

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 puentes en cascada.

Milo Quishpe Buñay ⁽¹⁾, Sixifo Falcones Zambrano ⁽²⁾

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

Escuela Superior Politécnica del Litoral (ESPOL)

Campus Gustavo Galindo, Km. 30.5 vía Perimetral

Apartado 09-01-5863. Guayaquil-Ecuador.

mquishpe@fiec.espol.edu.ec ⁽¹⁾, sfalcones@fiec.espol.edu.ec ⁽²⁾

Resumen

En el presente proyecto se diseña y simula el controlador de un transformador de estado sólido, tomando en cuenta cada una de las etapas, las cuales van desde la conexión con la red hasta llegar a la carga del usuario; sin perder de vista los diferentes problemas de calidad de energía que se presentan; tales como las depresiones y picos de voltajes ya que son precisamente estos los que se intentan suprimir para poder brindar un mejor servicio eléctrico. Empezando con una breve descripción de los problemas en las redes de distribución eléctrica; éste proyecto muestra las diferentes fórmulas que permiten el dimensionamiento de capacitores e inductores a usarse en el transformador de estado sólido (Solid State Transformers, SST). Con los elementos calculados se procede a diseñar los controladores de voltaje y corriente para cada etapa. Las técnicas de control a usarse en el presente trabajo son: el factor K y la inclusión de polos resonantes. Finalmente se realizan las pruebas al SST. El software a utilizarse para el diseño y simulación del presente proyecto es Matlab y las librerías Simulink y Plecs.

Palabras Claves: Transformador de Estado Sólido, Convertidor, Red Inteligente, Doble Puente Activo.

Abstract

The present project is designed and simulated driver transformer solid state , taking into account each of the stages , ranging from the connection with the network load to reach the user, without losing sight of the different problems power quality presented , such as voltage Sag's and Swell's and it is these which try to suppress in order to provide better electrical service. Beginning with a brief description of the problems in electrical distribution networks, this project shows the different formulas for sizing of capacitors and inductors for use in Solid State Transformer (SST). With the

calculated elements necessary to design controllers voltage and current for each stage. Control techniques used in this work are: the K factor and the inclusion of resonant poles. Finally SST tests are performed. The software used for design and simulation of this project is Matlab with Simulink and Plecs libraries.

Keywords: Solid State Transformer, Converter, Smart Grid, Dual Active Bridge.

Introducción

El transformador convencional es una máquina que transfiere energía eléctrica, sin cambiar de frecuencia, a través de los principios de inducción electromagnética. Sin embargo se producen pérdidas: en el núcleo, en los devanados.

Aparte de los problemas anteriormente mencionados existen otros tales como la generación de potencia reactiva; la cual no se utiliza para el consumo de los equipos y las corrientes armónicas generadas por el propio sistema de potencia o por la carga.

Para lograr una solución óptima a los problemas mencionados los especialistas recomiendan utilizar convertidores; los cuales son sistemas electrónicos que tienen por objetivo convertir la energía eléctrica de una forma más eficiente.

Los transformadores de estado sólido se clasifican en: transformadores de una etapa, transformadores de dos etapas y transformadores de tres etapas.

Los transformadores de una etapa aunque teniendo menos dispositivos electrónicos que los otros tipos de transformadores presentan; tienen como principal desventaja la falta de capacitancia de enlace DC [1]; la figura 1 presenta a un transformador de una etapa.

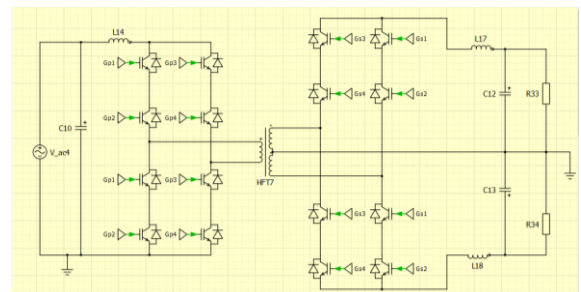


Figura 1. Transformador de estado sólido de una etapa

1. Análisis del problema

1.1 Red de distribución eléctrica

En un sistema de potencia la etapa de distribución es fundamental ya que se debe tener al usuario constantemente con el servicio eléctrico de una manera confiable así tenemos dos condiciones: la estabilidad de la red y la calidad de la energía, para cumplir esto los investigadores recomiendan el uso de transformadores de estado sólido.

El transformador de dos etapas aunque basado en una versión AC-DC del convertidor incrementador tiene como principal inconveniente el uso de dos controles diferentes dependiendo de la dirección del flujo de potencia [1]. La figura dos muestra este tipo de transformador.

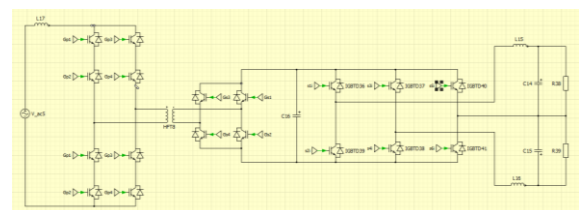


Figura 2. Transformador de estado sólido de dos etapas

1.2. Transformadores de estado sólido

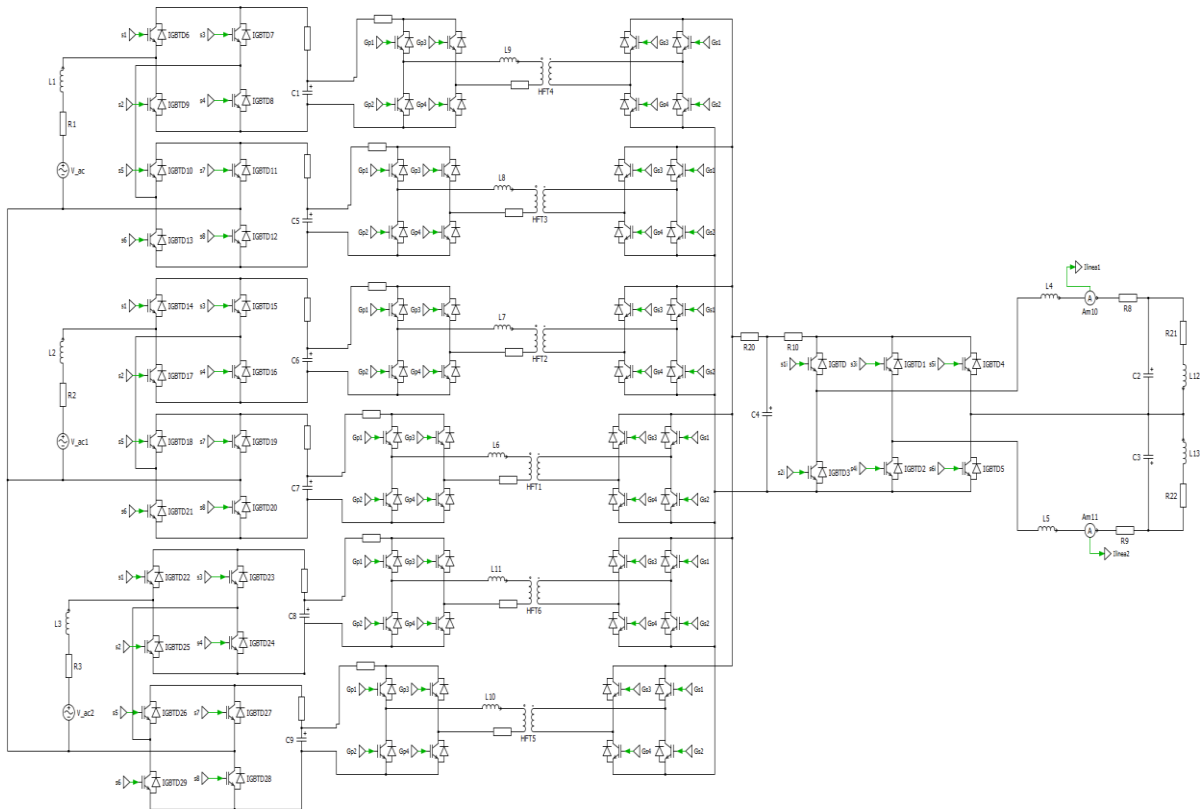


Figura 3. Transformador de estado sólido de tres etapas

Según especialistas el transformador de tres etapas es el que mejor se adapta a redes inteligentes (Smart Grid); debido principalmente a que puede incorporar en su voltaje de enlace DC de baja tensión una carga o fuente DC externa [1]. La figura tres muestra este tipo de transformador.

- vi. Fluctuaciones de tensión
- vii. Variaciones de frecuencia

2. Fundamento teórico

2.1 Calidad de energía

El estudio de la calidad y las formas de controlar el suministro eléctrico se ha intensificado en medida que los equipos se han vuelto más sensibles a los cambios o alteraciones de tensión, corriente y frecuencia del suministro.

Las perturbaciones en la calidad del suministro definidas por el estándar del IEEE [2], según la forma de la onda son:

- i. Transitorios
- ii. Interrupciones
- iii. Baja de tensión/ subtensión
- iv. Aumento de tensión/ sobretensión
- v. Distorsión de la onda

2.2 Red Inteligente

Los transformadores utilizados actualmente son dispositivos de una sola función cambian el voltaje de un nivel a otro. Los nuevos transformadores de estado sólido son más flexibles, ya que presentan dispositivos basados en semiconductores los cuales están diseñados para gestionar altos niveles de energía y conmutar muy rápidamente. Estos pueden cambiar las características de la electricidad, pueden ofrecer corriente continua y alterna, ser generada por turbinas eólicas o paneles solares y adecuar la frecuencia y el voltaje considerando las necesidades de la red [3].

2.3 Convertidores

Aunque hasta la fecha los especialistas no se han puesto de acuerdo en el nombre de cada uno de los convertidores aquí se abordara la formulación respectiva.

En el convertidor ac-dc que se muestra en la figura 4 se calculan el inductor y la capacitancia de enlace; así para un determinado rizado de corriente Δi a través del inductor [4] se tiene:

$$L = \frac{\int V dt}{\Delta i} \quad (1)$$

Para el caso del inductor L que está trabajando a una frecuencia f la impedancia se denomina reactancia inductiva XL [5] y es igual a:

$$X_L = 2 * \pi * f * L \quad (2)$$

Para un determinado rizado de voltaje ΔV en el capacitor de enlace de alto voltaje [5] se tiene:

$$C = \frac{\int i dt}{\Delta V} \quad (3)$$

La reactancia capacitiva es:

$$X_c = \frac{1}{2 * \pi * f * C} \quad (4)$$

El voltaje DC de alta es:

$$V_{DC} = \frac{V_f(\text{pico})}{m} \quad (5)$$

De donde m es el índice de modulación. Para calcular el voltaje del capacitor de enlace de cada bloque se divide el voltaje DC para dos.

$$V_{\text{alta}} = \frac{V_{DC}}{2} \quad (6)$$

Para que exista flujo de potencia debe haber un desfaseamiento entre las barras de un sistema de potencia, es decir que si V1 tiene un ángulo $\Delta 1$ y V2 un ángulo $\Delta 2$ se tiene para la potencia activa:

$$P = \frac{V_1 * V_2}{X_l} \text{seno} \Delta \quad (7)$$

De donde Δ es la resta $\Delta = \Delta 1 - \Delta 2$ y $X_l = 2 * \pi * f * L$

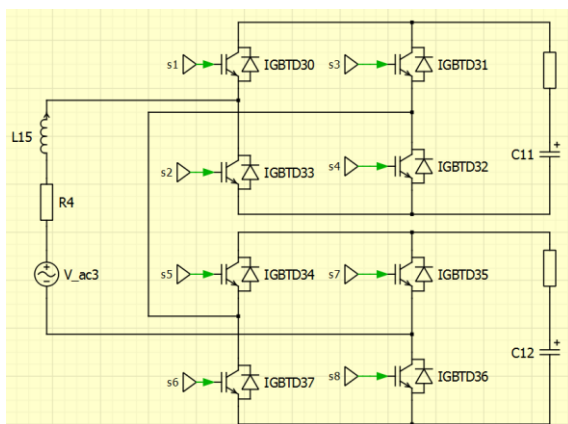


Figura 4. Convertidor multinivel AC-DC

El convertidor DC-DC a utilizar en este trabajo es el dual active bridge (DAB) ver figura 5. Para un

ángulo de desfase φ entre los voltajes del primario y del secundario y con la potencia P de cada nivel de voltaje se procede a realizar el cálculo del inductor del DAB es [4]:

$$L_{DAB} = \frac{V_{\text{alta}}^2}{2 * \pi * f * P} * \varphi \left(1 - \frac{|\varphi|}{\pi} \right) \quad (8)$$

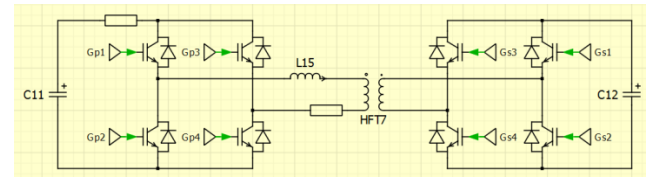


Figura 5. Dual active bridge DAB

El cálculo de los compensadores de los convertidores ya presentados se lo realiza mediante el método del factor K; ver tabla 1.

Tabla 1. Tipos de controladores según factor K

Factor K	Fórmula	Condición
TIPO I	$G_c = \frac{K_c}{s}$	
TIPO II	$G_c = \frac{K_c(1 + \frac{s}{W_z})}{s(1 + \frac{s}{W_p})}$	$W_z < W_p$
TIPO III	$G_c = \frac{K_c(1 + \frac{s}{W_z})^2}{s(1 + \frac{s}{W_p})^2}$	$W_z < W_p$

De donde W_z y W_p son las frecuencias de corte del cero y polo respectivamente. Para encontrar K_c se tiene un margen de fase y ancho de banda definidos con lo que se obtiene un ángulo de fase del sistema \varnothing_{is} ; entonces se calcula el impulso de fase \varnothing_i con la ecuación 8:

$$\theta_i = MF - \theta_{sis} - 90 \quad (9)$$

Donde MF es el margen de fase que se desea; además la tabla 2 muestra el tipo de controlador según sea el impulso de fase calculado. El impulso de fase para el transformador da un controlador tipo II, entonces:

$$W_z = \frac{W_c}{K} \quad (10)$$

$$W_p = K W_c \quad (11)$$

De donde W_c es la frecuencia de corte deseada y el valor de K lo da la ecuación 12.

$$K = \tan\left(\frac{\theta_i}{2} + 45\right) \quad (12)$$

Tabla 2. Tipos de controladores según factor K

θ_i REQUERIDO	Tipo de Controlador
0°	Tipo I
$< 90^\circ$	Tipo II
$> 90^\circ$	Tipo III

Los valores obtenidos de las ecuaciones 9, 10, 11,12 se los evalúa en la fórmula del factor K de tipo II de la tabla 1 con $K_c=1$. Seguidamente el valor de K_c es [6]:

$$K_c = \frac{1}{\text{magnitud del paso anterior}} \quad (13)$$

Finalmente para el convertidor DC-AC cuya carga es monofásica; ver figura 6, se hacen los cálculos para el inductor con la ecuación 1; el capacitor de enlace de baja se lo calcula con la ecuación 3.

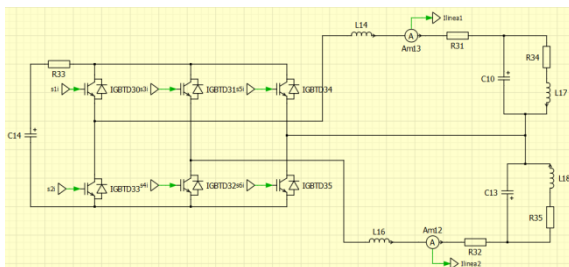


Figura 6. Convertidor DC-AC con carga monofásica

Para el capacitor que está en paralelo con la carga a una frecuencia de conmutación f_{com} se lo calcula con la fórmula 13; la cual es para frecuencias resonantes [5].

$$C = \frac{1}{L(2\pi f)^2} \quad (14)$$

Para calcular el voltaje de enlace DC de baja tensión se aplica la ley de voltajes de Kirchhoff con una carga cuyo factor de potencia es 0.8; luego se aplica la fórmula 5. El compensador se lo calcula por medio del método de polos resonantes con la amortiguación igual cero.

3. Dimensionamiento de componentes del SST

Para la entrada del transformador se tiene un voltaje nominal de línea a neutro de 7620V. Se alimenta una carga monofásica de 300KVA. Además el voltaje monofásico de la carga será de 220 voltios rms; repartido en dos circuitos.

3.1. Dimensionamiento del rectificador ac-dc

De acuerdo a ecuación 5 con un índice de modulación de 0.85 el voltaje DC es 12678 V. aplicando la ecuación 6 el voltaje de enlace DC es 6339 V. debido a que es una red trifásica cada línea aporta con 100 KVA y una corriente de 13.12 A.

La inductancia calculada con una variación de corriente del 3% y la integral del voltaje del inductor simulada de 0.08; lo cual resulta 203.25 mH. El ángulo Δ entre la red y el convertidor de acuerdo a la ecuación 7 es $\Delta = 7.555^\circ$. El capacitor de acuerdo a la ecuación 3, la integral de corriente simulada de 0.02229 y el 3% del voltaje de enlace de alta es 117.34 uF. La figura 7 muestra los resultados de la simulación en el capacitor de enlace de alto voltaje.

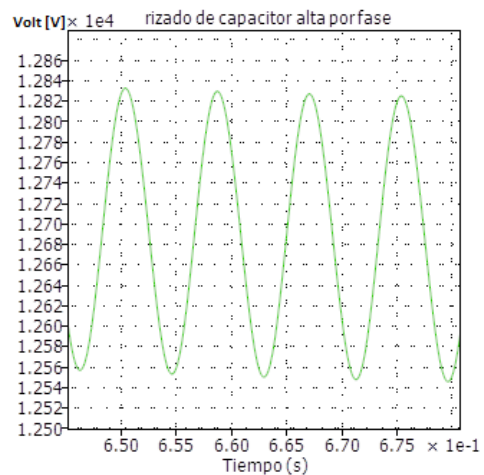


Figura 7. Voltaje de rizado de capacitor

3.2. Dimensionamiento del DAB

El inductor del DAB se lo calcula con la ecuación 8 y es 3.1 mH. Con un desfase $\varphi = 35^\circ$. El voltaje de enlace de baja tensión es 485 V. el cálculo de la relación de vueltas para el transformador de alta frecuencia es:

$$\frac{N1}{N2} = \frac{6339}{485} = 13 \quad (15)$$

De donde N1, N2 son el número de vueltas del lado de alta y baja tensión de enlace respectivamente.

3.1. Dimensionamiento del convertidor dc-ac

Para calcular el inductor se coloca una fuente AC de 311.13 V. que es el voltaje pico de la carga. Simulando se tiene en la integral 0.00389236. Con el 3% de la corriente de carga calculada se tiene de la ecuación 1 una inductancia de 95.191 uH. El cálculo del capacitor paralelo a la carga está dado por la ecuación 14 y se tiene 66.52 uF. La ecuación 3 da el capacitor de enlace de baja tensión que tiene la integral igual 0.0107909 y el 3% del voltaje de baja tensión; entonces se calcula 741.64 uF. La figura 8 muestra la simulación con los valores calculados.

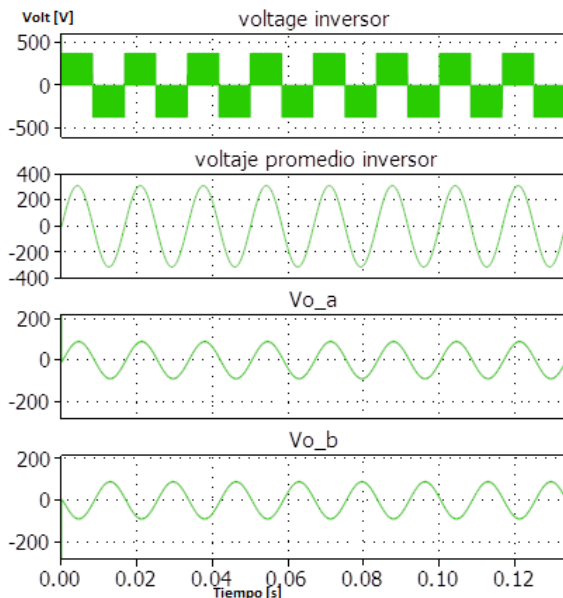


Figura 8. Voltajes del inversor DC-AC y carga

4. Diseño y modelo del controlador del SST

Una vez que hemos encontrado los diferentes elementos de las etapas del transformador tenemos que diseñar el controlador del mismo; la figura 9 muestra el esquema a seguir en la simulación.

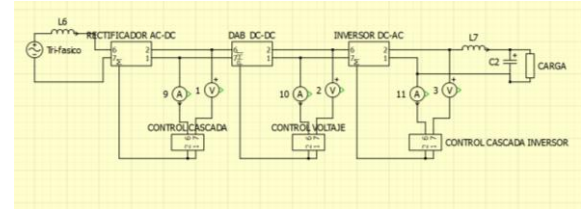


Figura 9. Transformador de estado sólido con su respectivo controlador

4.1. Diseño del controlador ac-dc.

Aplicando la ley de voltajes de Kirchoff, la transformada de Laplace con los elementos calculados se tiene la función de corriente:

$$\frac{I(s)}{m} = -\frac{2*Valta}{R+Ls} = -\frac{12678}{0.2032s+1} \quad (16)$$

La función de voltaje es:

$$\frac{E(s)}{Ired(s)} = \frac{Vred_{pk}}{s} = \frac{1.078*10^4}{s} \quad (17)$$

Haciendo uso del método del factor K se calculan los respectivos compensadores; el compensador de corriente con ancho de banda de 2 KHz y margen de fase de 60° :

$$Cc = -\frac{0.2015s+678.9}{2.134*10^{-5}*s^2+s} \quad (18)$$

El compensador de voltaje con un ancho de banda de 12 Hz es:

$$Cv = -\frac{0.006997s+0.1414}{0.003554s^2+s} \quad (19)$$

Simulando en la figura 10 el circuito con los compensadores.

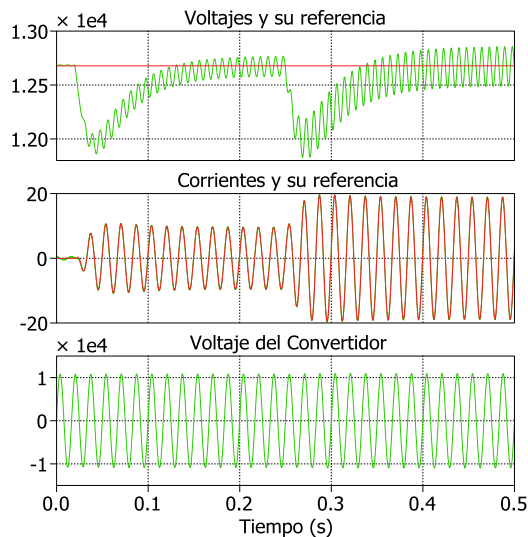


Figura 10. Voltajes y corriente del convertidor

4.2. Diseño del controlador DAB

Aplicando el criterio del factor K con margen de fase de 60° y 1 KHz de ancho de banda

$$G = \frac{Valta^2}{2\pi fLdab*s} = \frac{0.03092s+26.03}{8.529e-5*s^2+s} \quad (20)$$

En la figura 11 se muestra la simulación:

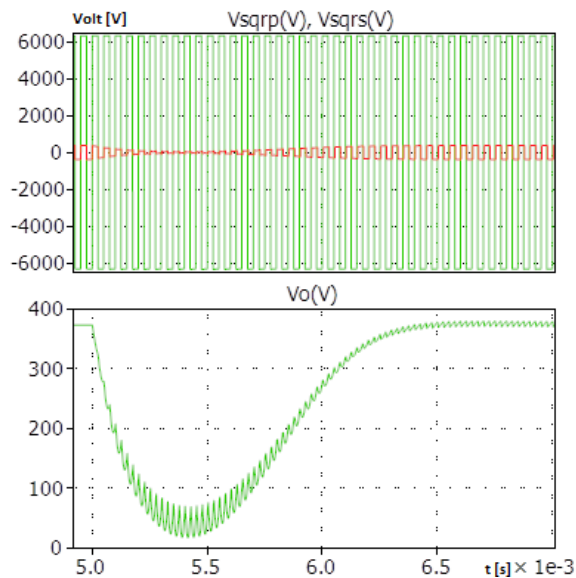


Figura 11. Voltajes del DAB y enlace de baja

4.3. Diseño del controlador dc-ac

El compensador de corriente con ancho de banda de 2 KHz, margen de fase 60° y aplicando el factor K:

$$Gci_inver = \frac{0.00244s+10.46}{2.716*10^{-5}s^2+s} \quad (21)$$

El compensador de voltaje es calculado por el método de polo resonante:

$$Ginv = \frac{4.558e-6s^3+0.002442s^2+0.4335s+25.5}{2.5e-5s^3+s} \quad (22)$$

La figura 12 presenta la simulación de los compensadores.

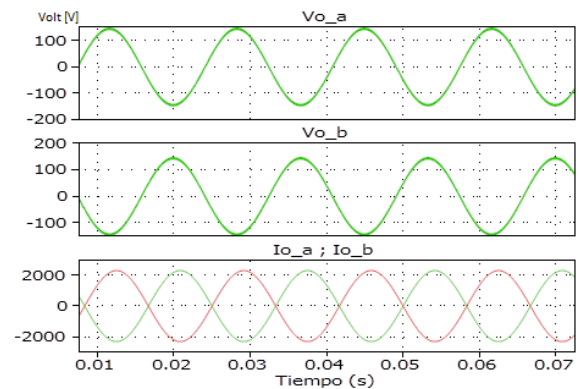


Figura 12. Voltajes y corrientes de carga

5. Transformador de Estado Sólido: Simulación en PLECS

El SST debe someterse a las siguientes pruebas: funcionamiento al 50% y 100% de su capacidad nominal, perturbación en la red llamados SAGs y SWELLS, conexión de una fuente o carga en el enlace DC de baja y operación con carga de 0.8 de factor de potencia.

5.1. Operación al 50% y 100% de la carga nominal

La figura 13 muestra los voltajes y corrientes de la red; así como los voltajes DC de cada bloque de alta y el enlace de baja.

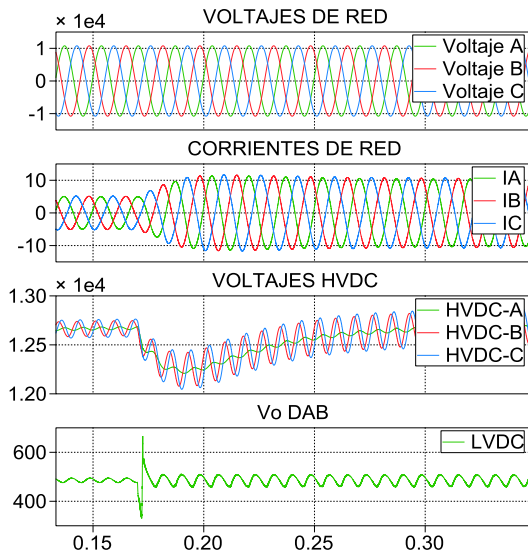


Figura 13. SST al 50% y 100% de carga nominal

En la figura 14 se muestra los voltajes y corrientes de carga; así como potencias y factor de potencia.

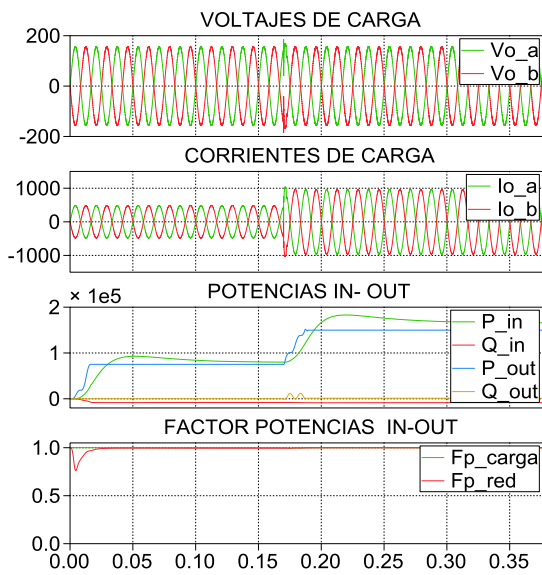


Figura 14. SST al 50% y 100% de carga nominal

5.2. Perturbaciones en la red: Sag's y Swell's

La figura 15 muestra Sag del 20% del voltaje de la red con un tiempo de duración de 0.04 s.

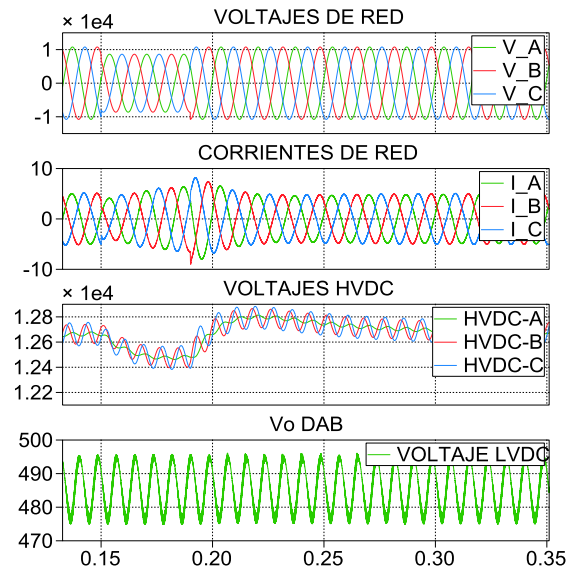


Figura 15. SST aplicando Sag's

La figura 16 muestra los voltajes y corrientes de carga; así como potencias y factor de potencia.

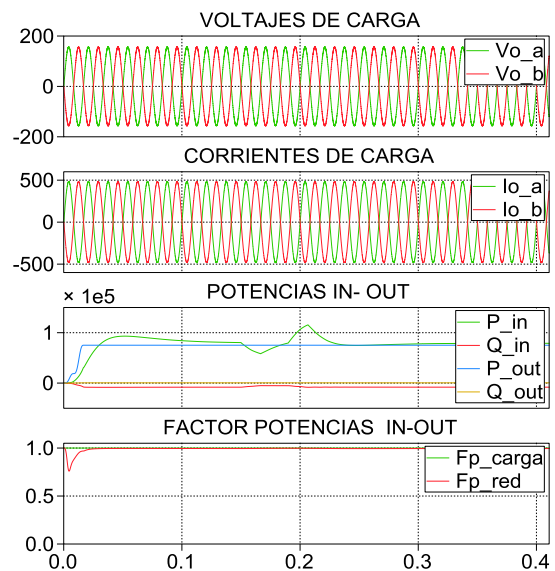


Figura 16. SST aplicando Sag's

La figura 17 muestra swell's del 15% del voltaje de la red y su tiempo de duración es 0.07s.

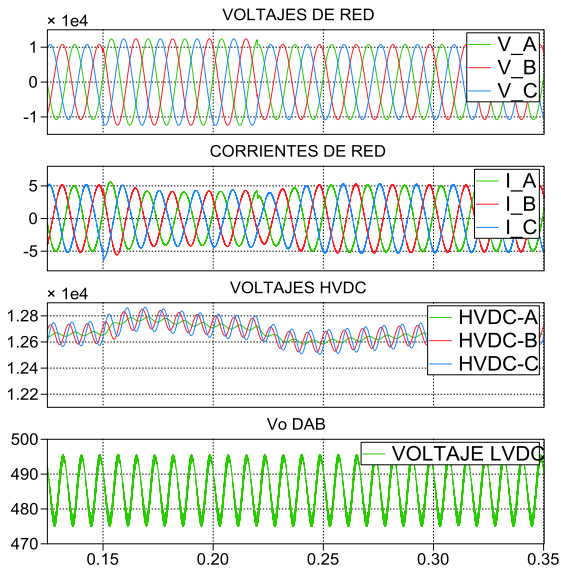


Figura 17. SST aplicando Swell's

La figura 18 muestra los voltajes y corrientes de carga; así como potencias y factor de potencia cuando se aplica al SST perturbaciones de este tipo.

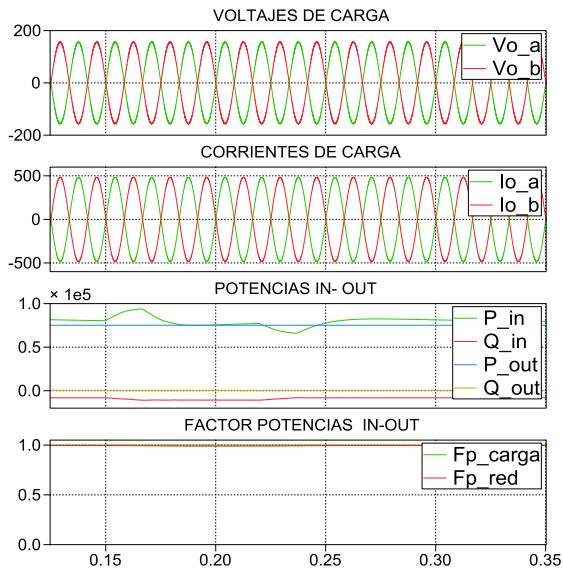


Figura 18. SST aplicando Swell's

5.3. Aplicación del SST en generación distribuida

En la figura 19 se muestra una fuente externa de 50Kw y después se aplica una carga externa.

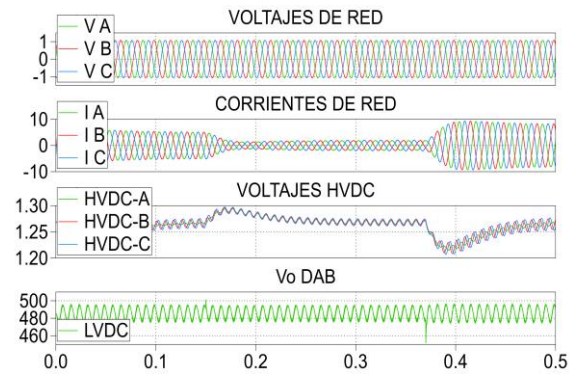


Figura 19. SST con cargas y fuentes externas

Los voltajes y corrientes de carga así como las potencias de entrada y salida del transformador además de la potencia de la generación distribuida con la carga externa se lo aprecian en el grafico 20.

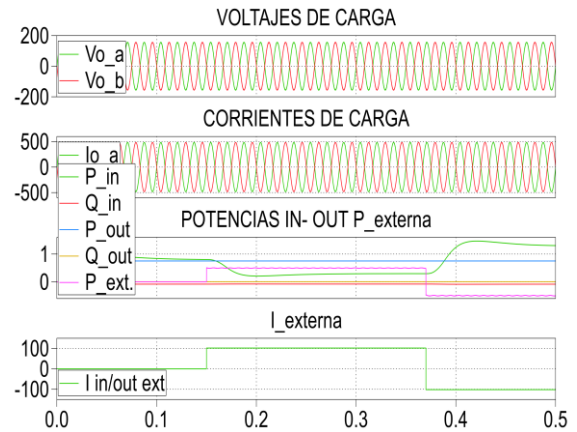


Figura 20. SST con cargas y fuentes externas

5.4. Operación del SST con bajo factor de potencia

Para esta prueba se ha colocado una carga cuyo factor de potencia es 0.8; ver figura 21.

La figura 22 muestra los voltajes y corrientes de la red.

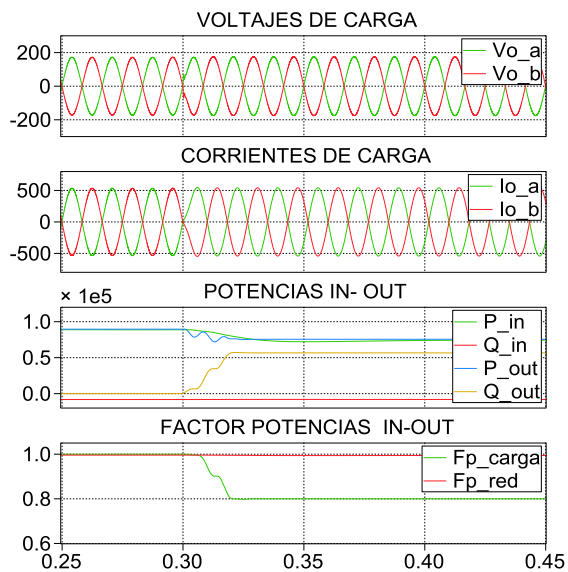


Figura 21. SST con carga de $F_p=0.8$

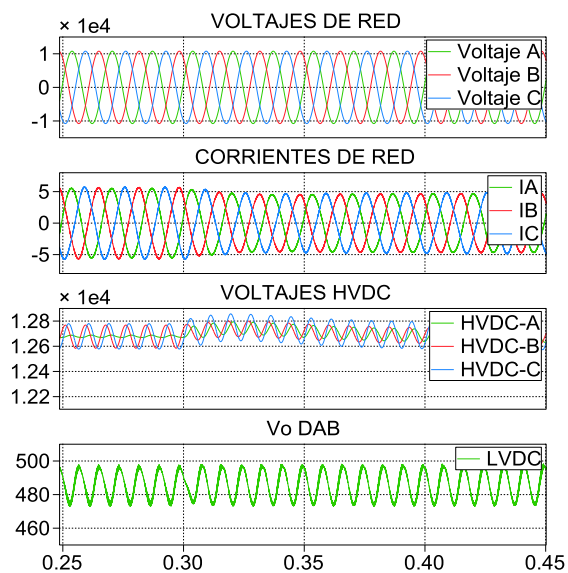


Figura 22. SST con carga de $F_p=0.8$

CONCLUSIONES

El dimensionamiento tanto de capacitores como de inductores cumplen las especificaciones técnicas del transformador de estado sólido.

Otro punto importante a mencionar es el diseño de los controladores ya que se obtienen las respuestas requeridas para cada una de las pruebas realizadas.

En las pruebas realizadas se puede apreciar que si la perturbación en la red sean SAG's o SWELL's con el 20% y 15% del voltaje de la red respectivamente;

el voltaje y la corriente de la carga no se ven afectadas cumpliendo el principio de calidad de energía.

Se demuestra que podemos conectar en el enlace de bajo voltaje una red distribuida que inyecte al transformador potencia o de igual manera una carga externa que requiera potencia; en ambos casos voltaje y corriente de carga del transformador no se ven afectadas.

Cuando se coloca una carga con un bajo factor de potencia el voltaje de red no es afectado cumpliendo el principio de aislamiento que todo transformador debe cumplir.

RECOMENDACIONES

Es importante tener en cuenta antes de efectuar los cálculos que se entienda la parte teórica del funcionamiento tanto de los controladores como la topología por aplicar.

Un especial estudio merece la parte de los anchos de banda ya que se podrían traslapar con las frecuencias de resonancia.

14. Referencias

- [1] Ayyamar Raja, Mao Xiaolin, Falcones Sixifo "Topology comparison for solid state transformer implementation", material de clase febrero 2013.
- [2] Seymour Joseph, Horsley Terry, "Los siete tipos de problemas en el suministro eléctrico", fecha de consulta abril 2013.
- [3] Solano Alfaro Alvaro, Transverter, "www.tranverter.com", fecha de consulta abril 2013.
- [4] Falcones Sixifo, "SST Papers", material de clase, febrero 2013.
- [5] Edminister Joseph, "Circuitos Eléctricos", Serie Schaum editorial Mc Graw Hill primera edición, 1965.
- [6] Ayyanar Raja, "Lecture 11 K-factor approach", material de clase, mayo 2013.