductor. Para esto se tomará medida de la máxima variación de voltaje que experimentará el convertidor, midiendo el voltaje de la fuente de ingreso y de la fuente de salida con desfase cero. Se definen las condiciones de rizado del convertidor a tratar. Aplicando la ecuación:

$$L = \frac{\int V_L dt}{\Delta I_L} \quad (2)$$

4.1.4. Dimensionamiento del Capacitor. El filtro capacitivo tendrá por objetivo compensar el componente alterno de las salidas de voltaje de los convertidores y mantener el rizado de las ondas de voltaje en un valor razonable. Tomando nuevamente el voltaje de rizado DC del capacitor a utilizar y la carga máxima que va a servir este capacitor [4].

$$C = \frac{S_{max}}{2 w_g V_{dc}^n V_{dc} r_{pp}} \quad (3)$$

A continuación se muestran los esquemas del SST:

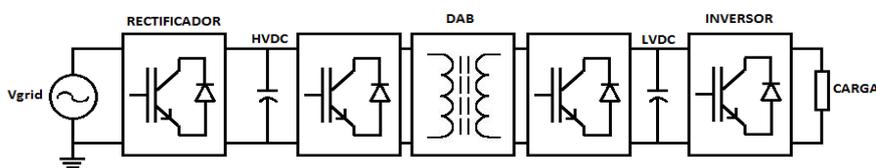


Figura 2. Esquema del Transformador de Estado Sólido

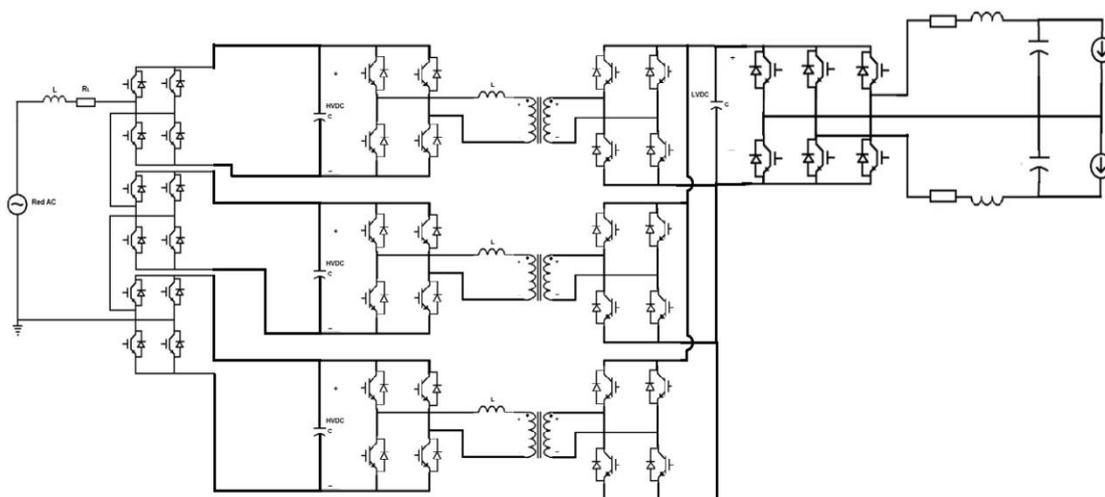


Figura 3. Esquemático completo de Transformador de Estado Sólido

4.2. Rectificador

Las condiciones nominales del rectificador son:

Tabla 1. Valores Nominales del Rectificador

Magnitud	Valor Nominal
Voltaje RMS en la red, V_g^n	7620 V
Corriente RMS en la red, I_g^n	13.2 A
Frecuencia de Conmutación, f_s	20 KHz
Voltaje DC-link, V_{dc}^n	13470 V
Porcentaje de Rizado de Corriente AC Pico	0.5%
Porcentaje de Rizado de Voltaje DC Pico	1%

El rectificador tiene como función convertir el voltaje AC de la red a voltaje DC de tres niveles. Aplicando los cálculos respectivos tenemos los valores finales dimensionados [13]:

Tabla 2. Elementos Dimensionados para Rectificador

Elemento	Valor Calculado	A Utilizar
C_{HVDC1} y C_{HVDC3}	225.17 μ F	230 μ F
C_{HVDC2}	479.18 μ F	480 μ F
L_{HVDC}	0.302 H	400 mH

El esquema del bloque rectificador con la configuración de puentes en cascada se presenta a continuación:

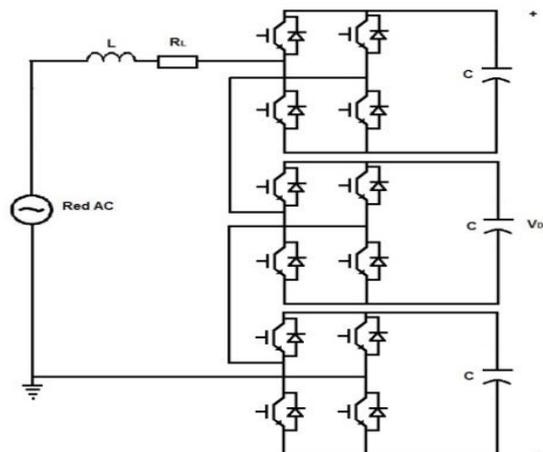


Figura 4. Esquema del Bloque Rectificador

4.3. Bloque Puente Activo Doble

El Puente Activo Doble en cambio se encarga de transformar el nivel de voltaje DC obtenido a un nivel DC inferior. Las condiciones nominales de este son:

Tabla 3. Valores Nominales del DAB

Magnitud	Valor Nominal
Voltaje DC entrada	4491 V
Voltaje DC salida	400 V
Frecuencia de Conmutación, f_s	20 KHz

Tenemos además que el cálculo de los inductores necesarios para este bloque DAB, que está compuesto por tres convertidores DC-DC resultó:

Tabla 4. Inductores Dimensionados Para el Bloque DAB

Inductor	Valor Calculado	A Utilizar
L_{DAB1}	1.4001 mH	1.4 mH
L_{DAB2}	6.865 mH	0.7 mH
L_{DAB3}	1.4001 mH	1.4 mH

El esquema del DAB utilizado se presenta:

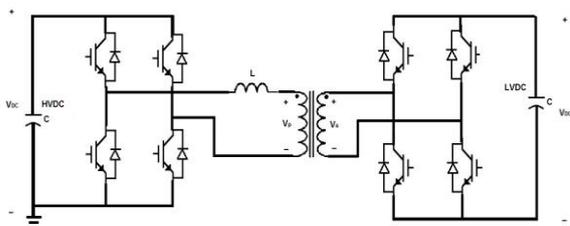


Figura 5. Esquema del DAB

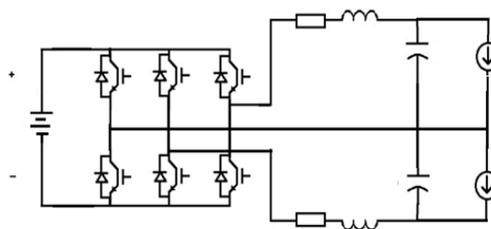


Figura 6. Esquema del Inversor

4.4. Inversor

El bloque inversor se encargará de convertir el voltaje DC entregado por el bloque DAB en voltaje AC por medio de dos circuitos simétricos, los valores nominales se describen a continuación:

Tabla 5. Valores Nominales del Inversor

Magnitud	Valor Nominal
Voltaje RMS en la red, V_g^n	110 V
Corriente Pico en la red, I_g^{pk}	642.82 A
Frecuencia de Conmutación, f_s	20 KHz
Voltaje DC-link, V_{dc}^n	400 V
Porcentaje de Rizado de Corriente AC Pico	4%
Porcentaje de Rizado de Voltaje DC Pico	1%

Los valores dimensionados para los elementos se describen a continuación, se debe notar que el capacitor del filtro LVDC se dimensiona según el inversor y no según el DAB debido a que su efecto mayormente recae en el primero:

Tabla 6. Elementos Dimensionados Para el Inversor

Elemento	Valor Calculado	A Utilizar
C_{Vo_a} y C_{Vo_b}	2.279 mF	2.5 mF
C_{LVDC}	117 mF	120 mF
L_{Vo}	175.01 μ H	175 μ H

El esquema del bloque inversor se tiene:

5. Modelo del Controlador

Aplicando los métodos de Polo Resonante o Factor K, se procederá a elaborar el control de cada etapa del SST y corroborar el funcionamiento correcto del mismo. Entonces es necesario inicialmente trazar las variables de control y las funciones de transferencia respectiva.

5.1. Rectificador

Las respectivas funciones de planta de voltaje y corriente para el rectificador serán:

$$G_{pi_{HVDC}} = - \frac{13470}{(0.4 s + 0.01)} \quad (4)$$

$$G_{pv_{HVDC}} = \frac{7620 * \sqrt{2}}{2 s} \quad (5)$$

Se tiene las funciones de control diseñadas:

$$G_{ci_{HVDC}} = - \frac{0.177 s^3 + 583.98 s^2 + 628432.73 s + 221526622.88}{s^3 + 142100 s} \quad (6)$$

$$G_{ci_{HVDC}} = \frac{0.2817 (1 + s/20.2)}{s (1 + s/281.24)} \quad (7)$$

Las respuestas respectivas para la operación del rectificador a plena carga serán:

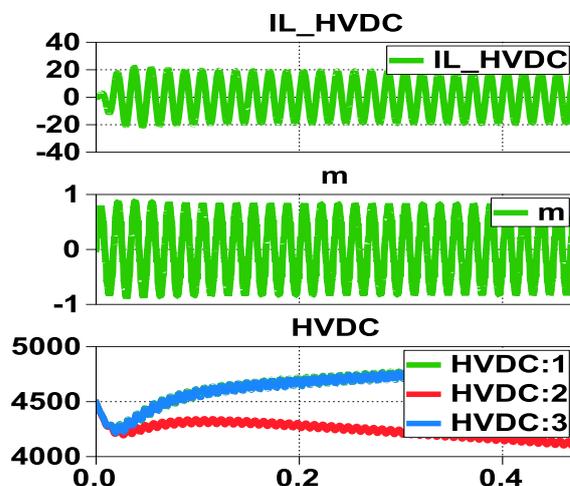


Figura 7. Respuestas del Control del Rectificador

5.2. Dual Active Bridge

En el caso del Bloque de DABs, solo será necesario realizar el control de la función total de energía (voltaje) de la planta debido a su naturaleza y el lazo de corriente no será necesario analizar. Entonces la función de voltaje será:

$$G_{DAB} = -\frac{HVDC' LVDC}{XL' s} \quad (8)$$

La función de control en cambio será:

$$G_{cvDAB} = -\frac{0.9231 (1 + s/138.36)}{s (1 + s/2344.67)} \quad (9)$$

Se debe notar que esta función es aplicable únicamente para los convertidores de los extremos y para el voltaje del lado de alta.

5.3. Filtro LVDC

Se debe notar en cambio que esta función aplicará una función similar a la del control del DAB, pero tenemos con signo opuesto y magnitudes referidas al valor opuesto:

$$G_{sis} = \frac{E_{LVDC}}{\emptyset} = \frac{LVDC' HVDC}{XL' s} \quad (10)$$

La función de control será entonces:

$$G_{cvDAB} = \frac{7.12 (1 + s/673.7)}{s (1 + s/9380.867)} \quad (11)$$

Se debe tener en cuenta que el control del filtro LVDC o de bajo voltaje y el control del DAB trabajan en conjunto, es por esto que sus respuestas se deben observar probándolas en conjunto, el resultado de la simulación se muestra a continuación:

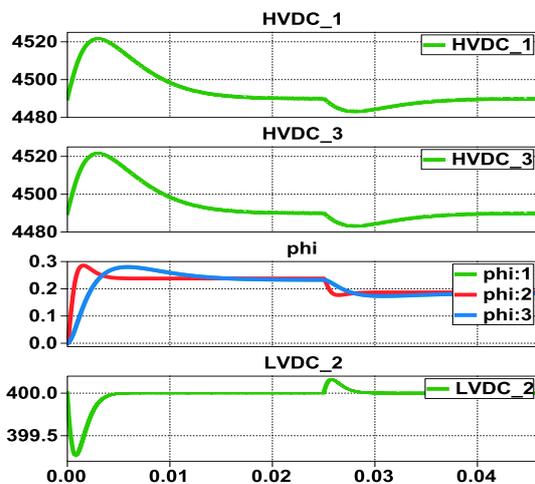


Figura 8. Respuestas del Controlador del DAB y del Filtro de Bajo Voltaje

5.4. Inversor

Tenemos entonces las funciones de planta de voltaje y corriente del bloque inversor:

$$G_{p_i} = \frac{200 (1 + 0.000617 s)}{(1.08 * 10^{-7} s^2 + 0.0001753 s + 0.2474)} \quad (12)$$

$$G_{p_v} = \frac{0.2469}{(0.0006172 s + 1)} \quad (13)$$

El control refleja las siguientes funciones:

$$G_{c_i} = \frac{4.8669 (1 + 0.00043s)(1 + 0.00088s)(1 + 0.018s)}{s (1 + 0.0027s)^2} \quad (14)$$

$$G_{c_v} = \frac{133.66 (1 + 0.00052s)(1 + 0.0039s)(1 + 0.02s)}{s (1 + 0.0027s)^2} \quad (15)$$

Las respuestas del bloque inversor a las funciones de control se muestran:

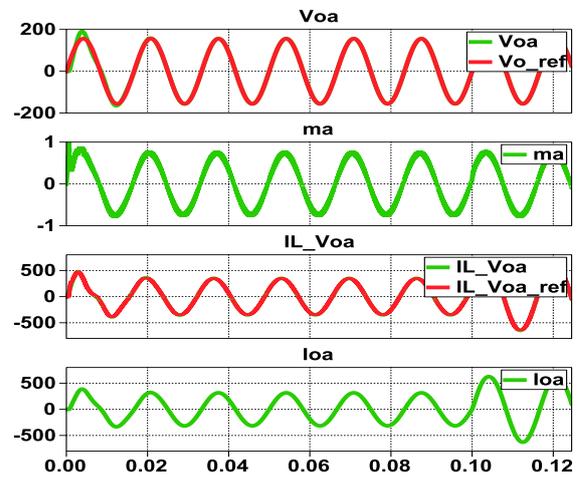


Figura 9. Respuestas del Controlador del Inversor

6. Resultados de las Pruebas de Operación

Después de la implementación e integración de las etapas del SST se realizaron varias pruebas para verificar la correcta operación del SST y los resultados de esas pruebas se muestran a continuación:

6.1. Máxima Carga y Sobrecarga

Se ingresará progresivamente carga hasta alcanzar la condición de máxima carga y se observa el desempeño del SST, después se ingresa una sobrecarga del 20% y se observa nuevamente el comportamiento.

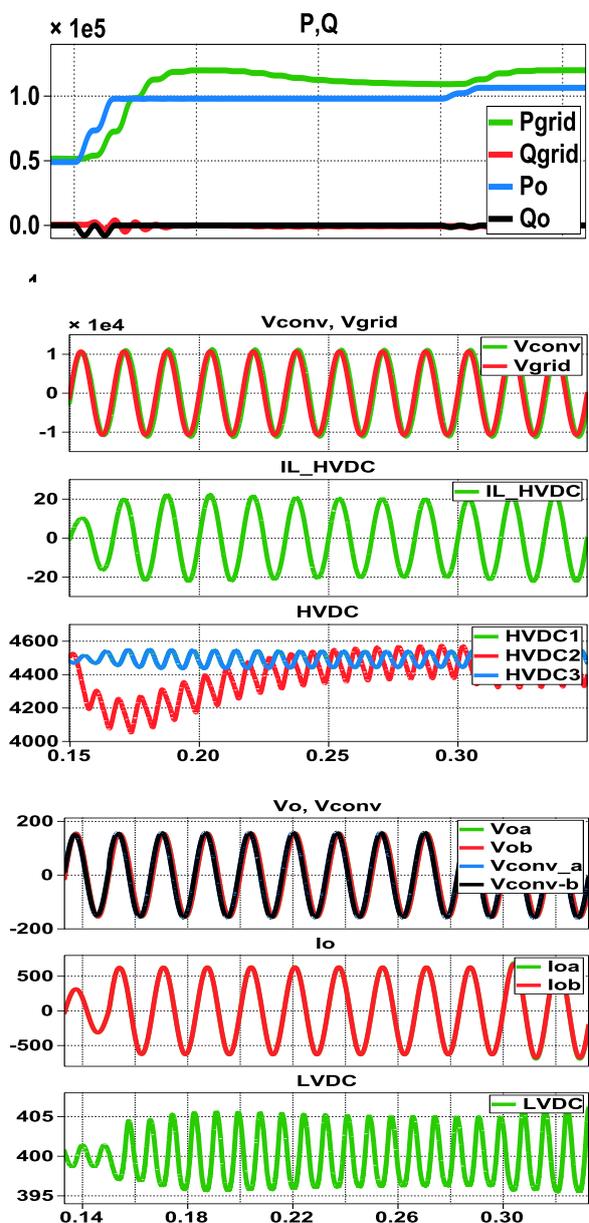


Figura 10. Respuestas de la Prueba de Máxima Carga y Sobre Carga

6.2. Presencia de Armónicos

En esta prueba se agregan funciones armónicas a la carga y se observa las respuestas de voltaje y corriente en la entrada y salida del SST, las cuales no deberían verse afectadas por estos problemas.

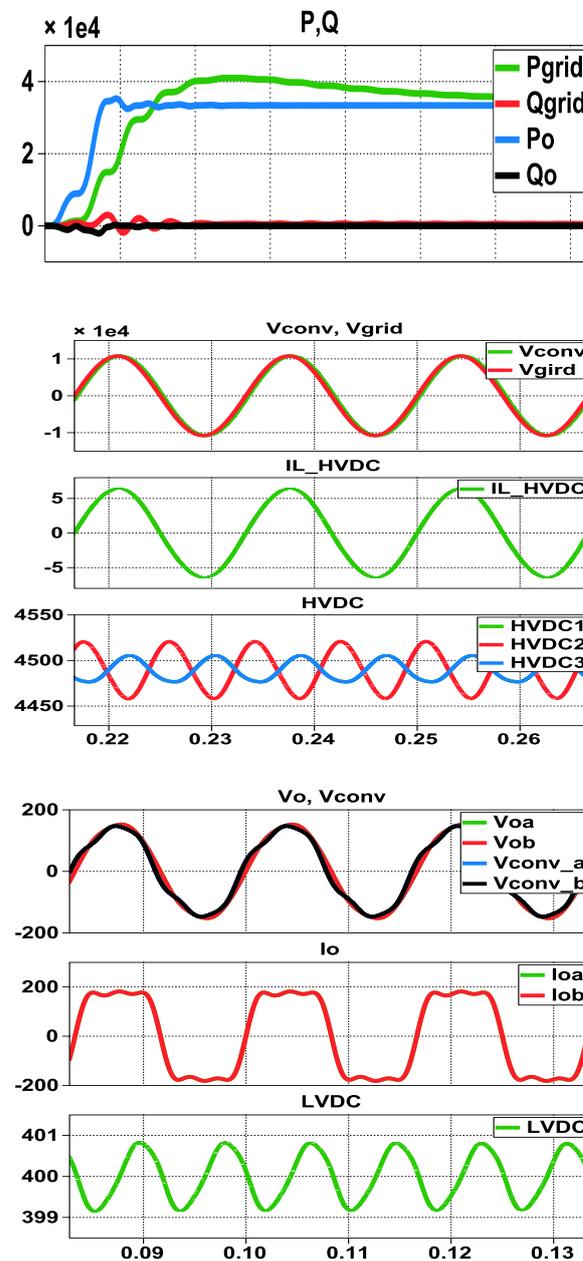


Figura 11. Respuestas de la Prueba de Armónicos

6.3. Bajo Factor de Potencia en la Carga

Se alimenta una carga con un factor de potencia muy pobre lo que provoca un incremento notable de reactivos y se observa el comportamiento del SST ante estas condiciones.

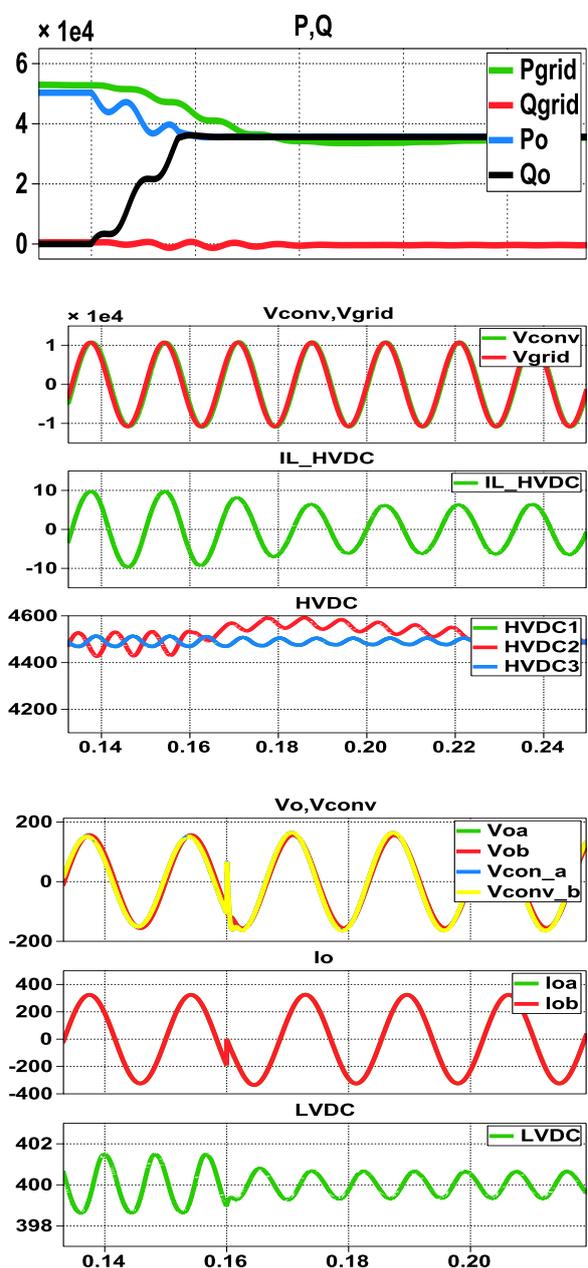


Figura 12. Respuestas de Salida la Prueba de Bajo Factor de Potencia

6.4. Sags y Swells

Se somete el SST a la presencia de sags y swells de voltaje en el lado de la alimentación, y se observa el comportamiento de las salidas de voltaje y corriente del convertidor.

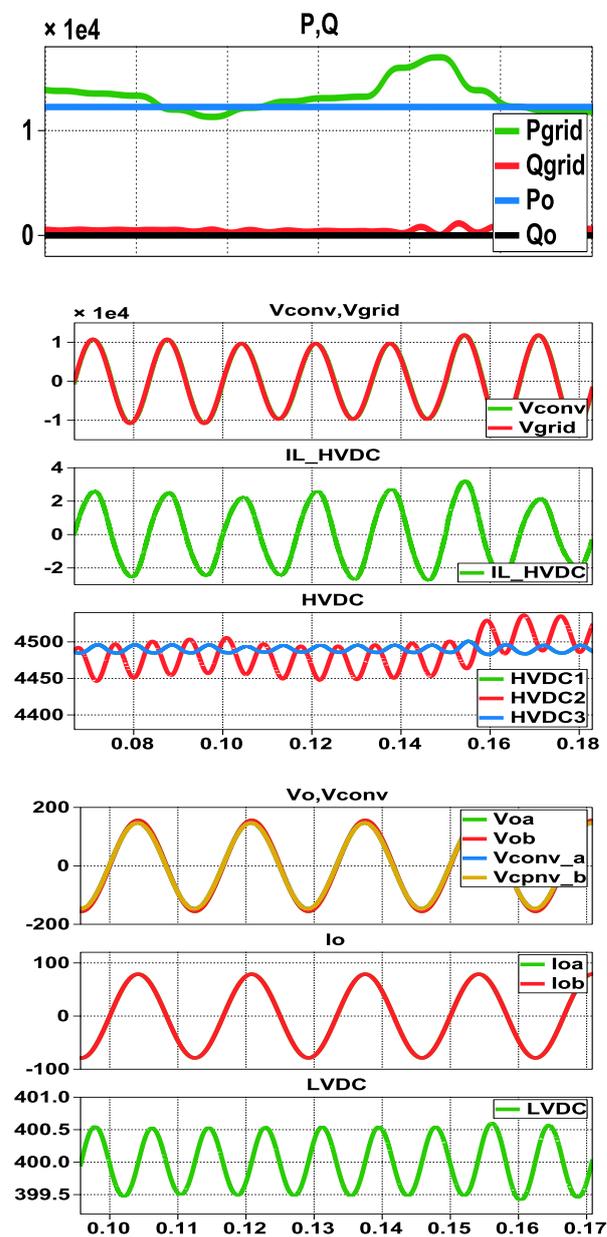


Figura 13. Respuestas de Salida la Prueba

6.5. Prueba de Inyección de Corriente en el Enlace DC

Esta prueba consistirá en inyectar un valor determinado de corriente DC en el terminal o enlace DC de bajo voltaje simulando la conexión de una carga DC inicialmente, y posteriormente simulando el ingreso de una fuente DC alternativa por medio de la inversión de la magnitud de la fuente DC, finalmente se tiene un ingreso de carga AC en la salida del SST.

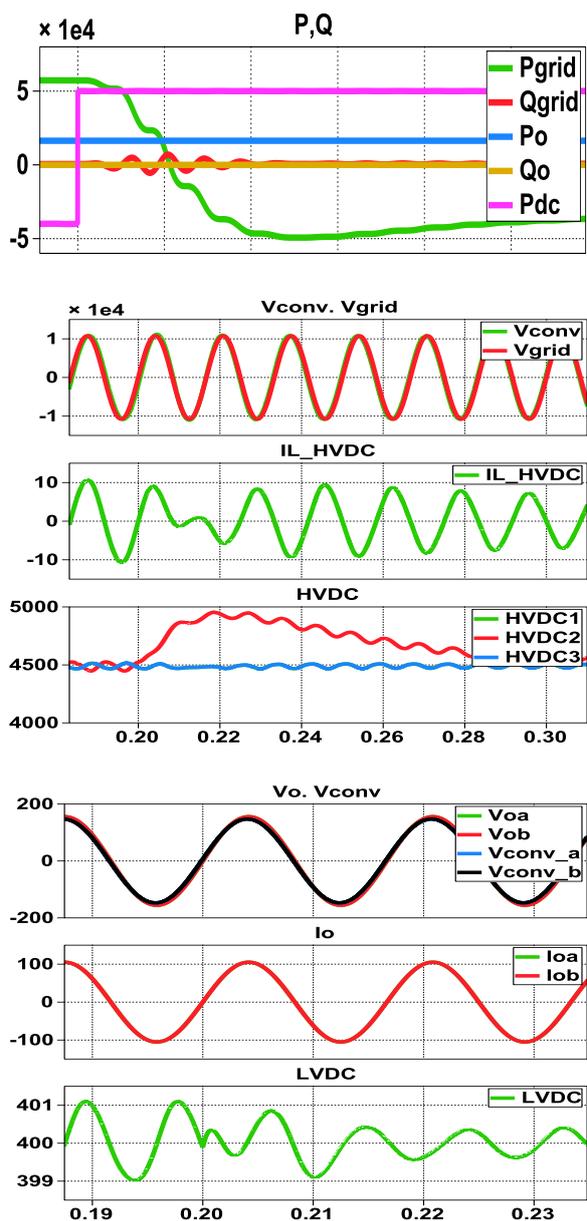


Figura 14. Respuestas la Prueba de Inyección de Corriente DC

7. Conclusiones

Se realizó con éxito el diseño de los componentes de cada convertidor de las diferentes etapas del SST. El diseño del control también se llevó a cabo con éxito. Tanto el correcto diseño del dispositivo como del control se pueden corroborar con las respectivas simulaciones realizadas y cuyos resultados se muestran previamente.

El Transformador de Estado Sólido también entrega un correcto desempeño para condiciones de operación de plena carga y sobre carga, pero además refleja un comportamiento estable para condiciones especiales de operación como presencia de armónicos, carga con pobre factor de potencia, presencia de sags y swells e inyección de corriente en el enlace DC. Se debe notar que como característica particular, el SST no transmite las perturbaciones de una medida eléctrica (voltaje o corriente) a las demás, esto se denota por ejemplo en el hecho que los armónicos en la carga no se reflejan en el voltaje de la misma ni en el voltaje y corriente de la red.

8. Agradecimientos

Agradecemos principalmente a Dios, a nuestras familias que siempre han estado en todo momento apoyándonos, particularmente a nuestros padres por el respaldo y amor brindado. A los profesores que nos han formado como ingenieros a nuestros amigos y compañeros que nos acompañaron en este proceso.

9. Referencias

- [1] Falcones, S., Mao, X., y Ayyanar, R, Simulation of the FREEDM Green Hub with Solid State Transformers and Distributed Control, fecha de consulta Diciembre 2012.
- [2] <http://www.suelosolar.es/newsolares/newsol.asp?id=7092>, fecha de consulta: 28/02/2013.
- [3] Walter, J., Ceglia, G. , Guzmán, V. , Giménez, M. , Comparación de Tres Topologías de Transformadores de Alta Frecuencia y Alta Potencia, scielo.org.ve , 2009.
- [4] Zong, X., A Single Phase Grid Connected DC/AC Inverter with Reactive Power Control for Residential PV Application, 2011.
- [5] Mohan, N. , Undeland, Tore M. , Robbins, W. , Power Electronics: Converters, Applications and Design, John Wiley & Sons Inc., Segunda Edición, 1995.
- [6] Grainger, J., Stevenson, W., Análisis de Sistemas de Potencia, fecha de consulta: Diciembre 2012.
- [7] Téllez, E., Calidad de la Energía.
- [8] Llamas, A., De Los Reyes, J., Instrumentación para determinar la calidad del servicio eléctrico.

- [9] Unidad Politécnica Salesiana, Armónicos en las Redes Eléctricas.
- [10] Valdovinos, F., y Otárola, R., Almacenamiento de energía: Desarrollos tecnológicos y Costos, 2008.
- [11] Ramanarayanan, V. , Course Material on Switched Mode Power Conversion, 2007
- [12] Wikipedia, Pulse-Width Modulation, Wikipedia.org, fecha de consulta: Diciembre 2012.
- [13] Cheng, Y., Qian, C., Crow, M., Pekarek, S., y Atcitty, S. A Comparison of Diode-Clamped and Cascaded Multilevel Converters for a STATCOM With Energy Storage, Octubre 2006.
- [14] Ayyanar, R., K-Factor approach, EEE 572 Arizona State University, 2009.