

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

Jefferson Campoverde Bonete ⁽¹⁾, Oscar Mazacón Baño ⁽²⁾, PhD. Sífifo Falcones ⁽³⁾
Facultad de Ingeniería Eléctrica y Computación
Escuela Superior Politécnica del Litoral (ESPOL)
Campus Gustavo Galindo, Km 30.5 vía Perimetral
Apartado 09-01-5863. Guayaquil-Ecuador
jejacamp@espol.edu.ec ⁽¹⁾, omazacon@espol.edu.ec ⁽²⁾, sixifo@fiec.espol.edu.ec ⁽³⁾.

Resumen

El presente proyecto consiste en diseñar el controlador de un Transformador de Estado Sólido (SST), con el objetivo de mostrar un modelo base de transformador para ser utilizado en una Red Eléctrica inteligente (Smart Grid). Lo que se pretende con este proyecto es mejorar la calidad de energía de la red eléctrica, además se presenta una manera de incluir energías renovables al sistema. Se menciona algunos problemas que afectan al Sistema eléctrico actual y como el SST puede corregir estos problemas, se da a conocer las ventajas que tiene una Smart Grid, se muestra la topología del SST utilizada, se dimensiona los componentes a utilizarse en cada etapa, se modela la planta de cada convertidor, se presenta el diseño del controlador y la estrategia a utilizar para controlar cada una de las etapas del SST. Para efecto de diseñar el controlador del SST, se modela la planta por cada etapa. Para la primera y la última etapa se diseña un control en cascada para controlar voltaje y corriente mientras que para el DAB se controla el voltaje de salida, por último se muestra las simulaciones del SST al ser afectado por diferentes perturbaciones. Debido al alto costo de los componentes del SST no se realiza ninguna implementación física; además, el presente proyecto ha sido limitado a la simulación del SST mediante switches ideales para que el diseño sea más sencillo y fácil de interpretar. Las simulaciones del SST se realizan con las herramientas PLECS, SIMULINK y MATLAB.

Palabras Claves: Controlador, Transformador de Estado Sólido, Red Eléctrica Inteligente, Calidad de Energía, incluir energías renovables.

Abstract

This project is to design a controller Solid State Transformer (SST), with the aim of showing a transformer base model to be used in a smart Grid. The purpose of this project is to improve the power quality of the power grid, also provides a way to include renewable energy to the system. It mentions some problems affecting the current electrical system, and as the SST can correct these problems, shows the advantages disclosed having a Smart Grid, shows the topology used of SST, the components are sized for each stage, plant is modeled for each converter, we present the design of the controller and the strategy to use to control each stage of the SST. For the purpose of designing the controller of the SST, the plant is modeled by each stage. For the first and the last stage is designed cascade control to control voltage and current, while for the DAB controlling the output voltage, finally shown simulations of the SST to be affected by various disturbances. Due to the high cost of SST components hardware has not been implemented; furthermore, this project has been limited to the simulation of SST using ideal switches to keep the design simple and easy to interpret. All simulations of the SST are done with the tools PLECS, SIMULINK and MATLAB.

Keywords: Controller, Solid State Transformer, Smart Grid, Power Quality, including renewable energy.

1. Introducción

Debido al crecimiento permanente de la demanda de consumidores de energía eléctrica, surge la necesidad del desarrollo de las llamadas Redes Inteligentes, con las cuales se pretende mejorar la calidad de energía de un sistema eléctrico, además permiten la inclusión de energías renovables. Uno de los principales elementos de una Red Inteligente es el transformador de estado sólido (SST), debido que a través de este elemento se puede realizar un control del uso de la energía, además permite un flujo de potencia bidireccional en un sistema.

El presente proyecto consiste en diseñar el controlador de un Transformador de Estado Sólido (SST), con el objetivo de mostrar un modelo base de transformador para ser utilizado en una Red Eléctrica inteligente (Smart Grid). Lo que se pretende con este proyecto es mejorar la calidad de energía de la red eléctrica, además se presenta una manera de incluir energías renovables al sistema.

2. Planteamiento del problema

La mayoría de inconvenientes de la red eléctrica actual se presentan en la etapa de distribución, por ejemplo, la inclusión de energías renovables, problemas de calidad de energía, y cargas no monitoreadas.

Para afrontar los problemas de calidad de energía se requiere de una red con características diferentes a la de la red eléctrica convencional, dicha red se la conoce como red eléctrica inteligente o Smart Grid, que pueda incluir sistemas de telecomunicaciones, que utilice sensores avanzados, que tenga la capacidad de incluir energías renovables, y que permita almacenamiento de energía. La Smart Grid tendrá la capacidad de llevar un flujo bidireccional de energía y que mediante la inclusión de energías alternativas se pueda inyectar potencia a la red.

Al ver la gran importancia del SST dentro de una red eléctrica inteligente, y con el objetivo de solucionar los problemas mencionados anteriormente, se propone el diseño de un transformador de estado sólido. En la Figura 1 se muestra la conexión del Transformador de Estado Sólido a la red.

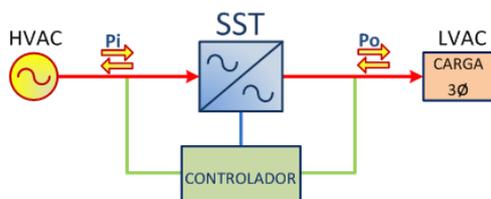


Figura 1. Conexión del SST a la red eléctrica.

3. Fundamento Teórico

En esta sección se citan los conceptos básicos necesarios para comprensión del sistema a modelar, además se presentan las ecuaciones fundamentales de cada etapa del SST.

3.1 Red Eléctrica Inteligente

Una red eléctrica inteligente es capaz de integrar las acciones de todos los agentes, productores o consumidores, para distribuir energía de forma eficiente, sostenible, rentable y segura [1]. La Figura 2 presenta una red eléctrica inteligente.

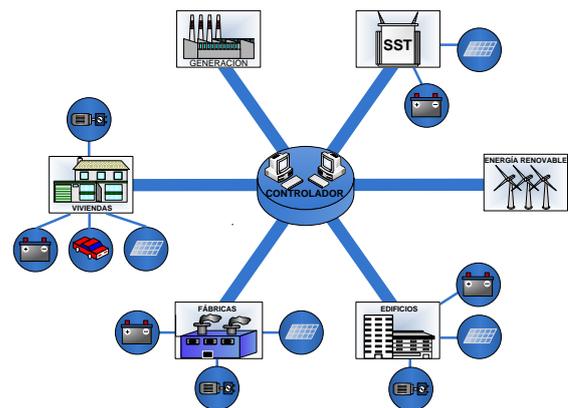


Figura 2. Red Eléctrica Inteligente.

La red eléctrica inteligente (smart Grid en inglés) consta de tres elementos fundamentales para su funcionamiento [2]:

- mini redes.
- medidores inteligentes y software.
- sensores, actuadores y procesadores.

3.2 Transformador de estado sólido (SST)

Los transformadores de estado sólido son dispositivos basados en elementos como transistores, diodos y otros elementos semiconductores que, a diferencia de los usados en los chips de ordenadores, están diseñados para gestionar altos niveles de energía y conmutar muy rápidamente [4].

Pueden ofrecer corriente continua como también corriente alterna, y recibir cualquiera de las dos corrientes, ya sea desde la central generadora, o desde una fuente de energía renovable, adecuando los valores de tensión, frecuencia, y de corriente necesarias para la red [3].

3.3 Topologías del SST

Para un transformador de estado sólido existen diferentes topologías, la Figura 3 muestra 4 topologías para los SST.

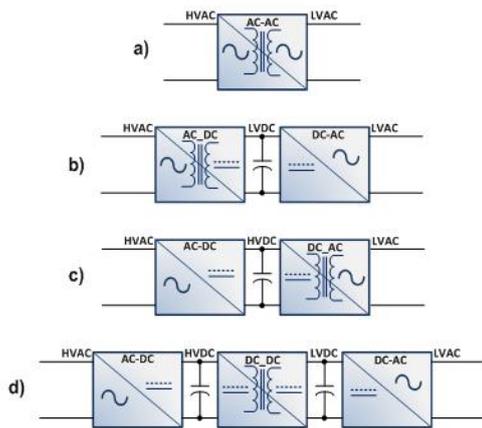


Figura 3. Topologías del SST: a) una etapa, b) dos etapas con LVDC link, c) dos etapas con HVDC link, d) tres etapas [3].

En la Figura 4 se observa la topología utilizada en el presente proyecto, la cual es un transformador de estado sólido de tres etapas, con entrada monofásica y salida trifásica basado en un convertidor DC-DC de doble puente activo y un convertidor AC-DC multinivel de puentes en cascada.

3.4 Etapas del SST

Etapa AC-DC: Está compuesta por un puente H con IGBT's, donde su función es convertir el voltaje alterno tomado desde la red a un voltaje continuo o viceversa. El convertidor AC-DC se muestra en la Figura 5.

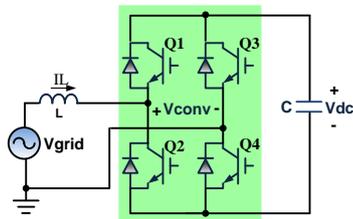


Figura 5. Convertidor AC-DC (Rectificador).

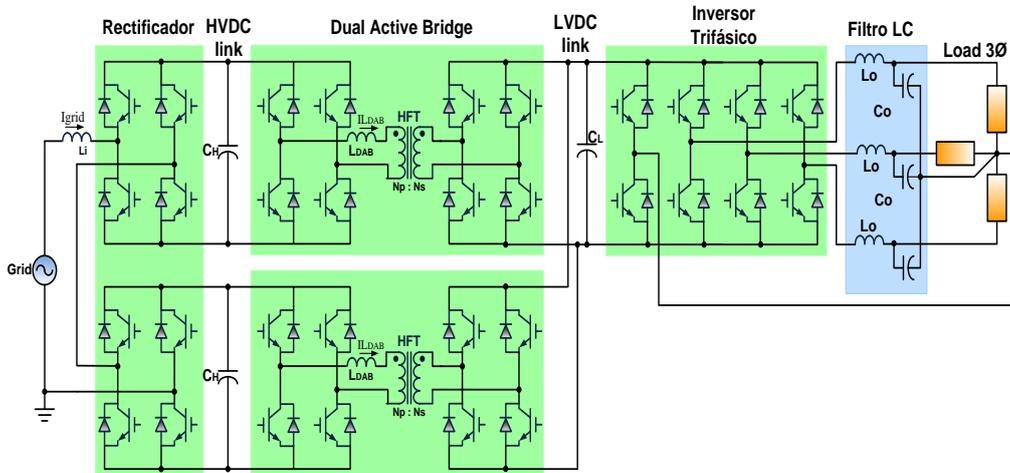


Figura 4. Topología de un SST de tres etapas con 2 módulos en cascada.

Etapa DC-DC: Consta de un convertidor DC-AC, un transformador de alta frecuencia, y un convertidor AC-DC, dependiendo de la relación de vueltas del transformador aumenta o reduce la tensión de salida. La Figura 6 muestra el puente activo dual.

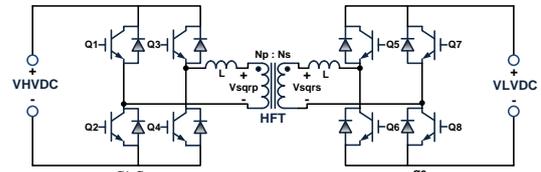


Figura 6. Puente activo dual.

Etapa DC-AC: Es la etapa se conecta a la carga que consume corriente alterna. La función de un inversor es cambiar un voltaje de entrada de corriente continua a un voltaje simétrico de salida de corriente alterna. La Figura 7 muestra el esquema de un inversor trifásico.

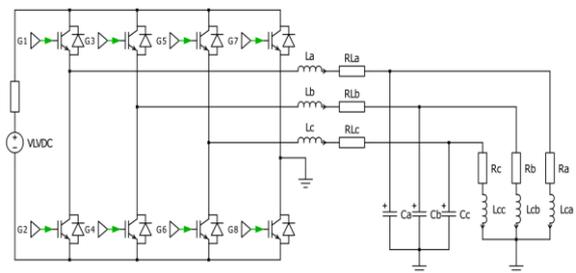


Figura 7. Convertidor DC-AC trifásico

4. Dimensionamiento de los parámetros del SST.

El SST que se modela es de 100 KVA, la entrada de voltaje monofásica es de 7620 voltios RMS, y la salida es un voltaje trifásico línea a línea de 440 voltios. Cada módulo se encuentra formado por switches ideales para la conmutación, los cuales son controlados por señal de ancho de pulso y unidos por enlace de voltaje DC.

Dimensionamiento del convertidor AC-DC: Se tiene una entrada monofásica de 7620 voltios RMS y se fija una modulación de magnitud ma de 0.85 entonces se procede a calcular el voltaje del enlace DC de alta tensión (V_{HVDC}) y la corriente nominal.

$$V_{HVDC} = \frac{V_{gridpk}}{ma} \quad (1)$$

$$V_{HVDC} = \frac{7620 * \sqrt{2}}{0.85} = 12678 V. \quad (2)$$

$$I_{nom} = \frac{P_{nom}}{V_{nom}} = \frac{100.000}{7620} = 13.12 A \quad (2)$$

Para el cálculo del L y C se utiliza sus ecuaciones características.

$$V_L = L \frac{dI_L}{dt} \rightarrow \Delta I_L = \frac{1}{L} \int_0^{T_{on}} V_{Lmax} dt. \quad (3)$$

$$I_C = C \frac{dV_C}{dt} \rightarrow \Delta V_C = \frac{1}{C_H} \int_0^{T_{on}} I_C dt. \quad (4)$$

$$L_i = 203 \text{ mh.} \quad C_H = 117 \text{ }\mu\text{F.}$$

La Figura 8 muestra la corriente del inductor, además muestra el desfase entre el voltaje de la red y del convertidor.

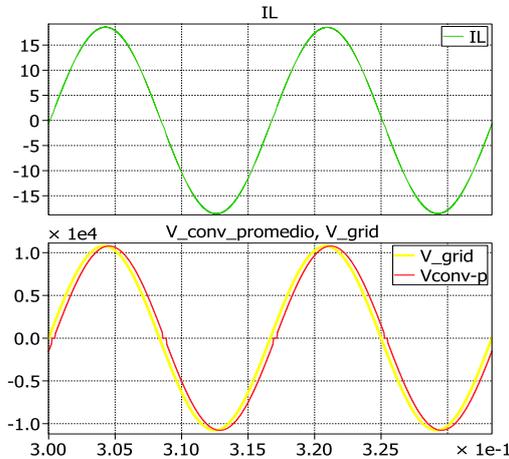


Figura 8. Corriente I_L , voltaje de la red y del convertidor.

El voltaje de rizado del capacitor no debe superar el 3% del voltaje del enlace de alta en DC que corresponde a 191 voltios de pico a pico, en la Figura 9 se muestra el voltaje de rizado del capacitor C_H que resulta ser 190 voltios.

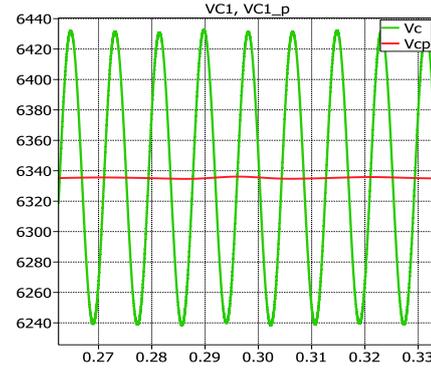


Figura 9. Voltaje de rizado del capacitor C_H .

Dimensionamiento del DAB: Debido a que se requiere una salida trifásica con un voltaje de línea a línea de 440 voltios RMS a la salida del SST y una modulación de amplitud ma de 0.85, se procede a calcular el enlace DC de baja tensión (V_{LVDC}):

$$V_{LVDC} = \frac{V_{ab}}{ma} * \frac{2}{\sqrt{3}} = \frac{440 * \sqrt{2} * 2}{0.85 * \sqrt{3}} = 846 V \quad (5)$$

$$\frac{n_1}{n_2} = \frac{6340}{846} = 7.4 \quad (6)$$

Para calcular el inductor L_{DAB} se utiliza la ecuación de la potencia del DAB.

$$P = \frac{V_{HDAB} * V_{LDAB}'}{X_{DAB}} * \phi \left(1 - \frac{l\phi l}{\pi}\right). \quad (7)$$

Se calcula la reactancia X_{DAB} y se obtiene L_{DAB} .

$$L_{DAB} = 3.15 \text{ mh.}$$

Una vez que se ha calculado el inductor del DAB se procede a calcular el valor del capacitor C_H del enlace DC de alta y el capacitor C_L del enlace DC de baja, para lo cual se realiza un procedimiento similar que en la etapa del convertidor AC-DC.

$$C_L = \frac{area_{max}}{\Delta V_C} = \frac{3300\mu}{25.38} = 130\mu\text{f.}$$

Dimensionamiento del convertidor DC-AC: La carga que alimentara el SST es de 100 KVA, entonces la potencia del convertidor DC-AC es la misma potencia de la carga. El convertidor que se utiliza se presenta en la Figura 7, el cual consta de cuatro ramales, tres ramales de las fases y un ramal del neutro; se encuentra formado por switches ideales para la conmutación y además estos son controlados por señal de ancho de pulso.

$$P_o = V_{abrms} * I_{rms} * \sqrt{3} \rightarrow I_{rms} = \frac{P_o}{V_{abrms} * \sqrt{3}} = 131.37 A. \quad (8)$$

$$\Delta I_L = \frac{1}{L} \int_0^{\tau_{on}} V_{Lmax} dt.$$

$$L_a = L_b = L_c = \frac{area_{max}}{\Delta I_L} = \frac{0.0873128}{3.93} = 2.22 \text{ mh.}$$

En la tabla 1 se muestra en resumen todos los valores calculados para el SST.

DISPOSITIVO	DESCRIPCIÓN	VALOR
SST	POTENCIA	100 KVA
	VOLTAJE L-N ENTRADA	7620 Vrms.
	VOLTAJE L-L DE SALIDA	440 Vrms.
Li	Inductancia de entrada	203 mh.
Lo	Inductancia de salida	2,22 mh
LDAB	Inductancia del DAB	3,15 mh.
CH	Capacitor Alta Tensión	117 µF
CL	Capacitor Baja Tensión	260 µF
C	Banco de capacitores	2,34 µF

Tabla1. Valores del SST seleccionado.

5. Estrategia de control

Para el diseño del controlador se debe tener en cuenta que se necesita controlar tanto la magnitud el voltaje de los enlaces de tensión DC, como la dirección y magnitud de la corriente de cada etapa del SST, se diseñará un lazo de control para la corriente y un lazo de control para el voltaje, teniendo en cuenta que el lazo de corriente será mucho más rápido que el lazo de voltaje. La Figura 10 presenta el esquema general de control para el SST de 3 etapas.

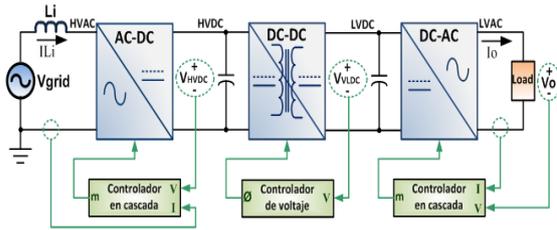


Figura 10. Esquema general de control del SST.

Modelamiento Etapa AC-DC

Planta de corriente:

$$V_{conv} = Li \frac{di_{Li}}{dt} - R_{Li} \cdot i_{Li} - V_{grid} \quad ; \quad V_{conv} = m * \frac{V_{HVDC}}{2} \quad (9)$$

$$G_{pi}(s) = -\frac{6338}{0.203 s + 0.01}$$

Planta de voltaje:

$$e = \int (\bar{P} - \bar{P}_{dc}) dt \quad ; \quad \bar{P}_{dc} \approx \bar{P}_{ac} \quad (10)$$

$$P_{dc} = \frac{1}{2} I_{Lpk} * V_{gridpk} \quad (11)$$

$$G_{pv}(s) = \frac{E(s)}{I_{Lpk}(s)} = -\frac{V_{grid}}{2S} \quad (12)$$

Para calcular el controlador se usa el criterio del factor K y el resultado es el siguiente:

$$G_{ci}(s) = \frac{-0.4025 s - 1355}{2.132e - 5 s^2 + s}$$

$$G_{cv}(s) = \frac{0.02799 s + 1.131}{0.001777 s^2 + s}$$

El ancho de banda del lazo de corriente B_{wi} una década menor que la frecuencia de conmutación f_{res} , por otro lado el ancho de banda del voltaje B_{Wv} es de 24 Hz, debido a que debe estar separado por lo menos media década de la frecuencia de la corriente DC que es 120 Hz.

La Figura 11 y 12 presenta el diagrama de bode de lazo abierto de corriente y voltaje respectivamente utilizando los controladores calculados.

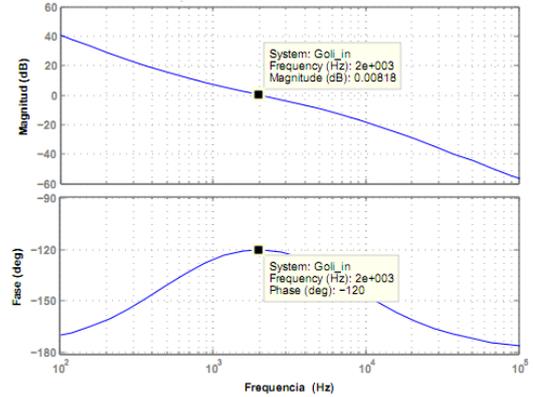


Figura 11. Diagrama de bode de lazo abierto de corriente.

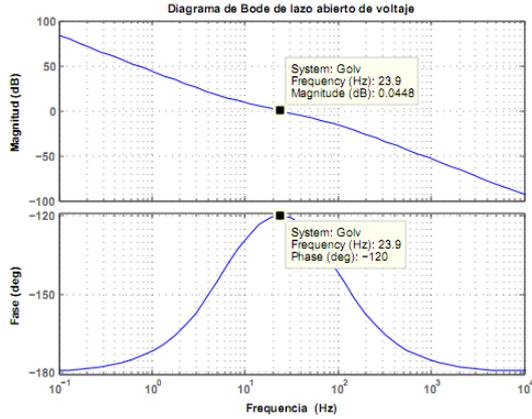


Figura 12. Diagrama de bode de lazo abierto de Voltaje.

Modelamiento Etapa DC-DC

Usando la ecuación de la potencia del DAB se obtiene:

$$P = \frac{V_{HVDC} * V_{LVDC}'}{X_{DAB}} * \phi \left(1 - \frac{|\phi|}{\pi}\right), \quad (13)$$

$$G_{DAB} = \frac{\Delta P}{\Delta \phi} = \frac{V_{HVDC} * V_{LVDC}'}{X_{DAB}} * \left(1 - \frac{2\phi}{\pi}\right).$$

$$G_p(s) = \frac{E_{LVDC}(s)}{\phi(s)}$$

$$G_p(s) = \frac{P_{DAB}}{\phi} \times \frac{E_{LVDC}}{P_{DAB}} = G(s)_{DAB} \times G(s)_2 \quad (14)$$

$$G_p(s) = \frac{1}{S} \times \frac{V_{HVDC}^2}{2\pi f_s L_{DAB}},$$

Para calcular el controlador se usa el criterio del factor K. El controlador obtenido con un margen de fase P_{Mv} de 60 ° y un ancho de banda B_{Wv} de 500 Hz es un controlador tipo II:

$$G_{cv}(s) = \frac{0.03096 s + 26.06}{8.529e - 5 s^2 + s}$$

La Figura 13 muestra el diagrama de bode de lazo abierto del DAB utilizando el controlador calculado.

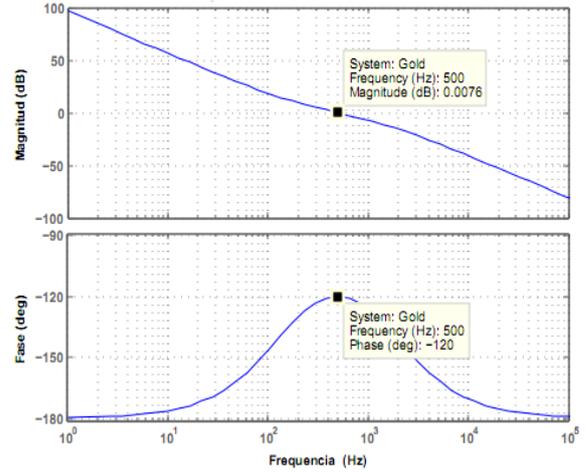


Figura 13. Diagrama de bode de lazo abierto del DAB.

Modelamiento Etapa DC-AC

Aplicando la ley de Kirchhoff a la maya de salida se obtiene:

$$V_{conv} - V_o = L_o \frac{di_{L_o}}{dt} + R_{L_o} \cdot i_{L_o}, \quad V_{conv} = m * \frac{V_{LVDC}}{2}. \quad (15)$$

$$G_{pi}(s) = \frac{I_{L_o}(s)}{m(s)} = \frac{0.5 * V_{LVDC}}{SL_o + R_{L_o}} \quad (16)$$

Debido a que la corriente es una variable controlada y que a la salida se encuentra conectada la carga y el banco de capacitores en paralelo se asume que:

$$G_{pv}(s) = \frac{V_o(s)}{I_i(s)} = \frac{1}{SC} || Z_o, \quad \rightarrow \quad G_{pv}(s) = \frac{Z_o}{Z_o CS + 1}. \quad (17)$$

Para el controlador de corriente, con un margen de fase P_{Mi} de 60 ° y un ancho de banda B_{Wi} de 4 KHz, se obtiene un controlador tipo II:

$$G_{ci}(s) = \frac{55.79 s + 3.759e005}{1.067e - 005 s^2 + s}$$

La Figura 14 muestra el diagrama de bode de lazo abierto de corriente utilizando el controlador calculado.

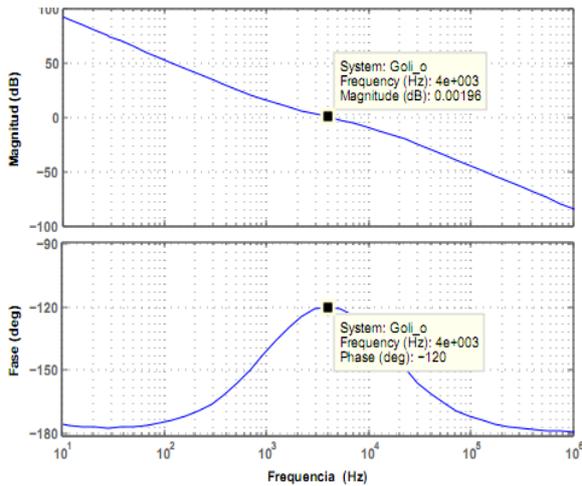


Figura 14. Diagrama de bode de lazo abierto de corriente.

Para el controlador de voltaje, con un margen de fase P_{Mv} de 60° y un ancho de banda B_{Wv} de 100 Hz, es necesario agregarle un polo resonante a la frecuencia de 60 Hz. Por ello la ganancia del controlador es:

$$G_{cv}(s) = \frac{1.019 s^2 + 761.1 s + 1.421e005}{s^2 + 142100}$$

La Figura 15 muestra el diagrama de bode de lazo abierto de voltaje utilizando el controlador calculado.

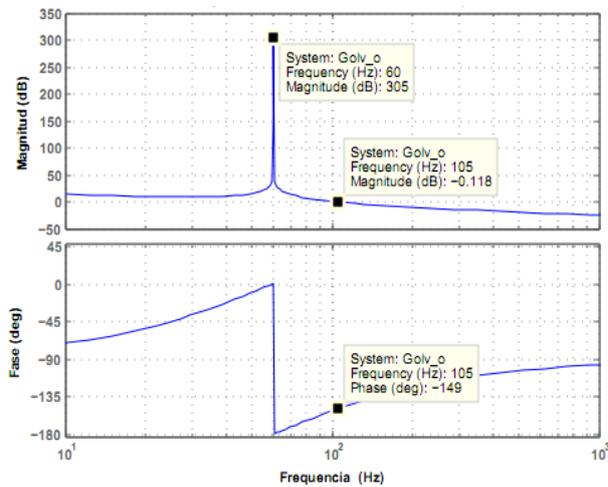


Figura 15. Diagrama de bode de lazo abierto de voltaje.

6. Simulación del Sistema Unificado

En esta sección se presenta el circuito del SST implementado en Simulink y PLECS en donde se va a llevar a cabo pruebas con diferentes perturbaciones, para poner a prueba los controladores del SST.

6.1 Simulación de un sag del 20% en el voltaje de la red.

La Figura 16 muestra las formas de onda de los diferentes voltajes y corrientes del SST al ser afectados por una Sag del 20% del voltaje de la red.

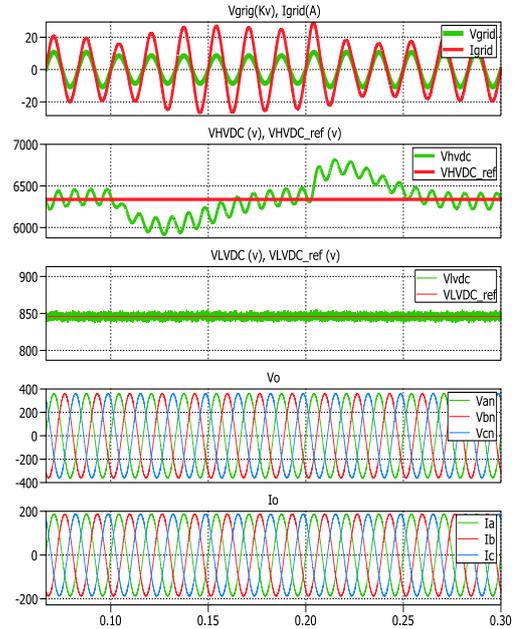


Figura 16. Sag del 20% del voltaje de la red.

El primer cuadro de la figura muestra que el Sag de voltaje de la red V_{grid} se realiza en el tiempo $0.1s < t < 0.2s$, lo que provoca que el voltaje V_{HVDC} decaiga, pero luego se estabiliza en su nivel de referencia. El voltaje V_{LVDC} no es afectado por la perturbación, al igual que la corriente I_o y el voltaje de salida V_o .

En la Figura 17 se muestra la gráfica de las potencias de entrada y salida del SST con su respectivo factor de potencia. Se puede notar que el momento en que se produce el Sag de voltaje la potencia de entrada disminuye, más no es así con la potencia de salida que permanece constante, al igual que el Factor de potencia de entrada y salida. Con esto se demuestra que las perturbaciones en la entrada no afectan a la salida y se mejora la calidad de energía.

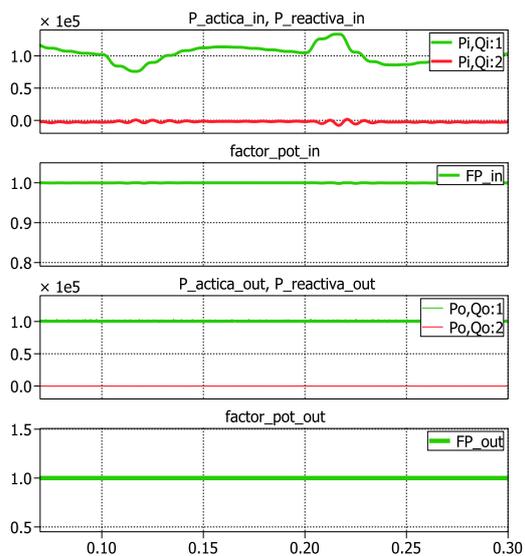


Figura 17. Potencia y Factor de potencia del SST con un Sag del 20%.

En la Figura 10 se observa como la potencia de entrada disminuye al momento de ingresar la perturbación y luego de un tiempo la potencia sobrepasa la potencia nominal del 100 Kva, esto es debido a que el capacitor comienza a recuperar la energía perdida al momento de ingresa la perturbación. Cuando el voltaje regresa a su valor normal, la potencia de entrada aumenta y luego disminuye por debajo de la potencia nominal, este fenómeno ocurre debido a que el capacitor se sobrecarga de energía y luego entrega dicha energía entregando potencia a la red.

6.2 Simulación de un swell del 20% en el voltaje de la red.

En este caso la Figura 18 muestra que el Swell del 20% en el voltaje de la red V_{grid} se produce en el tiempo $0.1s < t < 0.2s$, lo que provoca que el voltaje V_{HVDC} aumente, y luego se estabilice en su nivel de referencia. El voltaje V_{LVDC} no es afectado por la perturbación, al igual que la corriente I_o y el voltaje de salida V_o .

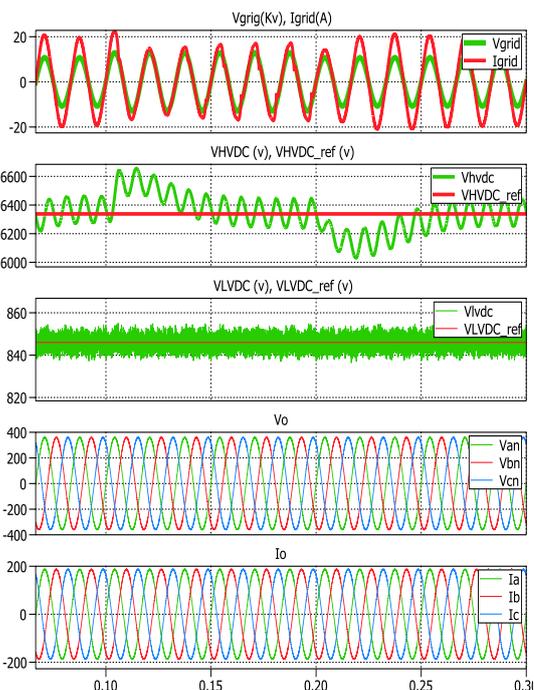


Figura 18. Swell del 20% del voltaje de la red.

En la Figura 19 se muestra que el momento en que se produce el Swell de voltaje la potencia de entrada aumenta, más no es así con la potencia de salida que permanece constante. El Factor de potencia de entrada y salida mantiene un valor unitario. Con esto se demuestra que las perturbaciones en la entrada no afectan a la salida y se mejora la calidad de energía.

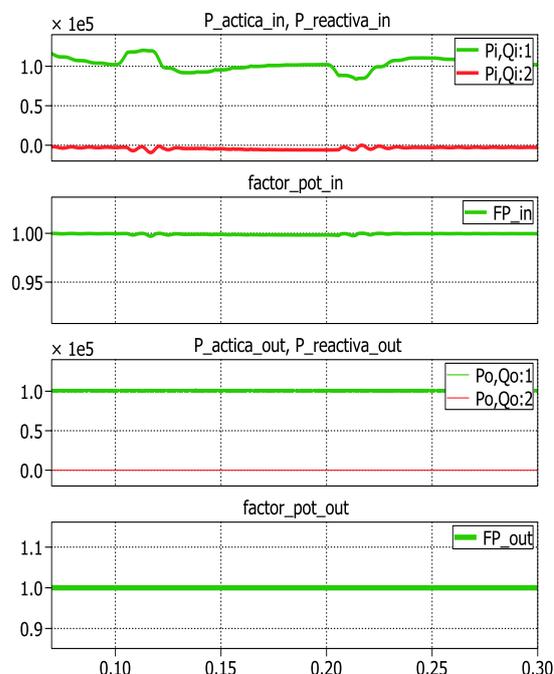


Figura 19. Potencia y Factor de potencia del SST con un Swell del 20%.

En la Figura 19 se observa como la potencia de entrada aumenta al momento de ingresar la

perturbación y luego de un tiempo la potencia disminuye por debajo de la potencia nominal del 100 Kva, esto es debido a que el capacitor comienza a entregar la energía que ganó al momento de ingresa la perturbación.

6.3 Simulación de conexión de una carga dc e inyección de potencia dc en VLVDC

La Figura 20 muestra la respuesta del SST frente a la conexión de una carga DC en el enlace DC de baja tensión, y posteriormente a la inyección de una corriente DC en el mismo enlace.

La conexión de una carga DC de 50 amperios en el V_LVDC se la realiza en el tiempo $t > 0.1s$, se puede notar que la corriente de entrada I_{grid} aumenta, los voltajes de los enlaces DC disminuyen y luego se estabilizan, pero el voltaje y la corriente de salida permanecen constantes. En el tiempo $t > 0.2s$ se inyecta una corriente DC de 100 amperios al V_LVDC, y como se esperaba la corriente I_{grid} disminuye; los voltajes de los enlaces DC aumentan y luego se estabilizan, y el voltaje y la corriente de salida permanecen constantes.

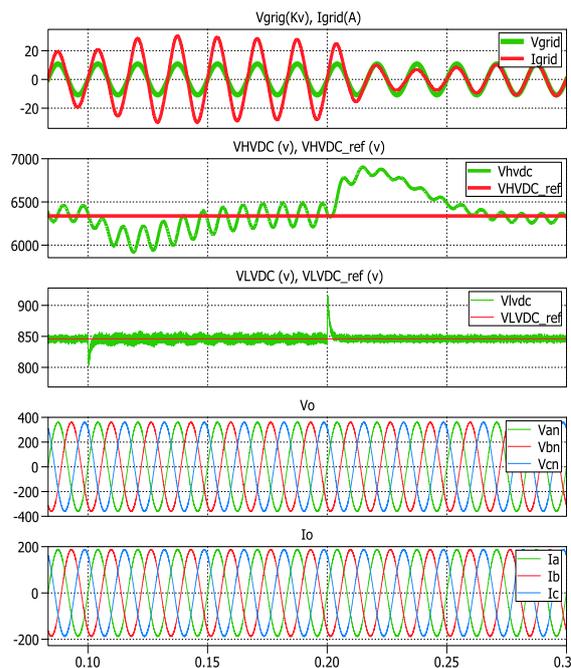


Figura 20. Conexión e inyección de potencia DC en VLVDC.

En la Figura 21 se observa que al momento de conectar la carga DC, la potencia de entrada aumenta debido al aumento de la demanda de corriente. Cuando se inyecta corriente DC la potencia de entrada disminuye debido a la disminución de la corriente de entrada. En ambos casos la potencia de salida permanece constante al igual que el Factor de potencia de entrada y salida que se mantienen en

valor unitario. Con esto se demuestra la capacidad de incorporación de energías renovables al sistema.

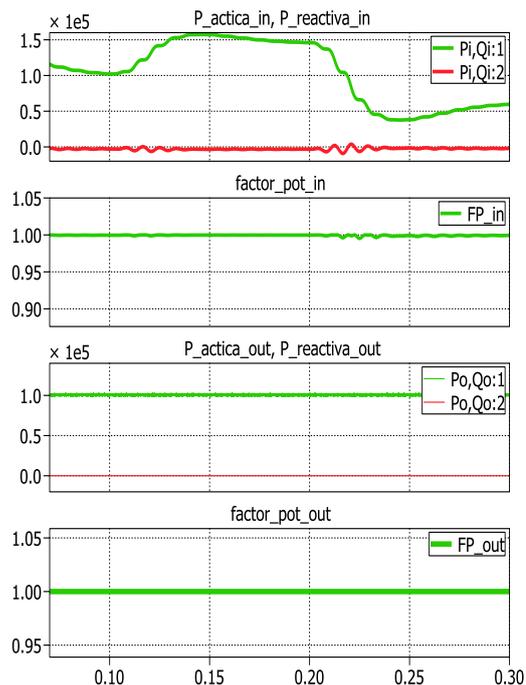


Figura 21. Potencia y Factor de potencia del SST con conexión e inyección de potencia DC.

6.4 Simulación de conexión de una carga trifásica resistiva-inductiva

Se conecta una carga trifásica R-L ($R=1ohm$, $L=7mh$) adicional en el tiempo $t > 0.1s$, la corriente I_o aumenta, al igual que I_{grid} , pero los voltajes no ven afectados como se observa en la Figura 22.

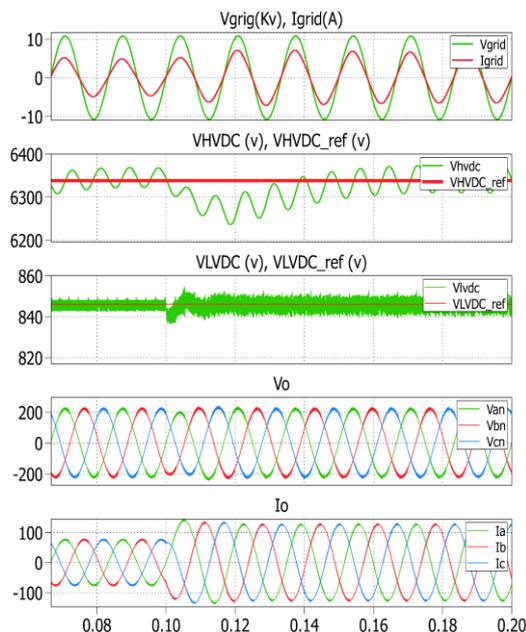


Figura 22. Conexión de una carga trifásica resistiva-inductiva.

Al momento de conectar la carga R-L la potencia activa y reactiva de salida aumentan, pero se puede apreciar que en la entrada solo aumenta la potencia activa y por ello el factor de potencia de la entrada se mantiene unitario. El factor de potencia de salida disminuye debido a que se ingresan reactivos a la carga. La Figura 23 muestra cómo se mejora la calidad de energía al mantener un factor de potencia unitario a la entrada cuando en la salida su valor no es unitario.

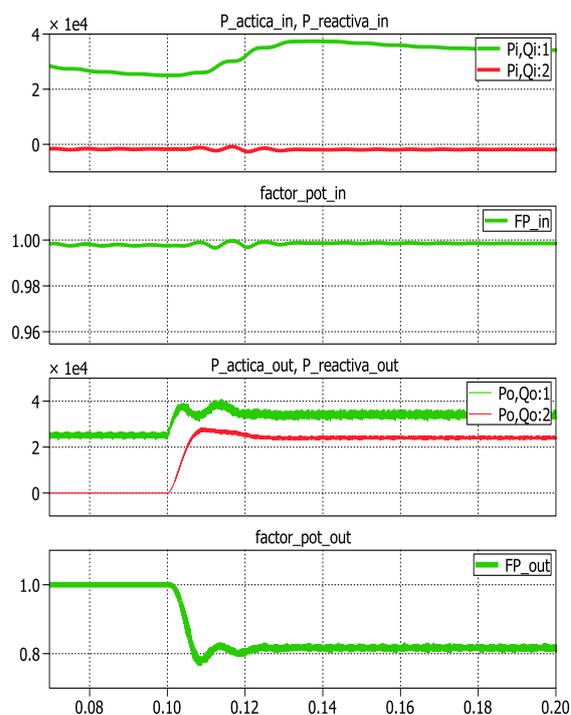


Figura 23. Potencia y Factor de potencia del SST carga R-L.

7. Conclusiones

Mediante las simulaciones presentadas, se demuestra que efectivamente el SST mejora la calidad de energía en un sistema eléctrico, ya que se puede observar que cuando hay perturbaciones en la entrada (Sag o Swell) la salida no se ve afectada, y cuando el factor de potencia en la salida disminuye, se mantiene un factor de potencia unitario en la entrada.

Mediante las simulaciones y observando la figura 13, se observa que a través de los enlaces DC del SST se puede alimentar cargas DC, y de igual forma que es posible realizar la inclusión de energías renovables al sistema y servir como apoyo a la red eléctrica. Además se puede observar que el voltaje trifásico de línea a neutro a la salida siempre se mantiene constante, sin importar el tipo de perturbación que afecte al sistema.

8. Agradecimientos

Agradezco principalmente a Dios que siempre me ha guiado y me ayudado en las etapas difíciles de mi vida, también agradezco de manera muy especial a mi familia que en todo momento han estado apoyándome y aconsejándome para que pueda concluir mis estudios. Agradezco a mis profesores por sus enseñanzas a lo largo de mi carrera, y a mi compañero de tesis por su gran ayuda en la culminación de este proyecto.

Jefferson Campoverde Bonete.

Agradezco principalmente a mis padres que me dieron la vida y han estado conmigo en todo momento, gracias papá y mamá por darme fuerza, sabiduría y valor para enfrentar la vida día a día. A mis hermanos que con sus palabras me daban fortaleza para seguir adelante, a mis compañeros de la universidad los cuales han estado conmigo en los buenos y malos momentos.

Oscar Mazacón Baño.

9. Referencias

- [1] Endesa Red S.A. (2012). "Las Redes Inteligentes".
- [2] H. Stevens, R. (1983). "Power Flow Direction definitions for metering of bidirectional power". IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems.
- [3] Falcones, S., Mao, X., & Ayyanar, R. (2010). "Topology comparison for Solid State Transformer implementation". Arizona: IEEE.
- [4] Rashid, & H., M. (2004). "Circuitos, Dispositivos y Aplicaciones". Pearson Educación.