

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

Richard Flores<sup>(1)</sup>, Fernando Vaca<sup>(2)</sup>, Sífifo Falcones<sup>(3)</sup>  
Facultad de Ingeniería en Electricidad y Computación<sup>(1)(2)(3)</sup>  
Escuela Superior Politécnica del Litoral (ESPOL)  
Campus Gustavo Galindo, Km 30.5 vía Perimetral  
Apartado 09-01-5863. Guayaquil-Ecuador  
ricdfloor@espol.edu.ec<sup>(1)</sup>, fearvaca@espol.edu.ec<sup>(2)</sup>, sixifo@espol.edu.ec<sup>(3)</sup>

## Resumen

*El proyecto consiste en el diseño y simulación del control de un transformador de estado sólido (SST) usando una topología de tres etapas basado en un convertidor AC-DC multinivel de puentes en cascada, un convertidor DC-DC de doble puente activo y un convertidor DC-AC. El transformador de estado sólido es un dispositivo que además de realizar las mismas funciones de un transformador común, mejora la calidad de la energía y permite la integración de fuentes de energías renovables. Además de los convertidores, el SST está compuesto de filtros capacitivos, inductivos y capacitores de enlaces. Los filtros permiten mantener los rizados de corriente y voltaje en valores deseados, además permiten filtrar armónicos de voltaje y corriente. Para un buen funcionamiento del transformador de estado sólido es importante controlar las señales de corriente y voltaje por cada una de las etapas. En este documento se muestra el diagrama de bloques de control (diagrama de bloques lazo cerrado) de cada etapa. Para comprobar el correcto funcionamiento, el SST es diseñado y simulado en SIMULINK de MATLAB utilizando la librería PLECS. Se realizan pruebas simulando sag y swell en el voltaje de entrada del SST, pruebas con cargas que generan armónicos y cargas con un bajo factor de potencia; además se realiza la simulación de conexión de una fuente de generación al enlace DC de baja del SST.*

**Palabras Claves:** Red inteligente, calidad de la energía, convertidores estáticos.

## Abstract

*The Project is about the control design and simulation of a solid state transformer (SST) with a three-stage topology based on an AC-DC multilevel converter based on cascaded bridges DC-DC converter dual active bridge and a DC-AC converter. The solid state transformer is a device that also have the same functionality of a regular transformer improving power quality and allows the integration of renewable energy sources. In addition to the converters, the SST is composed of capacitive, inductive filters and capacitors links. Filters allow you to keep the ripple current and voltage at desired values. For proper operation of the solid-state transformer is important to control the current and voltage signals for each of the stages. This paper shows the control block diagram of each stage. To verify proper operation, the SST is designed and simulated using MATLAB SIMULINK and additional library PLECS. Tests are performed simulating sag and swell in the SST input voltage, testing with load that inject harmonics and loads with low power factor, we perform a simulation of a power source connection to the link low SST DC.*

**Keywords:** Smart grid, power quality, static converters.

## 1. Introducción

El término de red inteligente ha sido introducido como una mejora de los sistemas eléctricos de potencia haciendo de estos más eficientes y menos vulnerables

a disturbios que en él se puedan presentar. Por medio de redes inteligentes es posible mejorar la calidad de la energía que se entrega a los consumidores; integrar dispositivos de almacenamiento y fuentes de energías renovables; además de implementar una red de

comunicación entre los elementos que conforman la red inteligente.

El transformador de estado sólido (SST) es un elemento primordial dentro de la red inteligente, este es capaz de solventar los problemas de calidad de la energía, además ofrece puertos para integrar fuentes de energía renovable y dispositivos de almacenamiento de energía.

## 2. Proyecto propuesto

En este proyecto se propone diseñar un transformador de estado sólido, compuesto de interruptores controlados, convertidores estáticos, filtros inductivos y capacitivos.

El SST a diseñar consta de tres etapas con entrada y salida trifásica, tal como se observa en la Figura 1, esta topología permite un flujo de potencia bidireccional, tener un mejor control de voltaje y corriente de salida, además provee de algunas funcionalidades al SST [1].

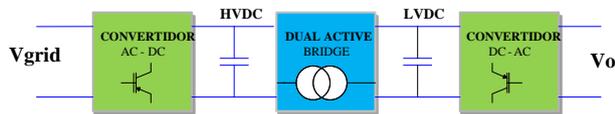


Figura 1. Diagrama de bloques del SST

## 3. Red eléctrica inteligente

La red eléctrica consiste en el control, automatización y monitoreo de todo el sistema eléctrico de potencia para hacer de este más fiable y eficiente. La red eléctrica inteligente se basa en el uso de sensores, actuadores como el transformador de estado sólido, controladores, además posee una red de comunicación entre los elementos que conforman la red, los consumidores y la empresa eléctrica [2]. La Figura 2 muestra un esquema gráfico de una red inteligente.

Beneficios de la red eléctrica inteligente [3]:  
 Integración de fuentes de energías renovables y dispositivos de almacenamiento de energía.  
 Tener un mejor control de la demanda.  
 Automatización de operación del sistema eléctrico.  
 Mejorar la calidad de la energía.

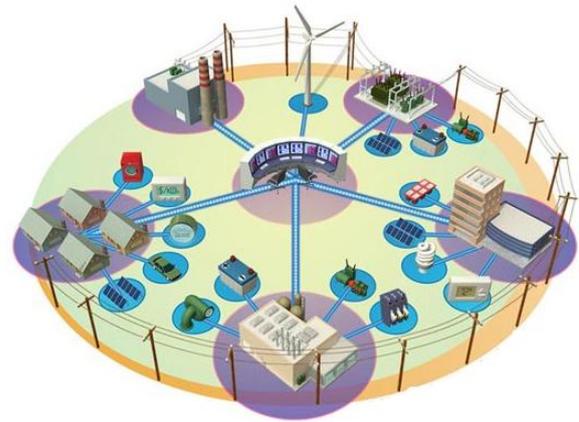


Figura 2. Red eléctrica inteligente. Fuente: [4].

## 4. Transformador de estado sólido

El transformador de estado sólido se compone de semiconductores de potencia, al igual que un transformador común, permite elevar o reducir el voltaje.

### Características

Permite un control bidireccional del flujo de potencia [5], como se observa en la Figura 3.

El SST permite la integración de fuentes de energía distribuida, dispositivos de almacenamiento de energía y cargas inteligentes.

Por medio del SST es posible la implementación de una red de comunicación en donde los elementos de este sistema pueden interactuar entre sí [5].

Permite aislar el lado de alta tensión con el lado de baja tensión; problemas debido a un bajo factor de potencia en la carga, además de los armónicos no son reflejados hacia la red [5].

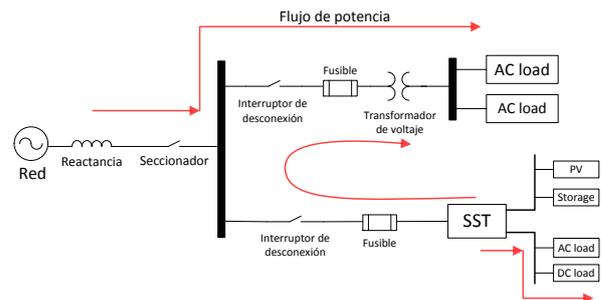


Figura 3. Flujo de potencia a través del SST.

## 5. Topología del SST

La topología del SST que se va a dimensionar consta de tres etapas: Rectificador PWM multinivel por cada fase + Convertidor DC-DC (DAB) + Inversor trifásico. Esta topología se muestra en la Figura 4.

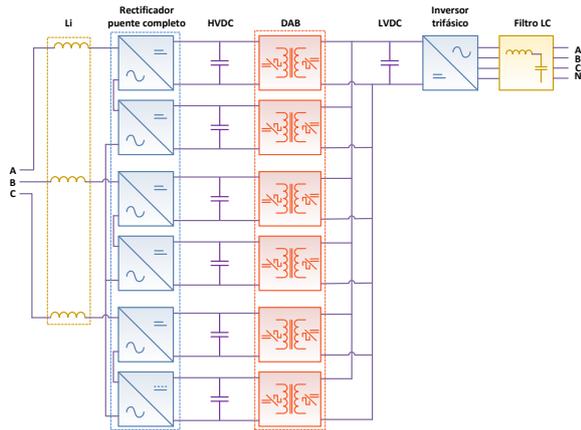


Figura 4. Topología del SST

### 5.1. Convertidores del SST

Estos convertidores están compuestos por semiconductores de potencia que son utilizados para convertir la potencia eléctrica de AC a DC o viceversa.

#### Convertidor multinivel AC-DC

Convierte la energía AC que proviene de la red en energía DC, son utilizados en aplicaciones de alta potencia [6], con este tipo de convertidor se reduce el voltaje que deben soportar los interruptores controlados. Los convertidores multinivel generan una onda alterna de varios niveles dependiendo su configuración, mientras mayor sea el número de niveles menor es la distorsión armónica de la señal de voltaje [7]. La Figura 5 muestra el esquema del convertidor multinivel.

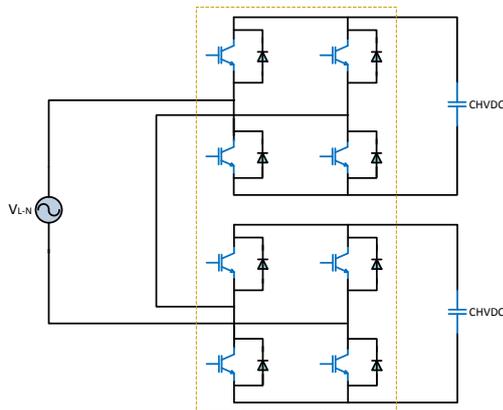


Figura 5. Convertidor multinivel en cascada

#### Convertidor de doble puente activo (DAB)

Estos tipos de convertidores permiten un flujo de potencia bidireccional entre dos fuentes de voltajes DC, de igual o diferente nivel de voltaje [8]. Este convertidor incluye un transformador de alta frecuencia el cual se encarga de reducir o aumentar el nivel de voltaje, tal como se observa en la

Figura 6.

El intercambio de potencia en el DAB se lo puede controlar mediante la técnica de modulación de desplazamiento de fase.

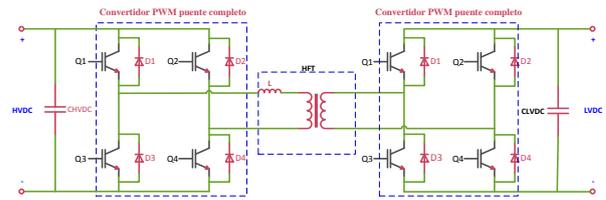


Figura 6. Esquema del DAB

#### Convertidor DC-AC

El objetivo principal de este convertidor, conocido también como inversor, es convertir un voltaje DC a un voltaje AC con magnitud y frecuencia variable. Se utiliza la técnica de modulación SPWM para obtener los disparos de los interruptores controlados. La Figura 7 muestra el esquema de un inversor trifásico.

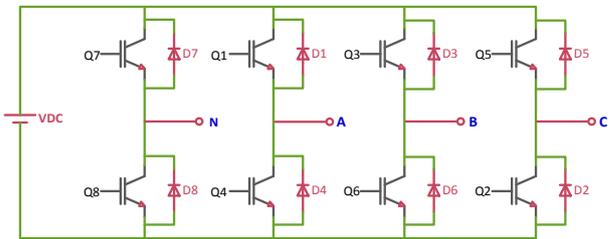


Figura 7. Esquema de un inversor trifásico

## 6. Dimensionamiento de los elementos del SST

Para el dimensionamiento de estos elementos se ha considerado los siguientes valores nominales, que se observan en la Tabla 1.

Tabla 1. Valores nominales del SST

Valores nominales del SST	
Voltaje de entrada línea-línea	13.8 kV
Voltaje de salida línea-línea	440 V
Carga nominal	800 kVA
Índice de modulación de voltaje de cada convertidor	0.85
Frecuencia de conmutación	20 Khz

### 6.1. Dimensionamiento del voltaje del enlace de alta

La topología del SST a utilizar, consta de 6 capacitores de enlaces de alta, los cuales poseen el mismo valor de voltaje DC (HVDC). La ecuación que

se utiliza para encontrar el voltaje DC de uno de los enlaces de alta es la siguiente:

$$m_v = \frac{V_{grid-pico}}{V_{DC(total)}}, \quad (1)$$

en donde:

$V_{grid-pico}$ : es el voltaje de fase pico (voltaje pico de la red) de entrada del SST.

$V_{DC(total)}$ : es 2 veces el voltaje del enlace de alta (HVDC).

El voltaje de uno de los enlaces de alta es: 6628.03 V

## 6.2. Dimensionamiento del inductor del filtro de entrada

Para el dimensionamiento de este inductor se utiliza la siguiente ecuación:

$$\Delta i_L = \frac{1}{L} \int V_L dt, \quad (2)$$

en donde:

$\int V_L dt$ : representa el área mayor bajo la curva del voltaje del inductor.

$\Delta i_L$ : es el máximo rizado pico-pico de la corriente a través del inductor.

La integral  $\int V_L dt$  es hallada gráficamente al integrar la curva del voltaje a través del inductor. El porcentaje de rizado de la corriente es el 3% de la corriente nominal.

El valor del inductor del filtro de entrada es 41.89 mH.

## 6.3. Dimensionamiento del capacitor del enlace de alta

Para el dimensionamiento del capacitor se utiliza la siguiente ecuación:

$$\Delta V = \frac{1}{C} \int i_C dt, \quad (3)$$

en donde:

$\int i_C dt$ : representa el área mayor bajo la curva de la corriente del capacitor.

$\Delta V$ : es el máximo rizado pico-pico del voltaje a través del capacitor.

La integral  $\int i_C dt$  es hallada gráficamente al integrar la curva de la corriente a través del capacitor. El porcentaje de rizado del voltaje es el 3% del voltaje del enlace de alta.

El valor del capacitor del enlace de alta es de 310.45 uF.

## 6.4. Dimensionamiento de los elementos del convertidor de doble puente activo

Lo que se requiere dimensionar son el inductor y la relación de vueltas del transformador de alta frecuencia.

**6.4.1. Dimensionamiento del inductor.** Para esto se utiliza la siguiente ecuación:

$$P_{DAB} = \frac{HVDC \times LVDC'}{2\pi \times f_s \times L_{DAB}} \phi \left(1 - \frac{|\phi|}{\pi}\right), \quad (4)$$

La potencia del DAB se la obtiene dividiendo la potencia total trifásica para seis, que es el número total de convertidores DC-DC que tiene el SST.

El valor del inductor es: 1.29 mH.

**6.4.2. Dimensionamiento del transformador de alta frecuencia.** Este transformador es un elemento importante del SST, es usado para disminuir el voltaje del enlace de alta y proporcionar un voltaje adecuado para el enlace de baja.

El voltaje de alta de este transformador es de 6628.03 V, el voltaje de baja es de 1144.28 V. La relación de vueltas del transformador se la obtiene mediante la siguiente ecuación:

$$a = \frac{6628.03 V}{1144.28 V} = 5.79:1, \quad (5)$$

## 6.5. Dimensionamiento del voltaje del enlace de baja

La ecuación que se utiliza para encontrar el voltaje del enlace de alta es la siguiente:

$$m_v = \frac{V_{o(L-L)} \times \sqrt{2} \times 2}{\sqrt{3} \times V_{DC}}, \quad (6)$$

en donde:

$V_{o(L-L)}$ : es el voltaje línea-línea de salida del convertidor DC-AC.

$V_{DC}$ : es voltaje del enlace de baja (LVDC).

$m_v$ : índice de modulación de amplitud del voltaje (0.85)

Para calcular el voltaje a la salida del convertidor DC-AC se debe considerar el voltaje nominal de la carga (440 V) y la caída de voltaje ocasionada por el inductor de filtro LC.

## 6.6. Dimensionamiento del capacitor del enlace de baja

Para dimensionar este capacitor se utiliza la ecuación (3). El porcentaje de rizado es el 3% del voltaje del enlace de baja.

El valor del capacitor es de 585.20 uF.

## 7. Control del SST

Para cumplir con las características del SST antes mencionadas, se requiere de un control de señales de voltaje y corriente. En cada etapa se mide y controla

variables como voltaje de los capacitores y corrientes en los inductores .

Los controladores son hallados mediante el método del K-factor.

En la Figura 8 se muestra de manera general los controladores de cada etapa.

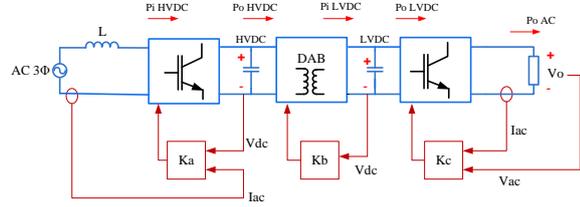


Figura 8. Esquema del control del SST

### 7.1. Control de la etapa AC-DC

El control de este convertidor es un control en cascada formado por un control externo de energía (con lo cual se controla indirectamente el voltaje) y un control interno de corriente de entrada del SST, la energía que se controla es la de los capacitores de alta. La Figura 9 muestra el diagrama de bloques en lazo cerrado de la etapa AC-DC.

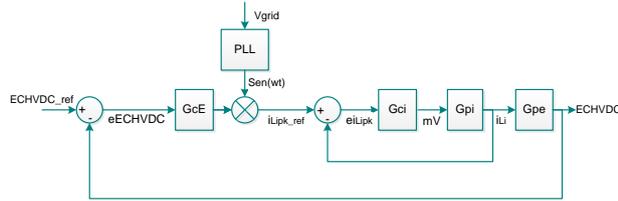


Figura 9. Control de la etapa AC-DC

La ganancia de la planta de corriente está dada por la siguiente expresión:

$$G_{pi}(s) = \frac{i_{Li}(s)}{m} = -\frac{V_{DC(total)}}{R_i + sL_i} \quad (7)$$

La ganancia de la planta de energía (voltaje) está dada por la siguiente expresión:

$$G_{pv}(s) = \frac{E_{CHVDC}}{i_{L_i}} = \frac{1}{2s} V_{grid} \quad (8)$$

El controlador es hallado utilizando el método del k-factor a cada una de las funciones de transferencia. La ganancia del controlador de corriente con un ancho de banda de 10 kHz:

$$G_{ci}(s) = \frac{45800.24}{s} \left( \frac{s + 16894.53}{s + 233675.79} \right)$$

La ganancia del controlador de energía (voltaje) con un ancho de banda de 12 Hz es:

$$G_{cv}(s) = \frac{3.75 (s + 20.20)}{s (s + 281.39)}$$

### 7.2. Control de la etapa DC-DC

En esta etapa se pretende controlar la energía del capacitor del enlace de baja mediante el ángulo de desfase entre los voltajes primario y secundario del transformador de alta frecuencia. La Figura 10 muestra el diagrama de bloques del control.

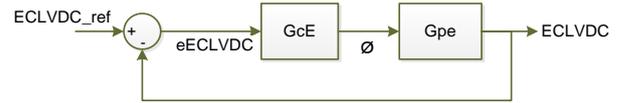


Figura 10. Control etapa DC-DC

La ganancia de la planta de energía (voltaje) está dada por la siguiente expresión:

$$G_p(s) = \frac{1}{s} \cdot \frac{V_{HVDC}^2}{2 \pi f_s L_{DAB}} \quad (9)$$

El controlador de esta etapa es hallado utilizando el método del k-factor. La ganancia del controlador de energía con un ancho de banda de 500 Hz.

$$G_c(s) = \frac{136.4722335 (s + 841.798)}{s (s + 11755.8)}$$

### 7.3. Control de la etapa DC-AC

El control que se realiza en este convertidor es un control en cascada, con un lazo interno de corriente y uno externo de voltaje. En este control se aplica la transformada de Park, para llevar de un sistema 'abc' a un sistema 'dq' con lo cual se obtienen señales constantes en el tiempo que para efectos de control son fáciles de analizar. La Figura 11 muestra el diagrama de bloques del control en el eje d y en el eje q.

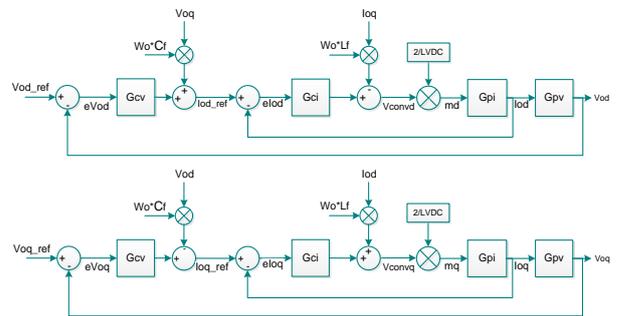


Figura 11. Control etapa DC-AC

La ganancia de la planta de corriente está dada por la siguiente expresión:

$$G_{pi}(s) = \frac{i_{Lfd}(s)}{v_{convd}(s)} = \frac{1}{L_f s + R_f} \quad (10)$$

La ganancia de la planta de voltaje está dada por la siguiente expresión:

$$G_{pv}(s) = \frac{V_o d(s)}{i_{Lfd}(s)} = \left( \frac{Z_o}{1 + Z_o C_f s} \right) \quad (11)$$

La ganancia del controlador de corriente:

$$G_{ci}(s) = \frac{2617.28 (s + 423.83)}{s (s + 5821.63)}$$

La ganancia del controlador de voltaje:

$$G_{cv}(s) = \frac{794.33}{s}$$

## 8. Resultado de las simulaciones

El SST de tres etapas ha sido implementado en Simulink con ayuda de la librería Plecs, tal como se ve en la Figura 12.

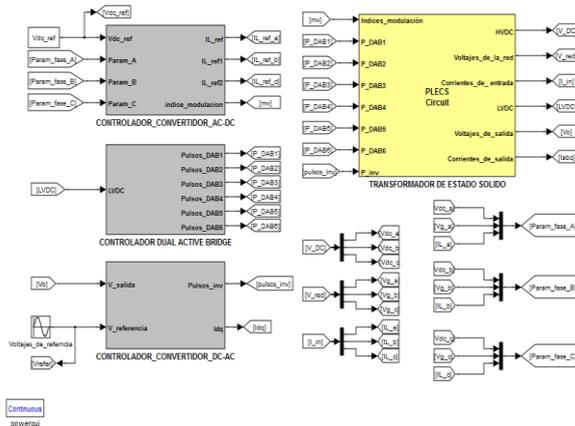


Figura 12. Modelo del SST en Simulink

### 8.1. Simulación de un sag del 30% con una carga resistiva inductiva

En la Figura 13 se observa que a pesar de que el voltaje de la red disminuye, tanto la corriente como el voltaje en el lado de la carga no se ven afectados, es decir mantienen su valor nominal. Durante el tiempo que dura el sag, la corriente de entrada se incrementa. Este incremento de la corriente se debe a que el control del SST mantiene la potencia de salida constante, tal como se observa en la Figura 14.

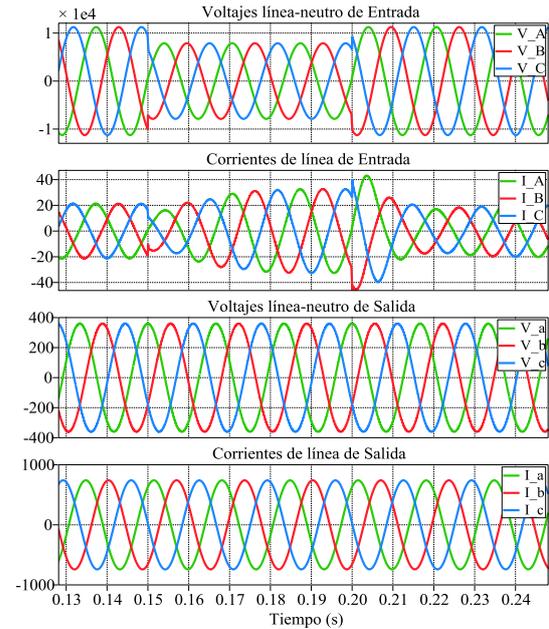


Figura 13. Simulación (voltajes y corrientes de entrada y salida del SST)

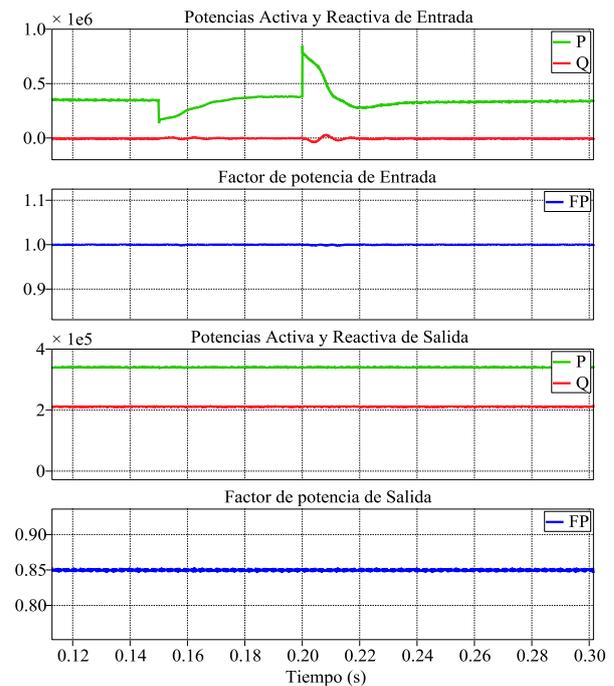


Figura 14. Simulación (potencias y factor de potencia de entrada y salida)

### 8.2. Simulación de un swell del 15% con una carga resistiva inductiva

En la Figura 15 se observa el swell que ocurre en el voltaje de entrada durante un periodo de tiempo, a pesar de esta variación, tanto los voltajes y las corrientes de salida mantienen sus valores nominales. Durante el tiempo que dura el swell, la corriente de entrada disminuye. Esto se debe a que el control del

SST trata de mantener la potencia de salida constante. La Figura 16, muestra las gráficas de potencia y factor de potencia de entrada y salida

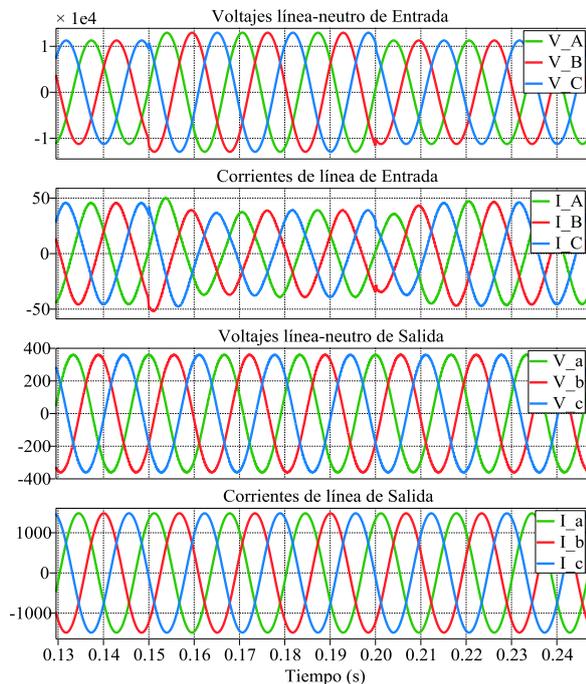


Figura 15. Simulación (voltajes y corrientes de entrada y salida del SST)

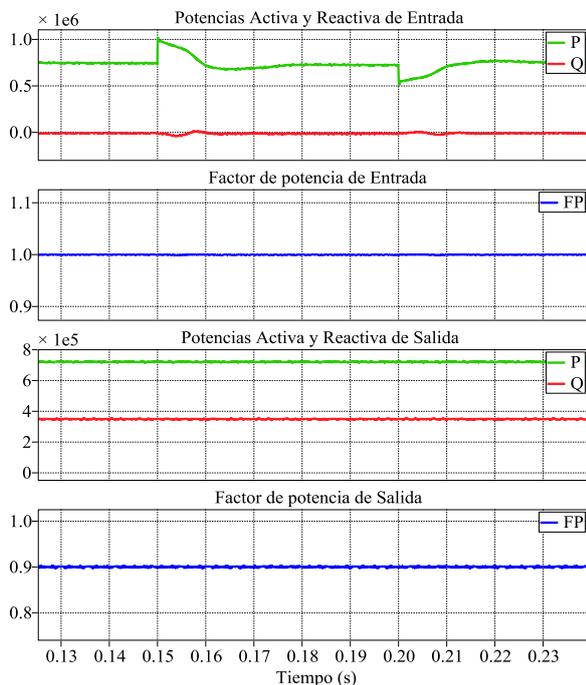


Figura 16. Simulación (potencias y factor de potencia de entrada y salida)

### 8.3. Simulación de armónicos a la salida del SST generados por una carga no lineal

Los armónicos de corriente que produce la carga no lineal se muestran en la Figura 17.

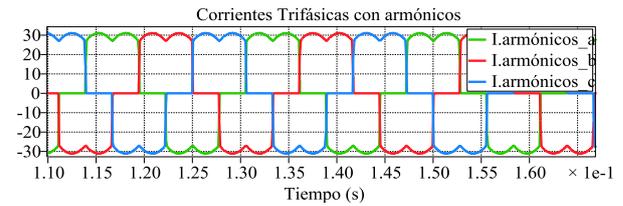


Figura 17. Corriente con armónicos que se inyectan a la salida del SST

En la Figura 18 se observa que el SST no refleja los problemas que ocurren en el lado de la carga hacia la red, es decir las formas de onda tanto de corriente como de voltaje en la entrada son sinusoidales y no presentan distorsión alguna.

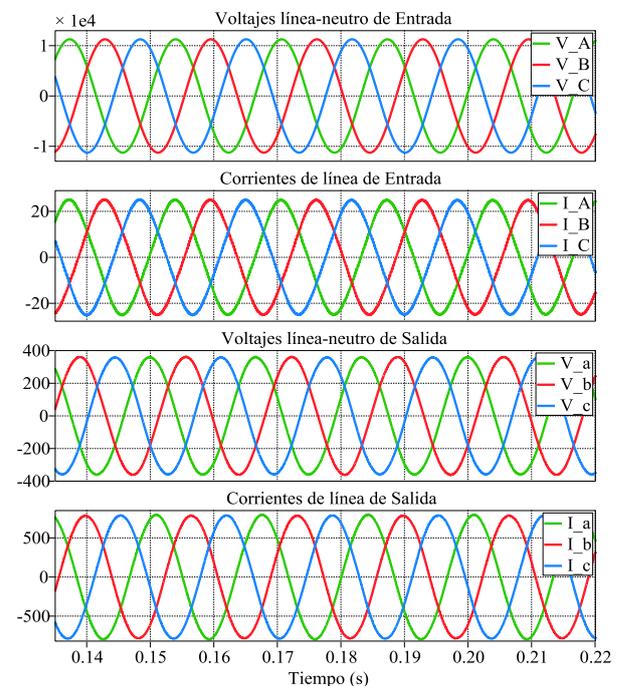


Figura 18. Simulación (voltajes y corrientes de entrada y salida del SST)

### 8.4. Simulación de fuentes de generación y cargas conectadas en el enlace DC de baja

Inicialmente se conecta una carga de 50% de la nominal, después de un determinado tiempo la carga aumenta al 100%.

En la simulación de la Figura 19, se observa que en el momento en que la fuente de generación que se conecta en el enlace DC empieza a entregar potencia, la potencia de entrada que proviene de la red disminuye hasta llegar a un valor negativo, esto significa que la fuente de generación que se conecta en el enlace DC está entregando potencia tanto a la carga, como a la red. Después de un tiempo la carga conectada al SST aumenta su valor, con lo cual hay

mayor consumo de potencia por parte de la carga, esto ocasiona que la red empiece a entregar potencia hacia la carga debido a que la potencia que se inyecta desde el enlace DC de baja, no es suficiente para cubrir la demanda de la carga. Además se simula que en un momento dado se desconecta la generación y en lugar de esta se conecta una carga DC en el enlace de baja, esto ocasiona que la potencia de entrada se incremente para cubrir las potencias que demandan la carga AC y DC.

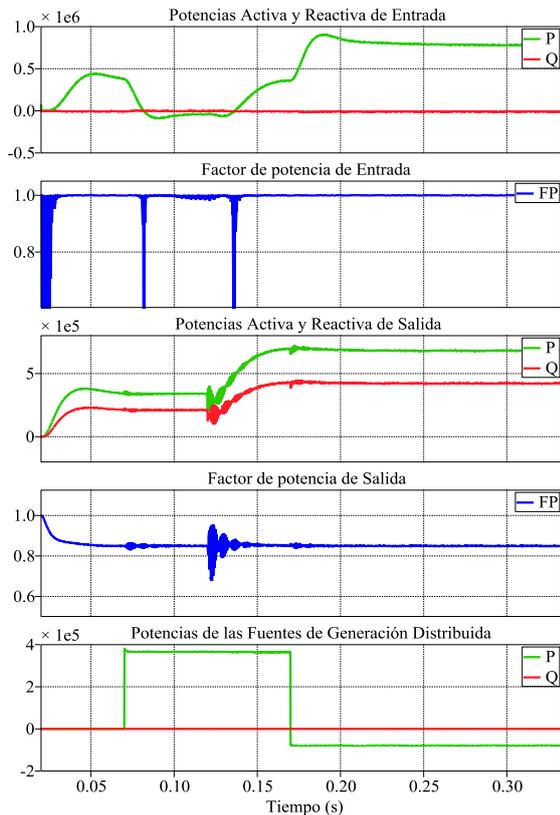


Figura 19. Simulación (potencias y factor de potencia de entrada y salida)

Es importante analizar lo que ocurre tanto en el voltaje como en la corriente durante los cambios de dirección de flujo de potencia ocasionados por la fuente de generación distribuida como por el aumento de carga en el lado DC y AC del SST, esto se muestra en la Figura 20 en la cual la corriente demandada de la red por parte del SST es aproximadamente cero mientras está conectada la fuente de generación distribuida, luego la carga aumenta su valor en el lado AC y además se conecta carga en el enlace DC, por lo que la corriente demandada de la red aumenta hasta su valor nominal.

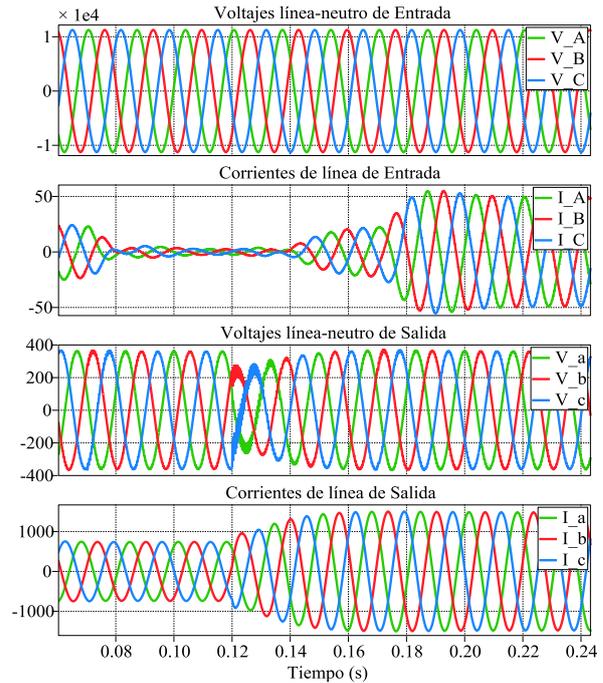
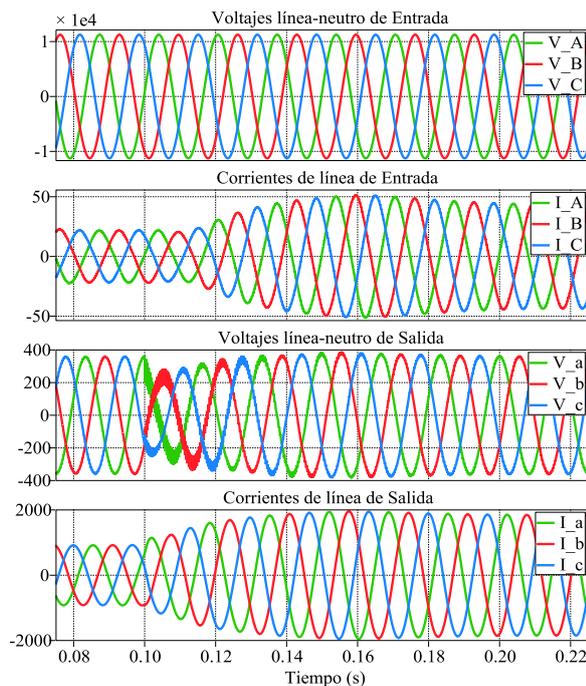


Figura 20. Simulación (voltajes y corrientes de entrada y salida del SST)

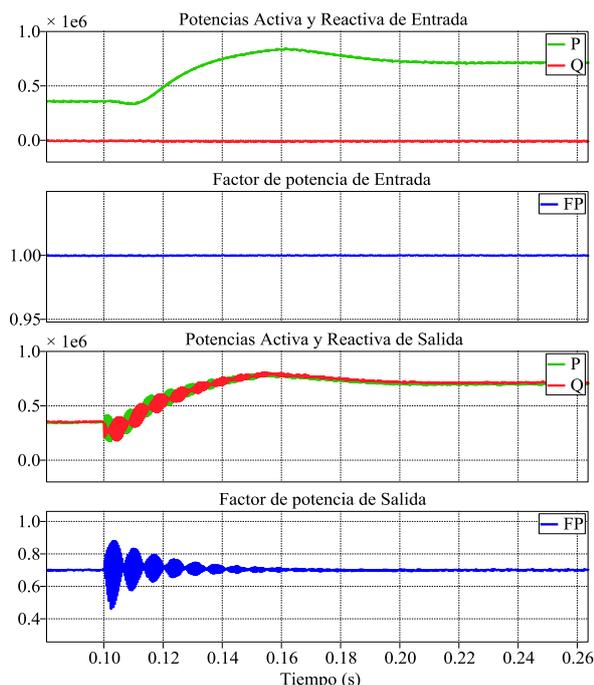
### 8.5. Simulación de una carga de bajo factor de potencia y simulación de sobrecarga

En esta simulación se conecta carga resistiva inductiva con un factor de potencia de 0.7, además se sobrecarga al SST con un 25%. Inicialmente la carga conectada es del 62.5% de la nominal, después de un tiempo la carga aumenta al 125%.

En la Figura 21 se observa que el aumento de carga al 125% ocasiona una disminución momentánea en el voltaje de salida y un incremento en la corriente de salida. El bajo factor de potencia de la carga, no afecta el factor de potencia en la entrada, tal como se observa en la Figura 22. Se comprueba que el SST puede operar normalmente con una sobrecarga del 125%



**Figura 21.** Simulación (voltajes y corrientes de entrada y salida del SST)



**Figura 22.** Simulación (potencias y factor de potencia de entrada y salida)

## 9. Conclusiones

El SST permite desacoplar el lado de la red del lado de la carga, esto quiere decir que los problemas tanto de armónicos, como de bajo factor de potencia y sobrecargas que ocurren en el lado de la carga no afectan a la red. Además el SST es capaz de mantener el voltaje nominal en el lado de la carga, a pesar de

que el voltaje de entrada se pueda ver afectado ya sea por un sag (máximo 30%) o un swell (máximo 15%).

El enlace DC de baja permite integrar fuentes de energía renovables y además conectar cargas DC. La potencia que proviene de estas fuentes de energía puede suministrar el total de la potencia que requiere la carga o puede ser entregada a la red, en el caso de que no haya carga conectada o el consumo de potencia por parte de la carga sea mínimo.

## 10. Agradecimientos

Damos gracias a Dios, a nuestros padres y profesores.

## 11. Referencias

- [1] Falcones S.; Xiaolin M.; Raja A., "Topology comparison for solid state transformer implementation", Reunión general de potencia y energía, 2010 IEEE.
- [2] U.S. departamento de energía, "The Smart Grid". Julio 2013. Disponible en <http://www.smartgrid.gov>.
- [3] Observatorio Industrial del Sector de la Electrónica, Tecnologías de Información y Telecomunicaciones. "Smart Grid y La Evolución de la Red Eléctrica". Julio 2013. Disponible en <http://www.minetur.gob.es>.
- [4] Electric Power Research Institute, "Smart Grid Demonstration-Integration of Distributed Energy Resources". Junio 2013. Disponible en <http://smartgrid.epri.com>.
- [5] Falcones S.; Xiaolin M.; Raja A., "A DC-AC Multiport-Converter Based Solid State Transformer Integrating Distributed Generation and storage"
- [6] Limón Morín A., Campos Cantón I.; "Funcionamiento de Convertidores Multinivel". Encuentro de investigación en Ingeniería Eléctrica. Marzo 2005.
- [7] Bretón Schuwirth A.; "Diseño y construcción de un inversor trifásico multinivel de cuatro etapas para compensación armónica y de reactivos". Tesis. Ingeniería, Universidad Católica de Chile. Escuela de Ingeniería, 2003.
- [8] Beldjajev Viktor; Roasto Indrek; "Dual Active Bridge Based Isolation Stage for Power Electronic Transformer". Reporte técnico, Universidad Tallinn de Tecnología.