

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

Nahin Morejón⁽¹⁾, Wilmer Quintero⁽²⁾, 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

sixifo@fiec.espol.edu.ec, nmorejon@espol.edu.ec, wfquinte@espol.edu.ec

Resumen

Para este proyecto se dimensiona los componentes básicos, y diseñar el control de un transformador de estado sólido(SST) de tres etapas con entrada trifásica y salida monofásica, donde la primera etapa es un rectificador, la segunda etapa es el DAB y la tercera etapa un inversor. El transformador de estado sólido cumple con muchas funciones una de las principales es el ahorro de energía logrando una estabilidad en la red eléctrica previniendo que haya caídas de tensiones empleando lo que conocemos como energía renovables. Para lograr que el SST cumpla su función al 100%, se somete a diversas pruebas las cuales son: Sags y Swell en el voltaje de la red, que son perturbaciones que reducen o incrementan la forma de onda de voltaje en un determinado tiempo. Inyección de potencia DC en el enlace de baja tensión, en el cual alimentamos el enlace de baja LVDC a cargas DC o fuentes de energía para proveer de energía a la red. Bajo factor de potencia, donde el SST mantiene su funcionamiento estable con la presencia de una carga con un bajo factor de potencia. Máxima carga y sobrecarga, donde el SST funciona adecuadamente con la presencia de sobrecargas; y por ultimo presencia de armónicos, donde inyectamos a la carga del sistema corrientes armónicas observando el comportamiento de las formas de onda de corriente y voltaje de entrada y salida. Tanto el diseño, como la simulación del modelo del sistema se lo realiza con la ayuda de las herramientas PLECS Y SIMULINK propias del programa MATLAB.

Palabras Claves: Transformador de Estado Sólido, Ahorro de Energía, Energías Renovables, Modelo del Sistema.

Abstract

For this project it shows the basic components and design the control of a transformer of solid state (SST) of three stages with a three-phase entrance and single-phase departure, where the first stage is a rectifier, the second stage is DAB and the third one stage is an inverter. Solid state transformer complies with many functions one of the principal is the energy save getting a stability on the electrical net preventing tensions falls using what we know how renewable energy. To get SST complies its function to 100%, submits to diversers proofs which are: Sags and swells in the voltage in a determinated time, which are disturbances that reduces or increases the voltage waveform at a given time. Injection of power DC in the link of low voltage, which one we feed the low power factor LVDC to charges DC loads of energy to provide power to the grid. Maximum load and overload, where the SST works properly with the presence of overload; and finally presence of harmonics, where we inject the system load current harmonics watching the behavior of the waves form of current and voltage of entrance and output. Both the design and simulation of the model of system it is done with the help of the tools PLECS and SIMULINK of the MATLAB program.

Keywords: Solid State Transformer, energy saving, renewable energies, model of the system.

1. Introducción

Hoy en día, muchas de las alteraciones presentes en nuestros sistemas eléctricos se deben a que la calidad de energía que recibimos se ve afectada ya sea por las reducciones de tensión y apagones lo cual no es nuevo, pero a medida que pasa el tiempo, el usuario ha ido incrementando su dependencia de la energía eléctrica y al mismo tiempo se ha vuelto más exigente, debido a que el avance de la tecnología nos permite adquirir dispositivos eléctricos capaces de mejorar la energía eléctrica en cantidad y calidad adecuada a los equipos al ser alimentados.

Para lograr mejorar que nuestro sistema eléctrico logre recibir una adecuada distribución de energía se ha propuesto diseñar el transformador de estado sólido SST, el cual es un dispositivo electrónico mucho más flexible que el transformador convencional, que permite mantener estable la red eléctrica ayudando a cambiar la red partiendo de que en el sistema la energía fluye en un solo sentido que es de la empresa distribuidora de energía eléctrica hacia los consumidores, a un sistema en que los consumidores también produzcan y distribuyan energía eléctrica como algo convencional. Para poder escoger su topología hemos utilizado el programa de simulación MATLAB, utilizando dos de sus herramientas básicas como lo son SIMULINK y la librería PLECS.

2. Planteamiento del problema

En la actualidad diferentes investigadores proponen implementar, la Red Eléctrica Inteligente con el objetivo de generar, transmitir y distribuir la energía eléctrica de una manera eficiente, segura y sostenible.

En consecuencia a esto es necesario conocer los problemas más frecuentes que afectan la calidad de energía en los sectores industriales, comerciales o en nuestros hogares, entre los más comunes tenemos:

- Apagones.
- Saltos y depresiones de voltaje.
- Variación de Frecuencia.
- Distorsión por Armónicos.
- Factor de Potencia.
- Armónicos de corriente.

La aplicación de los SST en la red eléctrica inteligente ayudaran a cambiar el sistema convencional, se trata en que la energía fluye en un solo sentido partiendo de las centrales eléctricas a los diferentes consumidores, a un nuevo sistema en que los sectores industriales, comerciales, propietarios de viviendas y negocios también puedan producir energía como algo común y convencional (Fig. 1).

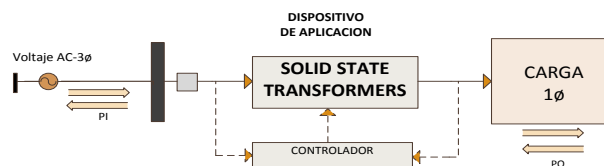


Fig. 1. Conexión del SST a la red.

3. Redes Eléctricas Inteligentes

Desde hace unos años, diversas iniciativas en todo el mundo trabajan en el desarrollo de las denominadas “Redes Eléctricas Inteligentes o Smart Grids” para sustituir a las actuales, que no han cambiado prácticamente desde que se concibieron a finales del siglo XIX, donde se hacían llegar grandes cantidades de energía a los consumidores estableciendo una relación unívoca. Cada vez más expertos proponen la sustitución de esta red por otro sistema que denominan “inteligente”, en virtud de las aplicaciones que permite y las nuevas tecnologías en las que se sustenta [1].

Red que integra de manera inteligente las acciones de los usuarios que se encuentra conectados a ella; generadores y consumidores, para conseguir un suministro eléctrico eficiente, seguro y sostenible (Fig. 2) [2].



Fig. 2. Concepto de Red Inteligente (Smart Grid).

Fuente: [2].

4. Transformador de estado sólido (SST)

El término transformador de estado sólido (SST, por sus siglas en inglés, Solid State Transformer). El SST está principalmente formado por un transformador, el cual es de alta frecuencia. Es una colección de componentes de semiconductores de alta potencia, transformadores convencionales de alta frecuencia y circuitos de control que se utiliza para proporcionar un alto nivel de control flexible para redes de distribución de energía. Los nuevos

transformadores de estado sólido son mucho más flexibles. Estos utilizan transistores y diodos y otros dispositivos basados en semiconductores que, a diferencia de los transistores usados en los chips de ordenadores, están diseñados para gestionar altos niveles de energía conmutar muy rápidamente.

En respuesta a las señales de una empresa o de una casa, pueden cambiar la tensión y otras características de la electricidad que producen. Pueden ofrecer tanto corriente continua como corriente alterna, o recibir cualquiera de las dos opciones de una instalación de turbinas eólica o de paneles solares y adecuar la frecuencia y el voltaje a las necesarias para la red. Tienen integrados procesadores y hardware de comunicaciones, lo que les permite comunicarse con los operadores de empresas de servicios públicos, con otros transformadores inteligentes, y con los consumidores (Fig. 3) [3].

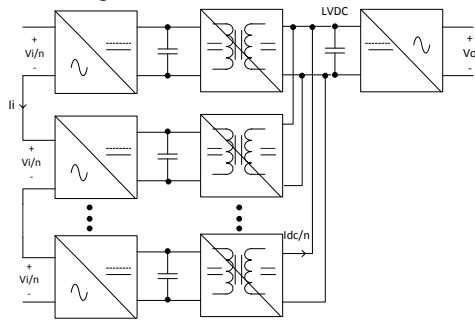


Fig. 3. (SST) Fuente [3].

5. Topologías de un SST

Las diferentes topologías del SST son actualmente consideradas bidireccionales que son capaces de reemplazar un transformador convencional. Algunas de las topologías del SST han sido evaluadas y modificadas para que puedan operar en forma bidireccional [1].

- AC-AC Full-bridge Converter.
- AC-AC Flyback.
- AC-DC Isolated Boost + PWM Inverter.
- AC-DC DAB + PWM Inverter.
- PWM Rectifier + DC-DC DAB + PWM Inverter.
- Multilevel Rectifier + DC-DC Full-bridge Converter + PWM Inverter.

En nuestro proyecto se utiliza el Multilevel Rectifier + DC-DC-Dual Active Bridge Converter + PWM Inverter (Fig. 4).

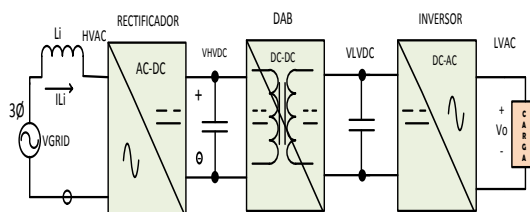


Fig. 4. Topología del SST.

6. Dimensionamiento de los componentes del SST.

En este capítulo se dimensionan cada uno de los elementos del SST y la forma en cómo se han determinado sus valores.

Dimensionamiento del rectificador AC-DC:

En la fig. 5 definimos la topología del rectificador que se utiliza, la entrada de este convertidor es trifásica. Para el dimensionamiento de los elementos tenemos que el voltaje trifásico de entrada que entregará el rectificador será de 13.2kV, a una potencia de 100 KVA, donde el índice de modulación a utilizar será de:

$$md = 0.8 \quad (1)$$

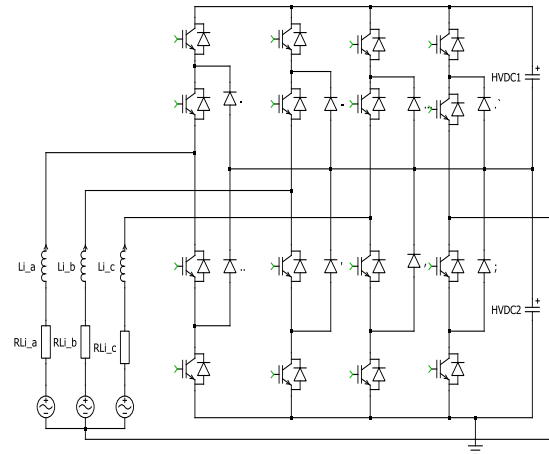


Fig. 5. Esquemático del rectificador

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

$$V_L = L \frac{dI_L}{dt}$$

$$\Delta i_{Lmax} = \frac{1}{L} \int_{t_0}^t V_L dt$$

$$L = 86mh \quad (2)$$

$$\Delta V_C = \frac{1}{C} \int i_c dt$$

$$I_C = C \frac{dV_C}{dt} \quad (3)$$

$$CH = 75 \mu F$$

De acuerdo a la Fig. 6 podemos comprobar que el rizado pico-pico de la señal de corriente es similar al que estableció al 3% de la corriente nominal, donde también se observa que el valor pico de la corriente en los tres inductores no excede de su valor nominal.

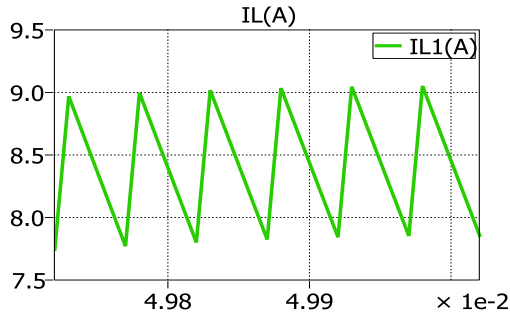


Fig. 6. Valor rizado de la corriente de los inductores.

Para comprobar los cálculos colocamos una fuente de corriente DC con dirección saliendo del capacitor y con el valor promedio que tiene la señal en corriente alterna. En la Fig. 7 observamos el voltaje DC en el capacitor.

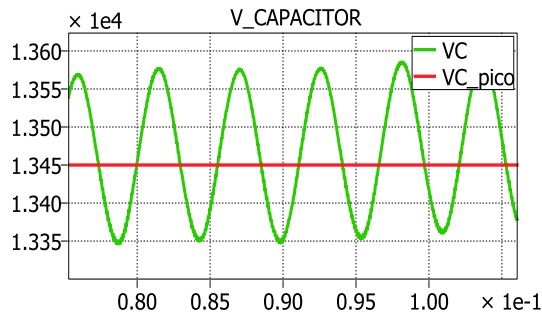


Fig. 7. Voltaje que circula a través del capacitor

Dimensionamiento del DAB:

Con un voltaje de línea a línea de 220 V ya que requerimos a la salida del SST carga monofásica, y con una modulación $m_d = 0.8$ procedemos a calcular el enlace DC de baja tensión LVDC:

$$V_{LVDC} = \frac{V_{ab} * \sqrt{2}}{m_d} = 388.90 \text{ V} \quad (4)$$

Para dimensionar el inductor del DAB utilizamos la siguiente ecuación:

$$L = \frac{V_1^2}{2\pi f_s P_{DAB}} \phi_{Nom} \left(1 - \frac{|\phi_{Nom}|}{\pi}\right) \quad (5)$$

$$L_{DAB} = 10.08 \text{ mh}$$

Para dimensionar el capacitor del DAB analizamos el circuito de la topología del SST, el método que se utiliza es dimensionar un capacitor por cada DAB existente en la topología, en este caso tenemos dos DAB por lo tanto el cálculo sería de solo dos capacitores uno para cada etapa, una vez encontrado el capacitor lo multiplicamos por dos para obtener el valor del capacitor que se necesita.

$$C = \frac{S_{max}}{2 * w_g * V_{LVDC} * V_{DCrpp}}$$

$$C_{DAB} = 173.41 \text{ mF} \quad (6)$$

Dimensionamiento del convertidor DC-AC:

La carga de entrada del SST es de 100 KVA, por lo tanto la potencia del convertidor DC-AC; formados por switches ideales para la conmutación y controlados por señal de ancho de pulso PWM (Pulse Width Modulation).

$$P_0 = \frac{V_{abrms} * I_{rms}}{\sqrt{2}}$$

$$L = \frac{\int v_L dt}{\Delta i_L} \quad (7)$$

$$L = 201.66 \text{ uH.}$$

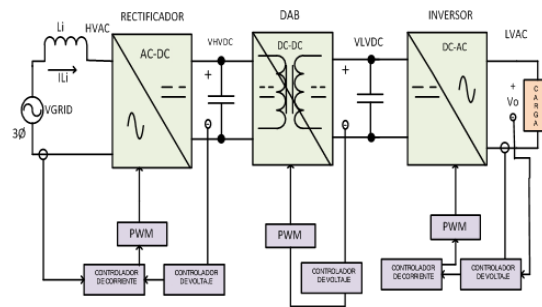
Para hallar el valor del capacitor se utiliza el criterio que dice que la frecuencia de resonancia f_{res} debe ser una década menos que la frecuencia de conmutación f_s de 20 Khz donde el valor del capacitor se lo determina mediante la siguiente ecuación:

$$f_{resonancia} = \frac{1}{2\pi * \sqrt{LC}}$$

$$C = 31.04 \text{ uf.} \quad (8)$$

7. Estrategia de control

Para el esquema general de control del SST de tres etapas fig. 8, la estrategia de control para diseñar el controlador se debe tomar en cuenta que en los enlaces DC se tiene que controlar la magnitud del voltaje y en cada una de las tres etapas debemos controlar la dirección y magnitud de la corriente, diseñando un lazo de control para la corriente y para el voltaje, sabiendo que el lazo de corriente es más



rápido que el lazo de voltaje

Fig. 8. Esquema general de control del SST de tres etapas

Modelado de la Planta del Convertidor AC-DC.

Se realiza el análisis de voltaje y obtenemos las siguientes ecuaciones:

$$\begin{aligned} e_a &= Ri_a + L \frac{\partial i_a}{\partial t} + V_a \\ e_b &= Ri_b + L \frac{\partial i_b}{\partial t} + V_b \\ e_c &= Ri_c + L \frac{\partial i_c}{\partial t} + V_c \end{aligned} \quad (9)$$

Para simplificar el análisis se aplica la transformada de PARK

$$T = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos(\omega t) & \cos\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\omega t - \frac{4\pi}{3}\right) \\ -\sin(\omega t) & -\sin\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\omega t - \frac{4\pi}{3}\right) \end{bmatrix} \quad (10)$$

Obteniendo así la función de transferencia de la planta para el eje d:

$$\frac{I_d(s)}{V_{con d}(s)} = -\frac{1}{Ls + R} \quad (11)$$

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

$$G_c(s) = -\frac{k_c}{s} \frac{\left(1 + \frac{s}{9405.96}\right)}{\left(1 + \frac{s}{419716.77}\right)} \quad (12)$$

Se realizamos el diagrama de bode y se comprueba que cumpla con las especificaciones adecuadas para el control del sistema.

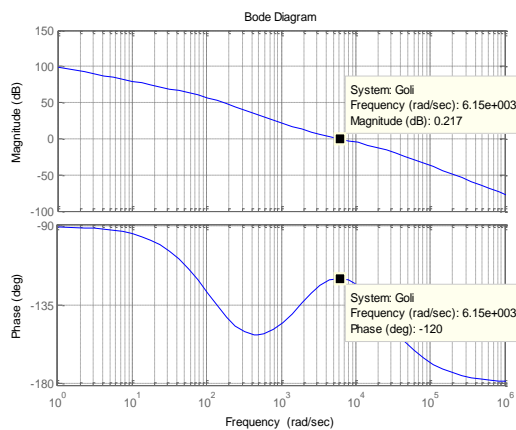


Fig. 9. Respuesta de frecuencia del sistema para la planta de corriente de la Etapa AC-DC, incluyendo la ganancia del controlador.

Modelado de la Planta del DAB.

Usando la ecuación de la potencia del DAB se obtiene:

$$\begin{aligned} P_{DAB} &= \frac{V1 \times V_2'}{2\pi \times f_s \times L} \times \phi_{Nom} \left(1 - \frac{|\phi_{Nom}|}{\pi}\right) \\ P_{DAB} &= \frac{V_{HVDC} \times V_{LVDC'}}{X_{DAB}} \times \phi_{Nom} \left(1 - \frac{|\phi_{Nom}|}{\pi}\right) \\ G_{DAB} &= \frac{\Delta P}{\Delta \phi} = \frac{V_{HVDC} \times V_{LVDC'}}{X_{DAB}} \times \left(1 - \frac{2\phi}{\pi}\right) \end{aligned} \quad (13)$$

$$G_{DAB} = \frac{V^2 HVDC}{X_{DAB}}$$

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

Ya determinadas las respectivas plantas, se utiliza el método del factor K ya mencionado anteriormente, utilizando el ancho de banda y el margen de fase para encontrar el controlador de la planta.

$$G_{cv}(s) = -\frac{0.16}{s} \frac{\left(1 + \frac{s}{112.2383}\right)}{\left(1 + \frac{s}{1563.3}\right)} \quad (14)$$

Obtenida la ganancia se realiza el diagrama de Bode del sistema el cual podemos comprobar que cumple con lo planteado que es Margen de Fase y Ancho de Banda deseados.

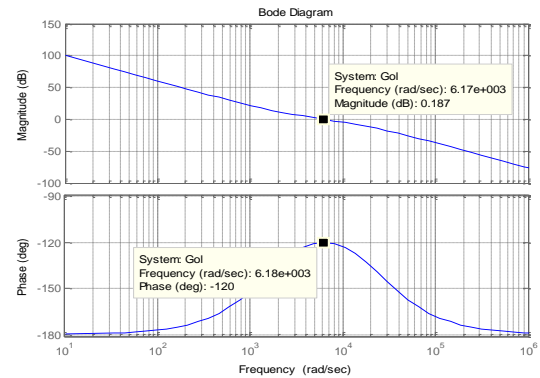


Fig. 10. Diagrama de bode de lazo abierto del DAB.

Modelado de la Planta del Convertidor DC-AC.

Aplicando la ley de Kirchhoff se obtiene la siguiente ecuación:

$$0.5V_{conv} - V_{RL_o} - V_{L_o} - V_o = 0$$

$$\frac{mLVDC}{2} - I_{L_o}(sL_o + RL_o) - V_o = 0 \quad (15)$$

$$G_{pi}(s) = \frac{0.5 \cdot LVDC}{(sL_o + RL_o)}$$

Para encontrar la ganancia de la planta de voltaje G_{pv} , sabiendo que el lazo de corriente es mas rápido que el lazo de voltaje, el cual lo ve como una constante, considerándolo como una fuente de corriente AC.

$$G_{pv}(s) = \frac{Z_o}{sCZ_o + 1} \quad (16)$$

Para verificar se realiza del Diagrama de Bode comprobando que el sistema cumple con las especificaciones adecuadas de Margen de Fase y Frecuencia de corte.

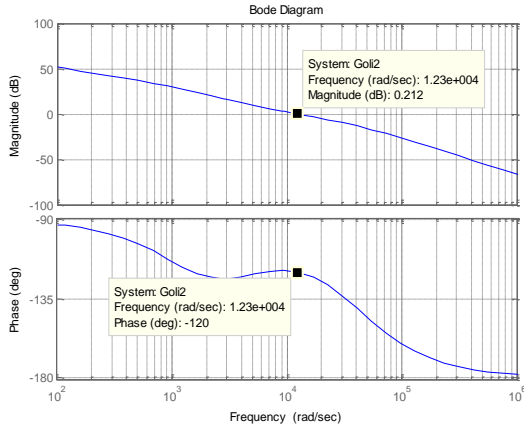


Fig. 11. Diagrama de bode de corriente del convertidor DC-AC (Inversor)

Se utiliza la herramienta de SISOTOOL de Matlab agregándole el polo resonante a una frecuencia de 60 Hz para lo cual debemos manipular la ganancia de nuestro sistema para que nos dé un Margen de Fase de 60 Hz a una frecuencia de corte de 600 Hz para que el ancho de banda sea el requerido por el sistema para lo cual la ganancia del controlador es:

$$G_c(s) = \frac{3330(s + 9990)(s + 188)^2}{s(s + 4343)(s^2 + (376.9911)^2)} \quad (17)$$

Para verificar se realiza del Diagrama de Bode comprobando que el sistema cumple con las especificaciones adecuadas de Margen de Fase y Frecuencia de corte.

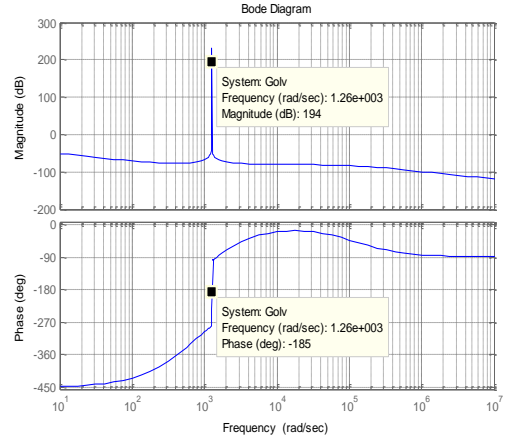


Fig. 12. Diagrama de Bode de voltaje del convertidor DC-AC (Inversor)

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

La primer grafica de la fig. 13 muestra el resultado de la forma de onda del voltaje la red V_{grid} en el instante de tiempo $0.1 \leq t \leq 0.2$, lo que provoca que el voltaje V_{HVDC} reduzca su valor, pero después de un instante de tiempo se estabiliza a su nivel de referencia.

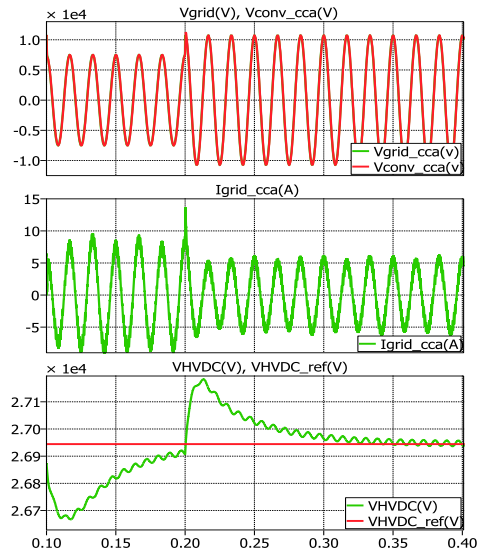


Fig. 13. Voltaje de la red y convertidor, Corriente I_{L_HVDC} y Voltajes HVDC

En la Fig. 14 se observa que el voltaje de salida V_0 como la corriente de salida I_0 y el voltaje de baja V_{LVDC} no se ven afectados por la perturbación.

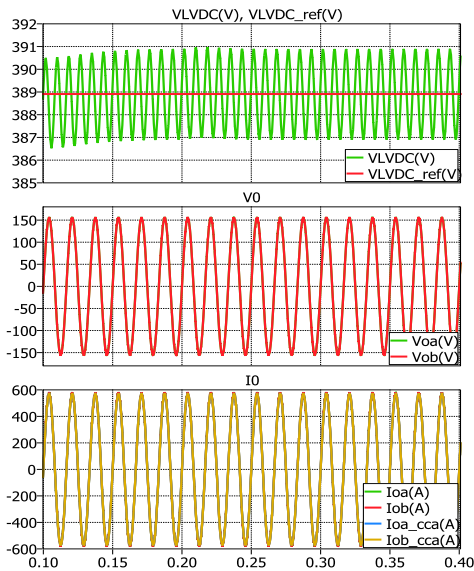


Fig. 14. Voltajes LVDC, voltaje de salida del inversor y corrientes de salida del inversor

En la Fig. 15 se observa las gráficas de las potencias de entrada y salida del SST con su respectivo factor de potencia donde comprobamos que al momento de aplicar el Sag de voltaje la potencia de entrada disminuye, pero su potencia de salida permanece constante igual que el factor de potencia de entrada y salida, demostrando que las perturbaciones en la entrada no van afectar a la salida.

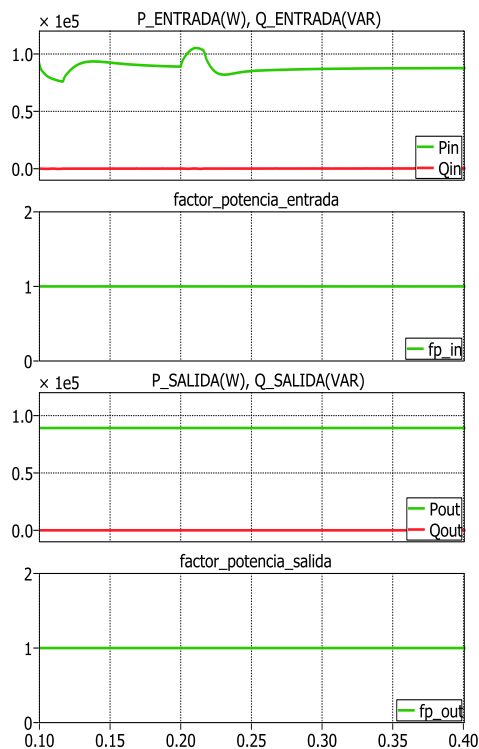


Fig. 15. Potencia de entrada y salida, fp de entrada y salida

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

De acuerdo a los resultados Fig. 16 muestra que el Swell del 20% en el voltaje de la red V_{grid} en el tiempo de $0.1 \leq t \leq 0.2$, provocando que el voltaje V_{HVDC} aumente y luego se estabilice a su nivel de referencia.

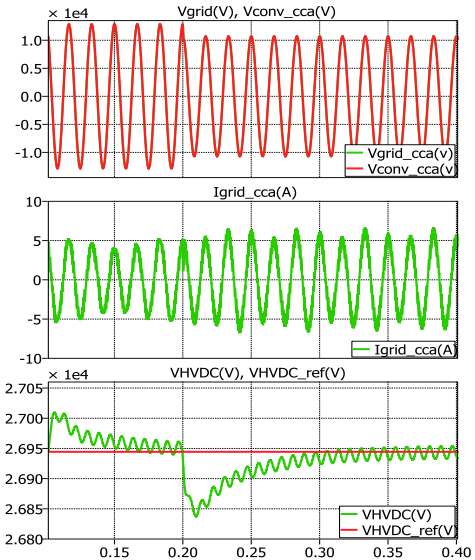


Fig. 16. Voltaje de la red y convertidor, Corriente I_{L_HVDC} y voltajes HVDC

La Fig. 17 muestra que el voltaje de salida V_0 , la corriente de salida I_0 y el voltaje V_{LVDC} no se ven afectados por la perturbación.

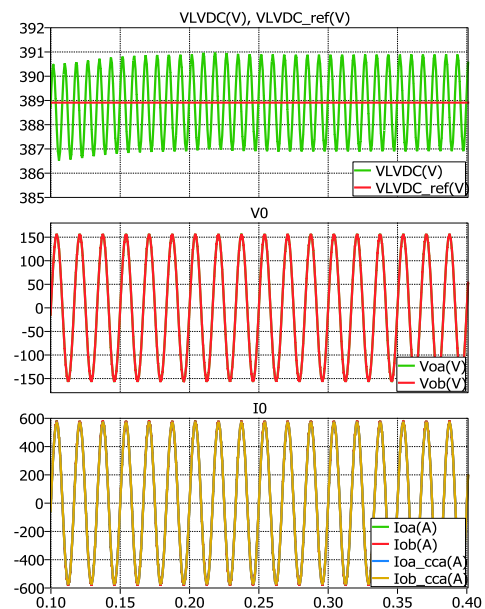


Fig. 17. Voltajes LVDC, voltaje de salida del inversor y corrientes de salida del inversor

La Fig. 18 se observa que la potencia de entrada al momento de producirse el Swell aumenta, pero su potencia de salida permanece constante y el factor de potencia de entrada y salida mantiene su valor unitario

demonstrando que las perturbaciones en la entrada no afectan a la salida.

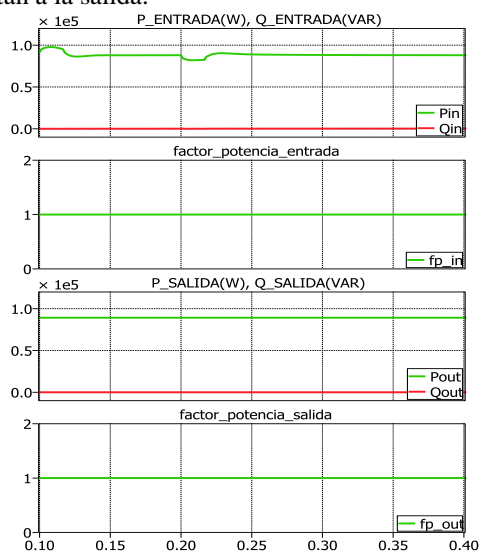


Fig. 18. Potencia de entrada y salida, fp de entrada y salida

10. Simulación de Inyección de Potencia en el enlace de baja LVDC.

La perturbación DC de 50 amperios se realiza en un tiempo de $0.1 \leq t \leq 0.2$, y para la perturbación DC de 100 amperios se realiza en un tiempo de $0.2 \leq t$, en adelante mostrando las respuestas de voltaje y corriente del sistema.

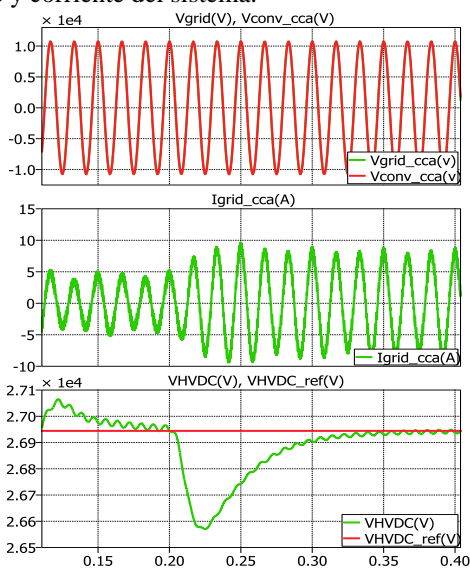


Fig. 19. Voltaje de la red y convertidor, Corriente I_{L_HVDC} y Voltajes HVDC

En los resultados de la Fig. 19 se observa que al momento de consumir potencia la corriente de la red I_{grid} disminuye su valor y tanto el voltaje de la red V_{grid} como del convertidor V_{conv} aumentan su valor, para la inyección de potencia se observa como la corriente de la red para compensar la potencia de salida aumenta su valor y el voltaje de la red y del convertidor disminuyen un poco su valor. También se

muestra como el voltaje HVDC aumenta y disminuye su valor para darle estabilidad a las corrientes y voltajes de salida del inversor sin que sufran ningún cambio Fig. 20.

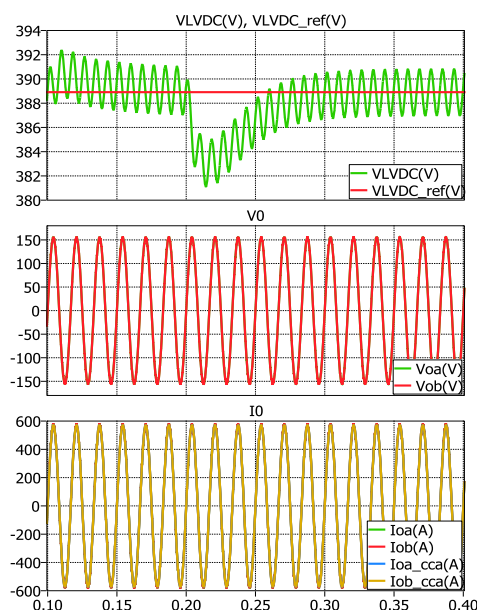


Fig. 20. Voltajes LVDC, voltaje de salida del inversor y corrientes de salida del inversor

La Fig. 21 muestra como la potencia de entrada disminuye al momento que sustraemos potencia DC y al momento de inyectarle potencia DC, se observa como la potencia de entrada aumenta su valor, las potencias de salida y los factores de potencia permanecen constantes debido a que la salida del inversor no sufrió ningún cambio en los valores de corriente y voltaje.

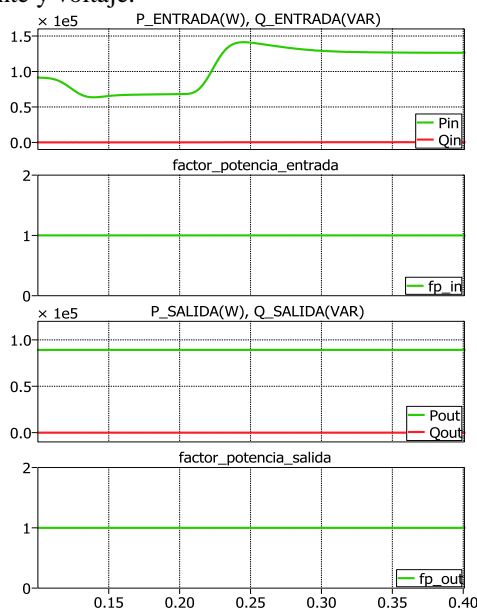


Fig. 21. Potencia de entrada y salida, fp de entrada y salida

11. Simulación de Condición de Máxima Carga y Sobrecarga.

La Fig. 22 se observa cómo responden las corrientes y voltajes de la red del rectificador.

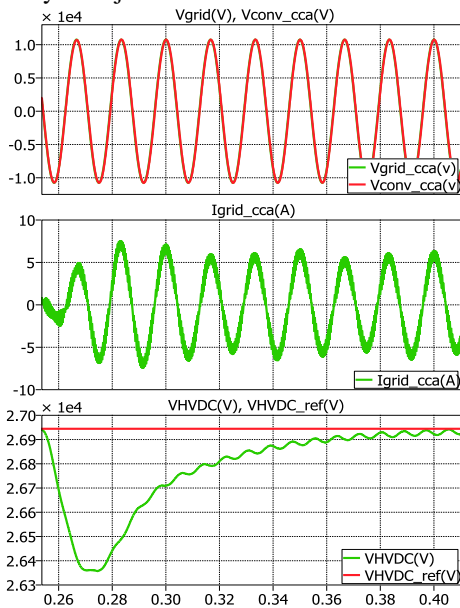


Fig. 22. Voltaje de la red y convertidor, Corriente IL_HVDC y Voltajes HVDC

En la Fig. 23 se observa que al aumentar la carga aumenta la corriente de salida manteniéndose constante el voltaje de salida los voltajes VHVDC Y VLVDc al momento de aumentar la carga disminuyen su valor por un instante de tiempo pero luego se estabilizan a su valor real dándole una máximo valor de potencia a la red.

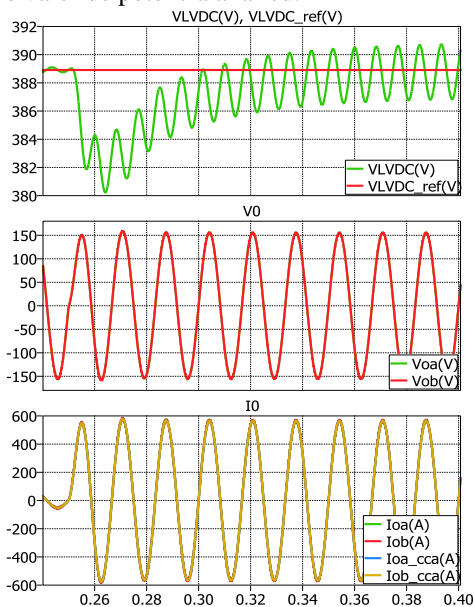


Fig. 23. Voltajes LVDC, voltaje de salida del inversor y corrientes de salida del inversor

La Fig. 24 muestra como la potencia de entrada y salida aumentan a su valor máximo debido a la máxima carga aplicada manteniendo constante los

factores de potencia de entrada y salida en su valor de 1 debido a la carga resistiva.

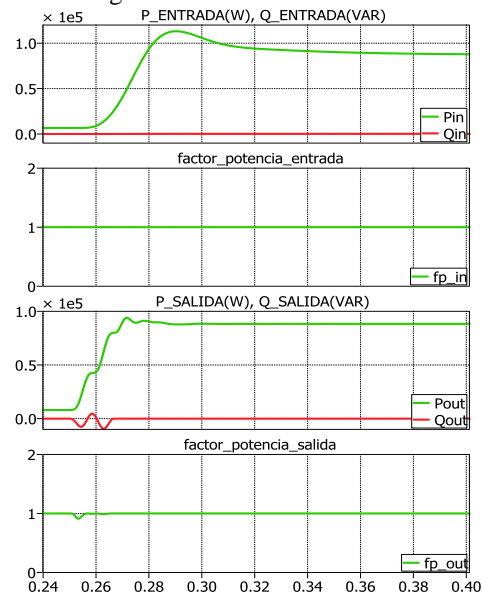


Fig. 24. Potencia de entrada y salida, fp de entrada y salida

12. Prueba de Bajo Factor de Potencia en la Carga.

Se utiliza un valor de 0.7 este valor se obtiene con una carga cuyas características son de $R=0.34 [\Omega]$ y $L=0.9077 [\text{mH}]$ conectada a un tiempo de $t \geq 0.2$ para observar los resultados.

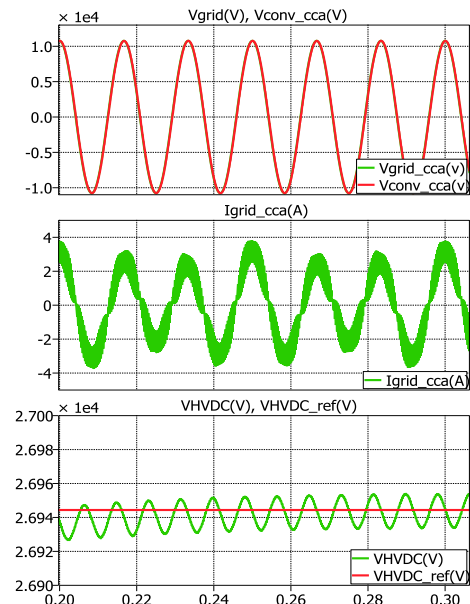


Fig. 25. Voltaje de la red y convertidor, Corriente IL_HVDC y Voltajes HVDC

En la Fig. 26 se observa cómo se mantiene estable el voltaje de salida del inversor pero la corriente aumenta debido a la carga que está conectada la cual

entrega potencia reactiva, pero no logra afectar la potencia de entrada del SST.

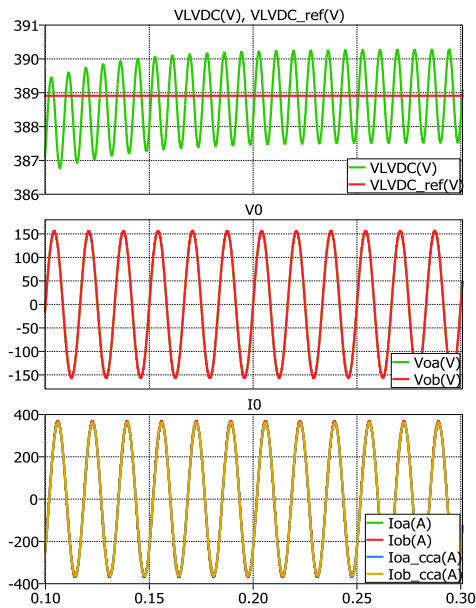


Fig. 26. Voltajes LVDC, voltaje de salida del inversor y corrientes de salida del inversor

La Fig. 27 Muestra como aumenta la potencia a un valor casi del 60% debido a la carga que contiene donde no afecta la potencia reactiva por lo tanto su factor de potencia de entrada es unitario no así a la salida donde el factor de potencia nos da un valor casi del 0.8 debido a la potencia reactiva en la carga, el cual está en un rango aceptable para que pueda controlar normalmente el SST.

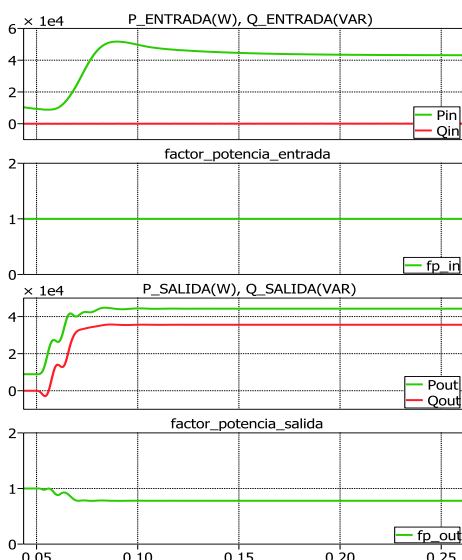


Fig. 27. Potencia de entrada y salida, fp de entrada y salida

13. Presencia de Armónicos.

La Fig. 28 muestra como la corriente de entrada de la red no se ve afectada por los armónicos debido al

que el capacitor del enlace de baja LVDC absorbe las corrientes armónicas que se producen y no permitir la perturbación en la entrada.

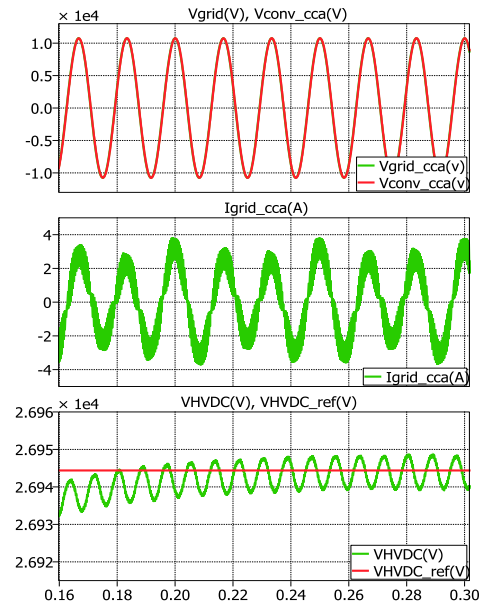


Fig. 28. Voltaje de la red y convertidor, Corriente IL_HVDC y Voltajes HVDC

La Fig. 29 nos muestra como la presencia de armónicos en la salida afecta a la forma de onda de la corriente dañando su forma sinusoidal y observamos cómo estos armónicos no afectan a la forma de onda del voltaje gracias a su respuesta rápida de control evitando que su onda tenga perturbaciones.

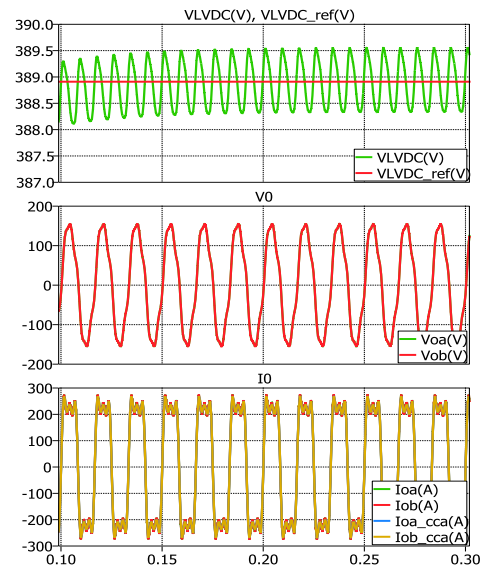


Fig. 29. Voltajes LVDC, voltaje de salida del inversor y corrientes de salida del inversor.

La Fig. 30 nos muestra como las potencias de entrada y salida y su respectivo factor de potencia no se ven afectados con la presencia de armónicos en la salida del inversor.

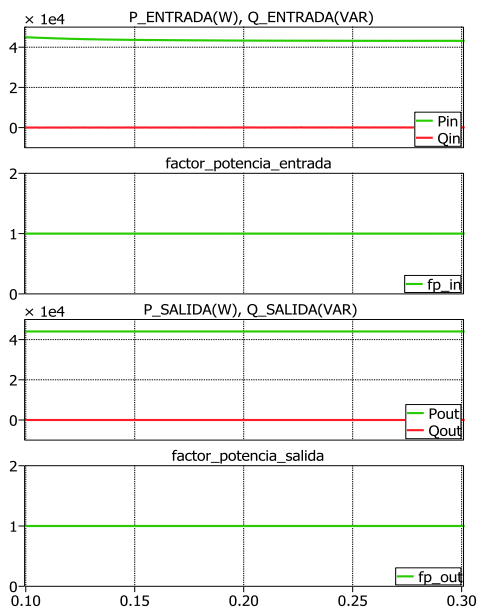


Fig. 30. Potencia de entrada y salida, fp de entrada y salida

14. Conclusiones

El dimensionamiento de los componentes de cada etapa del SST como inductores, capacitores y resistencias se realiza correctamente, se lo comprueba de acuerdo a los parámetros establecidos del sistema tanto de voltaje, corriente y potencia cumpliendo con los valores requeridos al realizar la simulación al sistema.

De acuerdo a las simulaciones del SST, podemos concluir que el SST funciona de manera estable con muchas características funcionando como un transformador convencional mejorando su eficiencia, además que nos permite ahorrar y mejorar la calidad de energía teniendo un flujo en ambas direcciones con una exactitud que su potencia en la entrada es igual a la potencia en la salida.

15. Agradecimientos

Le agradezco principalmente a Dios por haberme ayudado en los momentos más difíciles, a mis padres Jorge Morejón Montoya y Zoila Saldivia Cedeño por haberme dado la vida y que con su confianza y amor me guiaron por el camino del bien, a mis hermanas Marcela, Valeria y Leonela y a mi hermano Jorge a mi tío Dr. Carlos Saldivia Cedeño por ser parte fundamental en mi proceso universitario, a mi novia María José por su apoyo y amor incondicional, a todos

mis amigos que han estado conmigo en las buenas y en las malas, a los profesores de la FIEC principalmente al Ing. Efrén Herrera y al PhD. Sixifo Falcones que gracias a sus enseñanzas hemos culminado con éxito este proyecto.

Nahin Gregorio Morejón Saldivia.

Le agradezco primeramente a DIOS y a mis padres OSWALDO QUINTERO GUERRA Y CLARA PLAZA COX por darme las fuerzas y por no dejarme caer en los momentos difíciles y por todo el apoyo y el esfuerzo y sacrificio que han hecho porque yo salga adelante y sea un profesional, a mi novia TATIANA CAMACHO LOZANO por estar conmigo apoyando en estos momentos, a mis AMIGOS por estar conmigo por esa amistad sincera que han sabido brindar.

Wilmer Fabián Quintero Plaza.

16. Referencias

- [1] Falcones, S., Mao, X., y Ayyanar, R, "Simulation of the FREEDM Green Hub with Solid State Transformers and Distributed Control", 2013.
- [2] Fernando Soto, AEGE, "Las Redes Eléctricas Inteligentes: Seguridad y estabilidad del sistema", 2011.
- [3] Michael J. Kawa, "Solid-state transformers ready to enable the Smart Grid", 2013.
- [4] Luis Valle Aller, "Departamento de tecnología: corriente alterna trifásica", 2013.