



## Modelamiento y Diseño del Control de un Enlace de Transmisión AC-DC-AC con Modulación Híbrida

Freddy Galarza Sánchez <sup>(1)</sup> - Ronald Tinoco Romero <sup>(2)</sup> - Ph.D. Sixifo Falcones <sup>(3)</sup>  
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  
fregalar@espol.edu.ec <sup>(1)</sup> - ronadtin@espol.edu.ec <sup>(2)</sup> - sixifo@espol.edu.ec <sup>(3)</sup>

### Resumen

*El presente proyecto se enfoca en el modelamiento y diseño del sistema de control para un enlace de transmisión AC-DC-AC con sustanciales características de rendimiento y eficiencia energética, mediante la aplicación de una estrategia de control sencilla y eficaz. Entre las características más importantes de un sistema de transmisión de esta naturaleza, se debe mencionar que el enlace DC es la única forma práctica de conectar sistemas asincrónicos y sistemas de diferente frecuencia, por lo que una interconexión HVDC moderna es potencialmente el sistema de transmisión de energía más flexible para las necesidades antes citadas. Para la verificación y puesta en marcha del sistema se contempla la utilización del computador, el cual permitirá realizar la simulación del esquema general de los convertidores en conjunción con sus respectivos controladores. De esta forma se podrá observar y destacar las utilidades que presenta la ejecución de un sistema de transmisión con las características propuestas. Finalmente los resultados de este estudio establecerán los elementos de juicio iniciales para la implementación de un sistema modelo que viabilice una interconexión de dos sistemas eléctricos asincrónicos confinados en una misma estación de conversión de potencia.*

**Palabras Claves:** AC, DC, HVDC, FACTS, HVAC, VSC, IGBT, PWM.

### Abstract

*The focus of this project is the mathematical modeling and control system design for a transmission link AC-DC-AC that has remarkable characteristics in its performance and efficiency energetic, by applying of a simple and effective control strategy. Among the most important features of transmission systems is notable recognize that the DC link is the only practical way to connect electrical asynchronous systems and of different frequency, so that a modern HVDC interconnection is potentially the energy transmission system more flexible for these purposes. The simulation environment use of MATLAB has been considered for the start up and verification of project responses. This way the simulation results show the advantages reached with the transmission system proposed. Finally the contributions of this study establish initial criteria for making a prototype that allow the interconnection between two electrical asynchronous systems installed on same power station.*

**Keywords:** AC, DC, HVDC, FACTS, HVAC, VSC, IGBT, PWM.

## 1. Introducción

El permanente desarrollo de nuevos dispositivos semiconductores de potencia con mejores propiedades y con considerable reducción de pérdidas de energía, relacionadas especialmente a la conmutación, ha concebido el impulso de una nueva tecnología flexible para los sistemas de transmisión de energía eléctrica.

Esta tecnología corresponde a los contemporáneos sistemas flexibles de transmisión para corriente alterna (FACTS), los cuales contienen una variedad de controladores de Electrónica de Potencia creados para

mejorar el rendimiento de las redes tradicionales. Estos últimos proporcionan notable controlabilidad en la transmisión de potencia, en comparación con los controladores individuales.

Además los nuevos semiconductores de potencia han cambiado la actitud frente a los sistemas de transmisión de corriente continua de alto voltaje, mejor conocidos como sistemas HVDC por sus siglas en inglés, a través del desarrollo de una amplia variedad de configuraciones de los convertidores que permiten tomar ventaja de la alta capacidad de control y frecuencia de conmutación de los nuevos dispositivos.

Es por ello que la nueva tecnología HVDC puede proporcionar la mayoría de mejoras atribuibles a los controladores individuales de los FACTS.

La sensibilidad de la transmisión de corriente alterna (HVAC) al balance de potencia, el no poder controlar el flujo de carga sobre las líneas e incluso los límites de estabilidad a los que se sujeta debido a que el ángulo de fase puede variar con la distancia y limitar la transferencia de potencia son tres de los factores técnicos fundamentales que hacen al sistema HVDC lucir más atractivo [1].

Grandes apagones o blackouts en Estados Unidos y Europa han demostrado que el “favorable” acoplamiento eléctrico de sistemas eléctricos cercanos también puede presentar riesgos con efectos incontrolables en cascada sobre sistemas interconectados grandes y sobrecargados. En base a estas experiencias globales las estrategias para el desarrollo de los sistemas de potencia están encaminadas a lograr más interconexiones de sistemas con mejorada transmisión e implementación de cortafuegos o firewalls, que permitan controlar de forma fiable del flujo de potencia, eliminación de problemas de estabilidad, reducción de pérdidas en la transmisión, impedir la sobrecarga de las líneas de transmisión, prevención de los flujos de lazo y congestiones [2], [3].

Hoy en día dentro de la electrónica de potencia continúan realizándose estudios sobre las arquitecturas de los convertidores, con la finalidad de hacer frente a aplicaciones cada vez más exigentes con un alto grado de fiabilidad sin incurrir en modelos complejos de control. En las últimas décadas se han logrado importantes avances con los convertidores autoconmutados, ejemplo de aquellos están los convertidores de fuente de voltaje o VSC's (voltage source converters), los cuales utilizan el transistor de compuerta aislada (IGBT) en lugar de tiristores. Además se emplean técnicas de conmutación basadas en la modulación de ancho de pulso o PWM (Pulse Width Modulation) para obtener el voltaje con la forma de onda deseada.

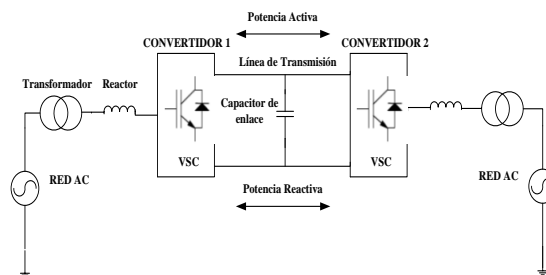
Los sistemas VSC HVDC en configuración back-to-back además de interconectar sistemas de potencia asíncronos, tienen la capacidad de conectarse a nodos débiles, comunes en las fronteras de los sistemas de potencia, hacen que esta tecnología sea muy ajustable a tales condiciones.

El sistema HVDC basado en VSC's ofrece soluciones más eficientes y ventajas frente al sistema HVDC clásico, a continuación se enuncian sus características más sobresalientes:

1. Permite mejorar la estabilidad del sistema de transmisión a través de un control independiente del flujo de potencia activa y reactiva en ambas direcciones [4].
2. Concibe una mejora de la calidad de energía mediante la aplicación de topologías propias de los VSC's, como la multinivel, permitiendo además prescindir en gran medida del filtrado armónico.

## 2. Definición y Alcance

En este paper se presenta básicamente la interconexión de dos sistemas eléctricos con diferentes frecuencias de operación a través de un enlace AC-DC-AC, o mejor conocido como sistema HVDC Back-to-Back. Se describe el modelamiento y diseño de sus controladores empleando el método de aproximación del factor K.



**Figura 1.** Esquema de un Sistema de Transmisión HVDC Back-to-Back.

El Sistema desarrollado establece la posibilidad de emprender en el modelamiento y diseño del control para un enlace de transmisión HVDC con una adecuada factibilidad en su aplicación y una sustancial controlabilidad del flujo de potencia. En la siguiente figura se bosqueja un esquema general del sistema de transmisión propuesto.

El objetivo principal será diseñar un sistema de control sobre el flujo bidireccional de potencia activa y reactiva manteniendo la estabilidad del conjunto. Al final se espera obtener un sistema de transmisión con un alto nivel de eficiencia, corroborando los resultados de las respectivas simulaciones.

## 3. Especificaciones y principales elementos

El proyecto básicamente se desarrolla en torno a una interconexión de dos sistemas eléctricos de corriente alterna, con las siguientes características nominales 230 kV - 60 Hz y 220 kV - 50 Hz respectivamente para las redes 1 y 2.

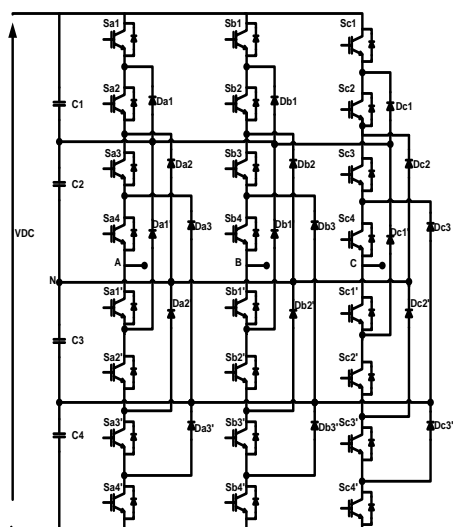
El conjunto posee la capacidad de transmitir 300 MW en las dos direcciones a través de un enlace de

transmisión DC ( $\pm 115$  kVdc). El sistema general se bosqueja en la figura 1.

### 3.1 Convertidores de Potencia

La tecnología de conversión de potencia empleada corresponde a los VSC, los cuales pueden operar en modo rectificador e inversor de una forma eficiente empleando técnicas de conmutación PWM; que permiten asociar las ventajas de los Transistores Bipolares de compuerta aislada o IGBT's.

La topología multinivel de VSC seleccionada responde a la configuración de enclavamiento por diodos, la cual si bien es cierto reproduce los principios de los primeros esquemas patentados en el siglo anterior, ha sido objeto de innumerables estudios e innovaciones. En función de la magnitud de la potencia de transmisión se define el número de niveles del convertidor, manteniendo una relación directa que impulsa una mayor capacidad de transmisión; en virtud de aquello se configura el sistema de conversión de cinco niveles que se observa en la figura 2.



**Figura 2.** Convertidor de 5 niveles de Enclavamiento por diodos.

Para el diseño del sistema se disponen de dos convertidores idénticos en conexión Back-to-Back denominada también cero longitud (prescindiendo la necesidad de un cable DC para la interconexión).

### 3.2 Transformadores de Potencia

Entre las funciones principales de los transformadores de potencia en un sistema HVDC están la de convertir la tensión alterna del sistema AC a un nivel de tensión adecuado para la operación del convertidor, además de proporcionar el aislamiento

necesario con respecto a la red eléctrica. Para la simulación se han elegido dos transformadores de potencia con conexión Y/Y<sub>g</sub>:

- Transf. Reductor, 400 MVA, 230 kV/ 110 kV.
- Transf. Elevador, 400 MVA, 110 kV/ 220 kV.

### 3.3 Reactores de línea.

Entre las principales funciones del reactor se tiene:

- Hacer las veces de filtro en la eliminación de armónicos de componentes de alta frecuencia producidos en la sintetización del voltaje.
- Proveer un control del flujo de potencia activa y reactiva a través de la variación de su voltaje.
- Además tiene la función de limitar la corriente de cortocircuito.

El valor de inductancia de los reactores se ha establecido en base al criterio del rizado del 3% sobre las corrientes de línea, recalando además que este mismo valor establece la capacidad de transmisión del sistema en base a la diferencia de fase y magnitud entre los voltajes de red y el obtenido en la conversión.

Los valores que se seleccionaron finalmente aplicando el criterio anteriormente citado, así como las consideraciones propias de sistemas de transmisión en alto voltaje se verificaron a través de las respectivas simulaciones del sistema en lazo abierto son:

1.  $L_1 = 45$  mH para el VSC 1.
2.  $L_2 = 56$  mH para el VSC 2.

### 3.4. Capacitores del enlace DC

Debido a que el voltaje en el lado DC del sistema adquiere rizado por efecto de la conmutación presente en el convertidor, el capacitor DC se introduce para reducir su magnitud y mantener un voltaje DC estable. Estos capacitores se encargan de almacenar energía, lo que permite el control sobre el flujo de potencia. También proporcionan un camino de baja inductancia para la corriente de apagado. El valor de la capacitancia individual de la pila de capacitores es de 1000  $\mu$ F. Con este valor se cumple con lo enunciado anteriormente.

## 4. Principio de Operación del Sistema

En la figura 2 se muestra un diagrama esquemático del sistema HVDC Back-to-Back basado en convertidores que comparten cuatro capacitores idénticos en el lado DC, los cuales dividen el voltaje del enlace. Además en la figura 4 se observa como los convertidores se conectan su respectiva red AC a

través de un Reactor de línea L y un transformador TR1 y TR2 respectivamente.

El convertidor de fuente de voltaje puede ser representado como una fuente de voltaje AC variable donde la amplitud, la fase y la frecuencia pueden ser controladas independientemente una de la otra. El voltaje de fase de salida del convertidor se describe en la siguiente ecuación:

$$V_{CONV} = m \frac{V_{dc}}{2} \sin(\omega t + \theta) \quad (1)$$

Donde las variables  $m$  y  $\theta$  pueden ser ajustados independientemente por el controlador del VSC para obtener un voltaje de salida de cualquier magnitud y fase en relación a la frecuencia fundamental del voltaje en el sistema AC. Como resultado la caída de voltaje a través del reactor se puede variar y consecuentemente controlar el flujo de potencia activa y reactiva.

El flujo de potencia activa entre la red y el convertidor puede ser controlado cambiando el ángulo de fase  $\theta$  entre el voltaje generado por el convertidor ( $V_{conv}$ ) y el voltaje de la red ( $V_{red}$ ). La potencia activa se puede calcular con la ecuación 2, asumiendo que no hay pérdidas en el reactor.

$$P = \frac{V_{conv} V_{red}}{X_L} \sin \theta \quad (2)$$

El flujo de potencia reactiva está determinado por la amplitud del voltaje del convertidor, el cual se controla a través de la modulación de ancho de pulso. La potencia reactiva se puede calcular con la siguiente ecuación:

$$Q = \frac{(V_{conv} \cos \theta - V_{red})}{X_L} V_{red} \quad (3)$$

## 5. Estrategia de Control

Es importante mencionar que la utilización de convertidores de fuente de voltaje en sistemas de Transmisión HVDC ha despertado mucho interés, debido a que presentan algunas ventajas sobre los sistemas convencionales. Entre estos beneficios se tiene que la magnitud y el ángulo de fase del voltaje alterno de salida del convertidor pueden ser controlados simultáneamente.

La transferencia de potencia puede ser desde el sistema AC hacia el convertidor o viceversa dependiendo del signo del ángulo de fase resultante, de esta forma el VSC puede operar como un rectificador o como un inversor. En el modo de operación como rectificador, cuando la potencia se alimenta hacia el condensador este se carga e incrementa su voltaje. En

cambio cuando la potencia es tomada desde este elemento, su voltaje decrece.

En virtud de lo mencionado anteriormente el voltaje del enlace DC debe mantener su valor nominal constante, para ello los actuales esquemas VSC-HVDC logran un control del voltaje AC del convertidor por medio de la técnica PWM [5].

Cuando este índice de modulación es cercano a uno el voltaje sintetizado por el convertidor es mayor que el voltaje AC de la red eléctrica y la potencia reactiva se transfiere hacia esta última. En cambio, cuando el índice de modulación es bajo sucede que el voltaje AC del convertidor es menor al de la red y la potencia reactiva es absorbida por el convertidor [5].

Hay dos estrategias de control posibles, para implementar el índice de modulación, llamadas: control directo y control vector. En el control directo el índice de modulación o ángulo de fase son ajustados directamente de los parámetros que están siendo controlados; la estrategia alternativa control vector, en cambio desacopla la acción de ajuste del índice de modulación del ángulo de fase [5].

En la estrategia vector control, las corrientes trifásicas son transformadas a los ejes  $d$  y  $q$ , las cuales luego son sincronizadas con el sistema de voltaje trifásico a través de un lazo de enganche de fase, en inglés, Phase-Locked Loop (PLL). Los voltajes  $d$  y  $q$  generados por control vector son transformados a cantidades trifásicas y convertidos en voltajes de línea por el convertidor [5].

### 5.1 Diseño de Control de los Convertidores

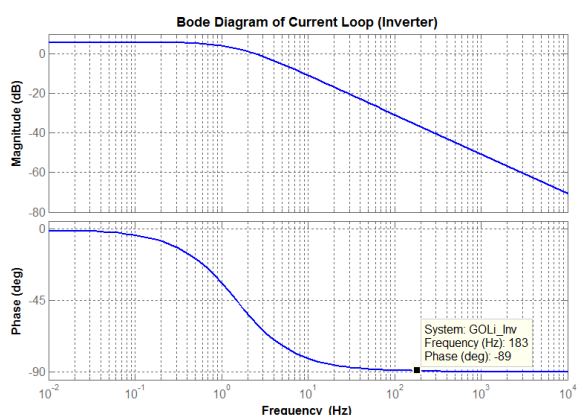
El diseño de control a desarrollar establece la utilización de dos controladores configuración en cascada para el rectificador, los cuales se disponen a regular el voltaje del enlace DC, es decir, su propósito de control será el de mantener la energía de los condensadores; mientras que para el inversor se establece la utilización de un solo controlador que regula la transferencia de potencia activa y reactiva.

El método de control a emplearse será la aproximación del Factor K; el cual permite un error de estado estacionario igual a cero, además de encontrar la ubicación de los polos en función de un margen de fase y frecuencia de corte solicitados. De hecho la aproximación del factor K permite encontrar el controlador del sistema por medio de la aplicación de un procedimiento de diseño rápido y eficiente.

Primero se establece la función de transferencia del sistema de transmisión en lazo abierto con controlador

unitario. Considerando como ejemplo la determinación del controlador de corriente de línea del inversor; se establecen variables de interés como el ancho de banda en  $BW = 180$  [Hz], debido a que este parámetro debe ubicarse al menos una década antes de la magnitud de frecuencia de conmutación  $f_s = 1845$  [Hz]. Además se requiere que el margen de fase se sitúe en  $60^\circ$ .

Seguidamente se procede a determinar la fase del sistema  $\varphi_{SYS}$ , variable que ayudará a establecer la fase necesaria para cumplir con los requerimientos del párrafo anterior; la fase requerida posteriormente se logrará con la inserción de polos y/o ceros en la función de transferencia del controlador.



**Figura 3.** Diagrama de Bode en lazo abierto del enlace de transmisión sin controlador.

La fase del sistema  $\varphi_{SYS}$  se encuentra a través del diagrama de bode de la función de transferencia del enlace de transmisión en lazo abierto, conforme se observa en la figura 3. Como se observa en el diagrama de fase de bode, la fase del sistema es  $\varphi_{SYS} = -89^\circ$  a una frecuencia de corte  $f_c = 183$  [Hz].

Ahora con la utilización de la siguiente expresión se encontrará la fase requerida y que será proporcionada por el respectivo controlador.

$$\varphi_{BOOST} = PM - \varphi_{SYS} - 90^\circ \quad (4)$$

En la siguiente tabla se presentan los tipos de controladores característicos en función del valor de  $\varphi_{BOOST}$  encontrado.

**Tabla 1.** Criterio de selección del controlador en función del margen de fase requerido.

$\varphi_{BOOST}$ Requerido	Tipo de Controlador
$\varphi_{BOOST} = 0^\circ$	Tipo I
$\varphi_{BOOST} < 90^\circ$	Tipo II
$\varphi_{BOOST} > 90^\circ$	Tipo III

En nuestro ejemplo, como  $\varphi_{BOOST} < 90^\circ$  entonces se procederá a determinar un controlador Tipo II, el cual se caracteriza por poseer en su función de transferencia con un cero y dos polos.

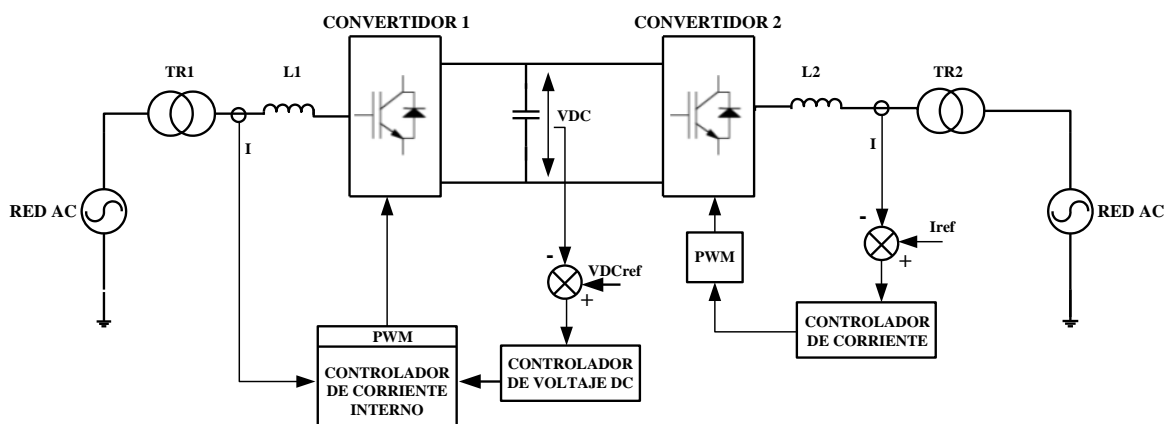
$$k = \tan\left(\frac{\varphi_{BOOST}}{2} + 45\right) = 3.606 \quad (5)$$

$$\omega_z = \frac{\omega_c}{k} = \frac{2\pi \times BW}{k} = \frac{2\pi \times 180}{3.606} = 313.64 \text{ [rad/s]} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} \omega_p &= k \times \omega_c = 3.606 \times 2\pi \times 180 \\ &= 4078.29 \text{ [rad/s]} \end{aligned} \quad (7)$$

Una vez obtenidos estos parámetros se logra definir la función de transferencia del controlador, de la siguiente forma:

$$G_{Ci_{Inv}} = \frac{K_C}{s} \frac{\left(1 + \frac{s}{313.64}\right)}{\left(1 + \frac{s}{4078.29}\right)} \quad (8)$$



**Figura 4.** Esquema de control propuesto para el enlace de transmisión AC-DC-AC.

Donde  $K_C$  corresponde a la constante proporcional del controlador y se obtendrá a partir de la magnitud de la ganancia del sistema en lazo abierto, a la frecuencia  $\omega_C$  y con  $K_C = 1$ . La ganancia del sistema con la inserción del controlador encontrado en el paso previo es de  $-86.2$  [dB], con este valor se procede a hallar  $K_C$ , recalculando primero la ganancia absoluta del sistema:

$$-86.2 = 20 \log(G_{\omega_C}) \quad (9)$$

$$G_{\omega_C} = 4.898e - 05$$

Con lo que se procede a determinar  $K_C$ , como:

$$K_C = \frac{1}{G_{\omega_C}} = 20416.5 \quad (10)$$

Finalmente se consolida la función de transferencia del controlador de corriente, bajo la siguiente expresión:

$$G_{Ci_{inv}} = \frac{20416.5 \left(1 + \frac{s}{313.64}\right)}{s \left(1 + \frac{s}{4078.29}\right)} \quad (11)$$

$$= \frac{(65.095s + 2.04165e04)}{(2.452e - 04s^2 + s)}$$

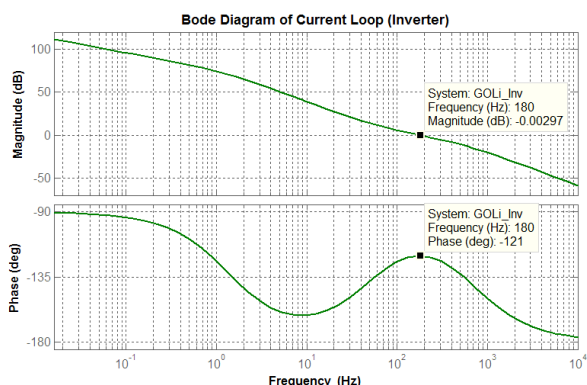


Figura 5. Diagrama de Bode del sistema en lazo abierto, incorporando la función de transferencia del controlador.

## 6. Simulaciones del Sistema

Como se puede observar en la figura 7 el sistema se constituye por la interconexión de dos redes eléctricas, las etapas de conversión de potencia y la estrategia de control propuesta. Para implementar un modelo simple y ordenado del sistema sobre el entorno de simulación se han adecuado varios subsistemas que ejecutan una función específica.

### 6.1 Respuesta del sistema frente a un cambio en su punto de operación

La concepción de diseño del sistema se ha establecido tomando en cuenta las garantías de realizar una transmisión de potencia en niveles nominales. Sin embargo el conjunto tiene los grados de libertad suficientes para operar en cualquiera de los cuatro cuadrantes que rige el plano de potencia, siempre y cuando se circunscriba a la potencia aparente nominal del sistema. La operación en niveles nominales de potencia permite aprovechar las ventajas presentes en los convertidores de fuente de voltaje, particularmente las desprendidas de la plena utilización del enlace DC.

#### 6.1.1 Demanda de Potencia Reactiva

En esta simulación se establece inicialmente una transmisión nominal de potencia de 300 MW, luego se cambiará el punto de operación en  $t=0.2$  [s] de manera que se asigne una transferencia aproximada de 290 MW y 80 MVAR hacia la red eléctrica 2.

En las figuras 7 y 8 se mostrará un diagrama fasorial para el punto de operación inicial y otro que describa el estado final para cada uno de los convertidores.

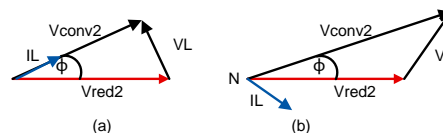


Figura 6. Diagrama fasoriales del convertidor 2, (a) transmisión nominal de potencia activa, (b) transmisión bajo demanda de potencia reactiva.

Sistema de Transmisión HVDC Back-to-Back basado en Convertidores de Enclavamiento por Diodos de 5 Niveles

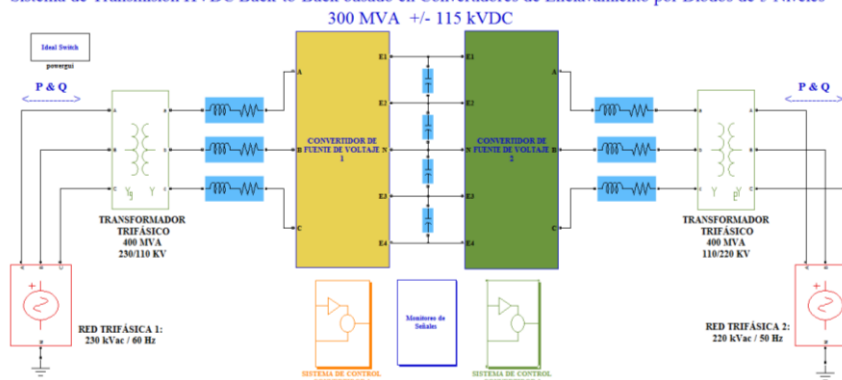
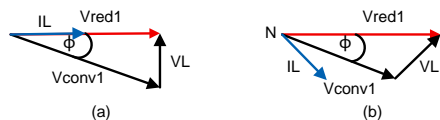


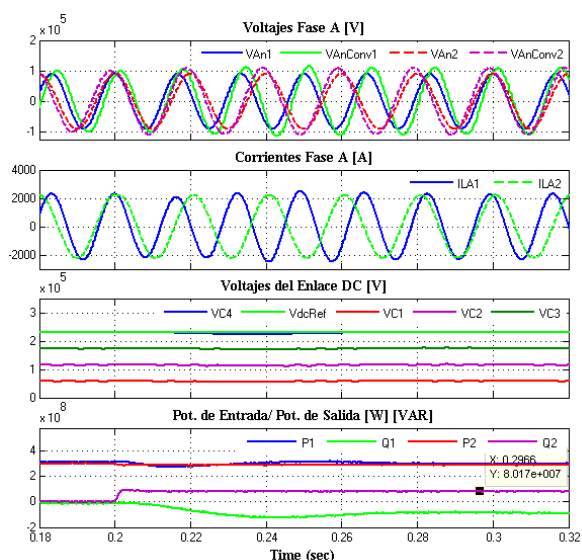
Figura 7. Esquemático del enlace de transmisión en el entorno de SimPower Systems de Matlab.



**Figura 8.** Diagramas fasoriales del convertidor 1, (a) transmisión nominal de potencia activa, (b) transmisión bajo demanda de potencia reactiva.

Como se observa en la figura 9 los voltajes de fase de las redes eléctricas y de los convertidores indican de forma explícita el sentido del flujo de potencia, esto se desprende de la comparación de sus desfases y magnitudes.

Además se observa una estabilidad muy ventajosa sobre el enlace DC producto del control desarrollado. Es importante destacar que la respuesta estable del voltaje de los condensadores produce una mayor fiabilidad y eficiencia del sistema de transmisión.



**Figura 9.** Respuesta del sistema frente a una demanda de potencia reactiva.

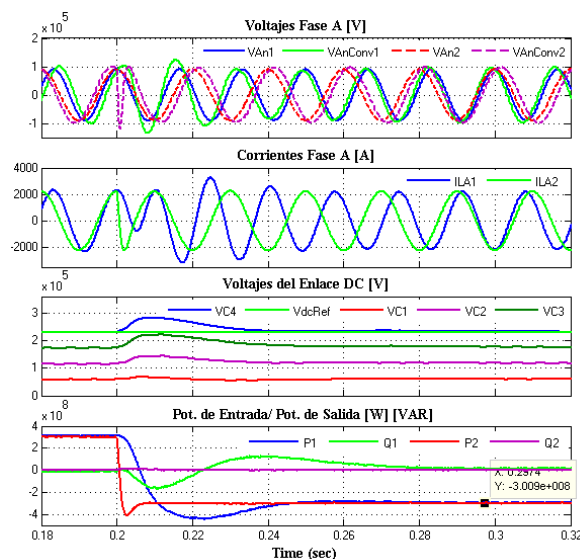
En la parte inferior de la figura anterior se verifican los valores de potencia tanto suministrados como demandados en la transferencia del sistema, esto permite realizar un balance de energía inherente a la operación de los convertidores multinivel.

### 6.1.2 Demanda de Potencia en ambas direcciones

En esta prueba se procede a realizar un cambio del punto de operación del sistema modificando el sentido de la transmisión de potencia. El sistema iniciará con la transmisión nominal de potencia activa hacia la red eléctrica 2 y en  $t=0.2$  [s] se efectuará la variante con magnitud de potencia igual hacia la red eléctrica 1.

Con esta prueba se puede demostrar que los controladores imponen un amplio control para

producir una operación estable en diferentes puntos de operación, la controlabilidad es eficiente ya que permite mantener con escasa variación el nivel del voltaje del enlace DC.



**Figura 10.** Respuesta del sistema frente a un cambio en la dirección de transmisión de potencia activa.

## 6.2 Respuesta del sistema frente a perturbaciones de corta duración

Se menciona como perturbaciones de corta duración a las variaciones de voltaje, las cuales se deben a causas tales como: condiciones de falla, por alimentación de grandes cargas que demandan altas corrientes de arranques o por pérdida de alimentación energética. Dependiendo de la localización de la falla y de las condiciones del sistema, éstas pueden generar sag's (depresiones de voltaje) o swell's (elevaciones de voltaje).

### 6.2.1 Respuesta del sistema frente a un sag del 30%

Un sag es una reducción del voltaje o corriente eficaz que va entre 0.1 a 0.9 p.u. para un corto intervalo de tiempo que va desde un medio ciclo hasta un minuto.

La causa más común de falla que se presentan en los sistemas de transmisión de alto voltaje corresponde a las descargas atmosféricas.

En esta prueba a diferencia de las anteriores se puede notar que el tiempo de estabilización y las magnitudes de las variables eléctricas del sistema presentan una considerable afectación, como consecuencia de la drasticidad que produce la condición de falla. A pesar de esto el sistema de control establece una regulación apropiada que evita un posible colapso del sistema.

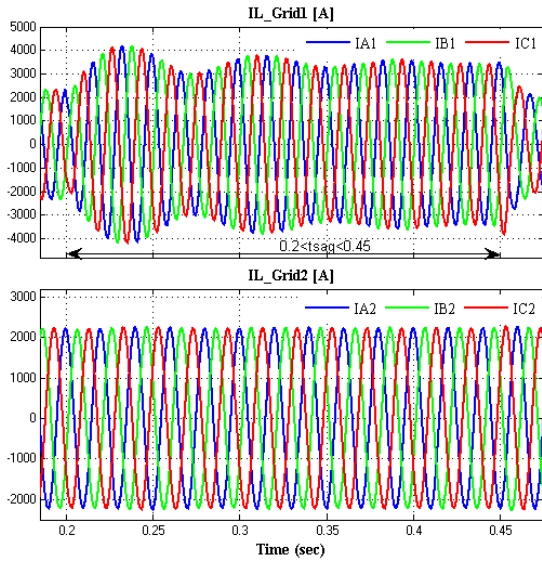


Figura 11. Efectos de un sag del 30% en la red 1 sobre las corrientes de línea del sistema.

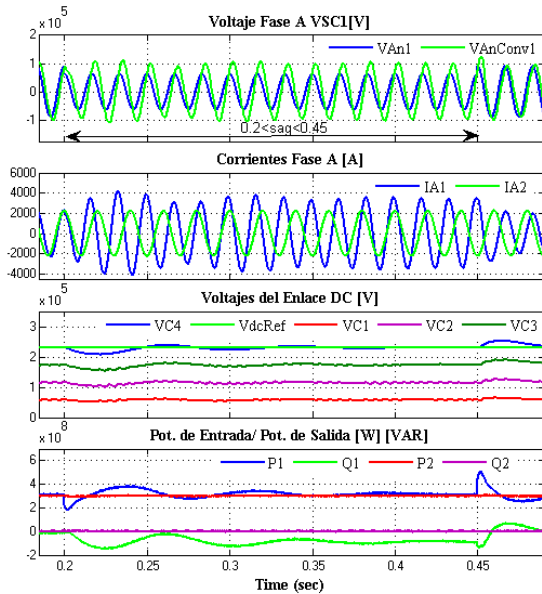


Figura 12. Efectos de un sag del 30% en la red 1 sobre la transmisión de potencia.

Como se observa en las figuras 11 y 12 la red eléctrica receptora de potencia no se ve alterada en lo absoluto por la presencia de la perturbación, con lo que se comprueba una de las ventajas del empleo de sistemas de transmisión HVDC la cual justamente es la propagación de una falla eléctrica entre dos redes interconectadas.

### 6.2.1 Respuesta del sistema frente a un swell del 15%

Un swell es un incremento del voltaje o corriente eficaz entre 1.1 a 1.8 p.u. durante intervalos de tiempos comprendidos entre 0.5 ciclos hasta un minuto.

Para realizar esta prueba se simulará un swell del 15% sobre la red trifásica 2, el cual tendrá un intervalo de duración aproximado de 6 ciclos a partir de  $t = 0.2$  [s]. Además cabe indicar que se está realizando una transmisión nominal de potencia activa hacia la red eléctrica 1 y que las perturbaciones se presentan en intervalos de tiempo de corta duración.

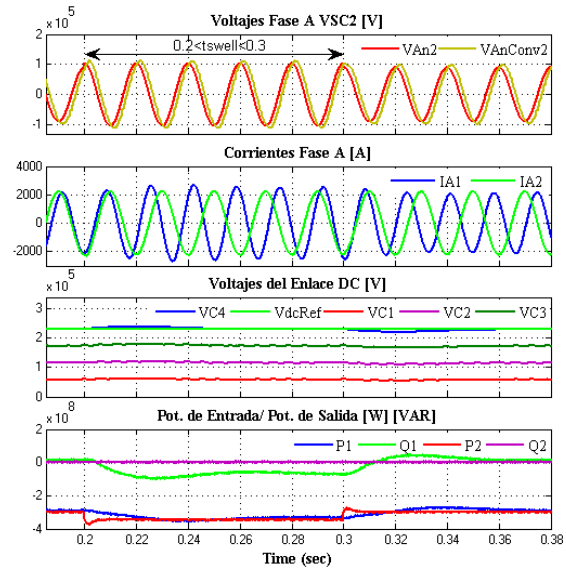


Figura 13. Efectos de un swell del 15% en la red 2 sobre la transmisión de potencia.

Habiendo realizado la transmisión de potencia hacia la red eléctrica 1 las condiciones de operación han sido satisfactorias con el sistema de control diseñado sin embargo en presencia de estas perturbaciones poco usuales el sistema experimenta un cambio en su punto de operación durante el intervalo de tiempo en el cual se mantiene el swell.

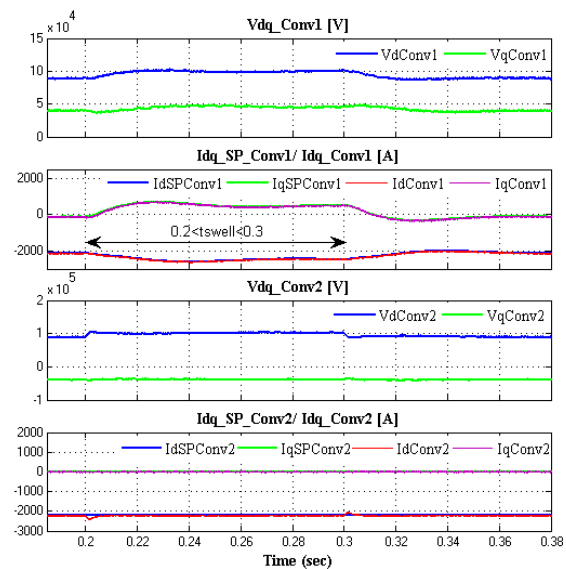


Figura 14. Respuesta de las variables de control frente a un swell del 15%.



En la figura 14 se puede observar que las señales de control emitidas por los compensadores están en función del set point establecido. Se destaca la invariabilidad del voltaje del enlace DC.

## 7. Conclusiones

- Se resalta que el notable desarrollo de la tecnología HVDC ha fortalecido positivamente las interconexiones de los sistemas eléctricos actuales, entre varias ventajas se pueden mencionar las siguientes: permite de forma exclusiva la interconexión de sistemas eléctricos asincrónicos, minimiza la propagación de fallas en un gran sistema eléctrico interconectado, realiza de forma independiente un control eficiente y fiable de la potencia activa y reactiva. Sin lugar a dudas se vaticina que el apogeo de los sistemas de transmisión HVDC impondrán la evolución de las interconexiones eléctricas mundiales, que actualmente se orientan en la aplicación de sistemas eficientes denominados como Smart Grids.
- La técnica de conversión de potencia multinivel con diodos de enclavamiento es una de las topologías sólidamente desarrolladas y que se presenta actualmente como una de las mejores opciones para usarse con altos niveles de voltaje en el rango de media y alta potencia; debido a la operación estable que ofrece con respecto a las demás configuraciones existentes.
- Se ha propuesto y desarrollado una estrategia de control sencilla y robusta con notables resultados que considera un modelado aproximado del sistema, como resultado se obtiene la función de transferencia del controlador a través de la aplicación de un procedimiento básico.
- En el capítulo final se realizan las simulaciones de un esquema del sistema, mostrando un funcionamiento virtual ante diferentes situaciones de operación, esto nos ha permitido identificar las fortalezas y debilidades del trabajo realizado.
- Se debe manifestar que el voltaje del enlace DC no debería presentar variación en su magnitud, es decir, debe permanecer siempre constante. Debido a que su desbalance origina que las señales de salida del convertidor presenten oscilaciones que ocasionan un mal funcionamiento del sistema. Para un trabajo futuro se recomienda analizar con mayor atención los beneficios de sistemas de

balanceo de voltaje sobre el enlace de transmisión DC.

- Los resultados obtenidos presentan un favorable rendimiento del sistema back-to-back VSC-HVDC en estado estable, incluso frente a diferentes condiciones de falla a las cuales se puede exponer. En todos los casos se puede observar que el sistema de control provee una rápida y satisfactoria respuesta.

## 8. Referencias

- [1] Karl-Wener Kanngiesser, Hartmur Huang, Hans Peter Lips, Norbert Christl, Georg Wild, Dietmar Retzmann, Peter Riedel, Kadry Sadek, Christa Storner y Martina Gumber, "*HVDC System and their Planning*", Siemens AG.
- [2] G. Beck, D. Povh, D. Retzmann, E. Teltsch, "*Global Blackouts – Lessons Learned*", Siemens AG, Energy Sector, Power Transmission Division, 2005.
- [3] J. M. Pérez de Andrés, J. Dorn, D. Retzmann, D. Soerangr, A. Zenkner, "*Prospects of VSC Converters for Transmission System Enhancement*", Siemens, 2007.
- [4] Chathura Jeevantha Patabandi Maddumage, "*Co-Simulation of Back-to-Back VSC Transmission System*" Tesis, Universidad de Manitoba, agosto, 2011.
- [5] J. Arrillaga, Y.H. Liu y N.R. Watson, "*Flexible Power Transmission*", ISBN 978-0-470-05688-2, 2007.