

# Modeling of Multi Terminal VSC-HVDC links using port-Hamiltonian Systems

Montserrat Trejo-Guerra,\* Sofía Avila-Becerril,\*  
Paul Maya-Ortiz\*

\* *Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Ingeniería,  
04510, Ciudad de México*

---

**Abstract:** A usual strategy to model HVDC systems is to look for the models' simplification (or linearization) to make a small-signal analysis. However, VSC-HVDC multiterminal links have intrinsically non-linear characteristics that need to be considered. Port-Hamiltonian (pH) systems provide a modeling methodology that allows incorporating the elements of the HVDC system in a modular way while explicitly providing the energy function, internal interconnection, and dissipation, which are helpful for analysis and control. This paper presents the modeling of a multiterminal HVDC network from the pH perspective to incorporate elements into the system while preserving its properties. Numerical simulations are carried out to compare the standard model and the pH representation. The latter reproduces the same dynamics of the former without loss of information and gains in model's structure.

*Keywords:* VSC, VSC-HVDC links, port-Hamiltonian systems, non-linear modeling.

---

## 1. INTRODUCCIÓN

La demanda creciente de energía eléctrica y el acceso económico a fuentes de energía renovable, como la energía eólica marina o la generación térmica solar en los desiertos, han impulsado el transporte de energía por medio de Líneas de Transmisión de Alta Tensión en Corriente Continua (HVDC por sus siglas en inglés). Este tipo de transporte se utiliza cuando las distancias a recorrer son muy grandes y se necesitan conectar dos redes eléctricas que pueden tener o no la misma frecuencia.

Las principales componentes de un enlace HVDC son: *Convertidores Rectificadores* y *Convertidores Inversores*; así como *Líneas de Transmisión* (en la parte de CD) y *Filtros*. En general, en los sistemas HVDC se pueden utilizar dos tipos de tecnologías de convertidores: los Convertidores Conmutados por Línea (LCC, por sus siglas en inglés) o los Convertidores por Fuente de Tensión (VSC, por sus siglas en inglés). Los primeros tienen fallas de conmutación y como lo estudian Lin et al. (2019), requieren de una gran cantidad de filtros. En cambio, los VSC permiten utilizar técnicas de modulación que ayudan a sintetizar un voltaje de CA totalmente controlado, permitiendo un control sobre la potencia activa y reactiva.

En México, el proyecto de interconexión entre el Sistema Eléctrico Baja California y el Sistema Interconectado Nacional consiste en la instalación de dos estaciones convertidoras con tecnología HVDC-VSC adyacentes a la

Subestación Seri, en Hermosillo, y una línea de transmisión en CD que operará en forma bipolar con una capacidad de 1,500 MW, en un nivel de tensión de  $\pm 500kV$ , con una longitud estimada de 700 km. La inversión estimada es de 1,109 millones de dólares.

En los últimos años se han empleado diferentes estrategias para modelar a los sistemas HVDC. Una estrategia usual es buscar la simplificación (o linealización) de los modelos para hacer análisis de pequeña señal (Dong et al., 2021; Grdenić et al., 2020) y posteriormente, implementar controladores. Por ejemplo, Castro and Acha (2016) abordan el problema de enlaces VSC-HVDC desde una perspectiva fasorial con el objetivo de dar una descripción en términos de flujos de potencia. Mientras que Ting et al. (2016) lo hacen para un sistema VSC-HVDC tipo *back-to back*. En contraste con las referencias mencionadas, donde el análisis se logra empleando simulaciones numéricas que requieren una gran carga computacional, desde la perspectiva de modelado de sistemas puerto-Hamiltoniano (pH), se busca caracterizar propiedades estructurales del modelo para posteriormente explotarlas en el desarrollo de controladores. En este sentido, el trabajo de Zonetti et al. (2015) presenta el modelo de una red HVDC-multiterminal formada por rectificadores por fuente de tensión (VSR) y, aunque considerara una topología de interconexión tipo malla, se asume que cada nodo en la red tiene conectado un VSR. Por su parte, Gil-Gonzalez et al. (2019) analizan una topología tipo *back-to back*. Mientras que en (Roengriang et al., 2020) se estudia el modelado de un solo VSC desde la perspectiva de sistemas Hamiltonianos Controlados por Puerto. Así, cuando se trata

---

\* Investigación realizada gracias a CONACYT CVU:1084240 y gracias al Programa UNAM-PAPIIT IA105421

de analizar un enlace HVDC multiterminal, se carece de una estructura sistemática que integre toda la dinámica presente en la red y que además ayude a identificar la conexión entre cada uno de los dispositivos y la inclusión de nuevos elementos (no necesariamente VSR) a la red.

En este trabajo, se obtiene el modelo matemático de un sistema HVDC usando la estructura de los sistemas pH con la finalidad de comprender de manera precisa cómo funciona el sistema distinguiendo las diferentes variables que interactúan en el sistema. Para validar el modelado se hace una comparación del enlace simulado con componentes electrónicos (la planta eléctrica) y el modelo matemático en pH que se obtiene.

## 2. PRELIMINARES

El convertidor VSC es un dispositivo que permite el intercambio de potencia entre redes de CD y redes de CA, por lo que puede actuar como Rectificador o Inversor. La topología usual de un VSC trifásico de dos niveles consta de tres estructuras de medio puente idénticas, conocidas como puente trifásico, formadas por interruptores de potencia (IGBTs) controlados a través de señales de conmutación. En su lado de CD, el VSC emplea capacitores que se mantienen cargados a un nivel de voltaje requerido. En el lado de CA, el VSC se conecta a un filtro RL con el fin de eliminar los armónicos enviados a la red de CA generados por las estaciones convertidoras (Castro and Acha, 2016)

### 2.1 Enlaces VSC-HVDC

Los Sistemas HVDC son sistemas de potencia bidireccionales diseñados para transmitir energía eléctrica a grandes distancias y/o interconectar sistemas asíncronos CA de igual o diferente frecuencia. Estos sistemas están basados en VSC que según Yu et al. (2012) permiten:

- Controlar el flujo de potencia en ambos sentidos.
- Implementar Sistemas de Transmisión tipo Multiterminal.
- Evitar fallas de conmutación debido a perturbaciones en la red de CA.
- Controlar de forma independiente el flujo de potencia activa y reactiva en cada una de las estaciones convertidoras.
- Interconectar Sistemas CA débiles o poco estables.

Existen diferentes configuraciones en los sistemas de transmisión HVDC (Irina Stan and Ioan Stroe, 2010):

- (1) Monopolar: Los convertidores se conectan entre sí mediante una única línea de transmisión denominada polo, mientras que la tierra misma del sistema ó un conductor metálico entre ambos convertidores se utiliza como retorno.
- (2) Bipolar: Es la configuración más utilizada y consiste en un conductor positivo y otro negativo que conectan ambos convertidores del sistema, los cuales

a su vez son aterrizados en su punto medio para mantener un mismo punto de referencia y conseguir tanto el polo positivo como el negativo trabaje de manera independiente. De esta forma, si uno de los convertidores falla, el sistema puede seguir transmitiendo potencia a través del segundo par de convertidores.

- (3) Back to Back: Consiste en un par de convertidores que se encuentran instalados dentro de un mismo sitio sin que exista entre ellos un enlace de transmisión de potencia en DC de grandes distancias.
- (4) Multi-terminal: Consiste en conectar tres o más convertidores en serie y/o paralelo, de tal forma que dos convertidores se configuran como rectificador y uno como inversor para aumentar la potencia del sistema.

### 2.2 Sistemas puerto-Hamiltonianos

El modelado basado en sistemas pH tiene como objetivo proporcionar un marco unificado para el modelado de sistemas físicos de diferente naturaleza al identificar las componentes del sistema que capturan las características físicas como el almacenamiento de energía, disipación de energía, etc. En el caso no-lineal, se reconoce que las propiedades físicas del sistema deben aprovecharse y/o respetarse en el diseño del controladores robustos y físicamente interpretables. La teoría de sistemas pH ofrece una variedad de conceptos y herramientas para hacer esto. El modelado basado en puertos considera un sistema pH como un sistema físico de parámetros concentrados descrito por un conjunto de elementos almacenadores de energía, un conjunto de elementos disipadores de energía y un conjunto de puertos, interconectados entre sí por medio de estructuras que preservan potencia (Van Der Schaft et al., 2014). Así, considere un sistema no-lineal de la forma:

$$\dot{x} = f(x, u) \quad (1)$$

en donde  $x \in \mathbb{R}^n$  son las variables de estado,  $u \in \mathbb{R}^m$  son las entradas de control y una función de almacenamiento de energía total definida como:

$$H(x) : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}.$$

El sistema (1) reescrito como:

$$\begin{aligned} \dot{x} &= [J(u) - R(x)] \frac{\partial H(x)}{\partial x} + g(x)u \\ y &= g^T(x) \frac{\partial H(x)}{\partial x}, \end{aligned} \quad (2)$$

con  $y \in \mathbb{R}^m$  la salida del sistema, permite representar la disipación por medio de  $R(x) = R^T(x) \geq 0$ , la interconexión interna por medio de  $J(u) = -J(u)^T \in \mathbb{R}^{n \times n}$  y los puertos por  $g(x) \in \mathbb{R}^{n \times m}$ .

## 3. MODELADO

En esta sección se obtiene el modelo del HVDC multiterminal mostrado en la Fig. 1 desde un enfoque modular. Primero se presenta el modelo de los elementos que forman al sistema HVDC y después el modelo del sistema completo. Así pues, se obtienen el modelo no-lineal del VSC como rectificador, el modelo no-lineal del

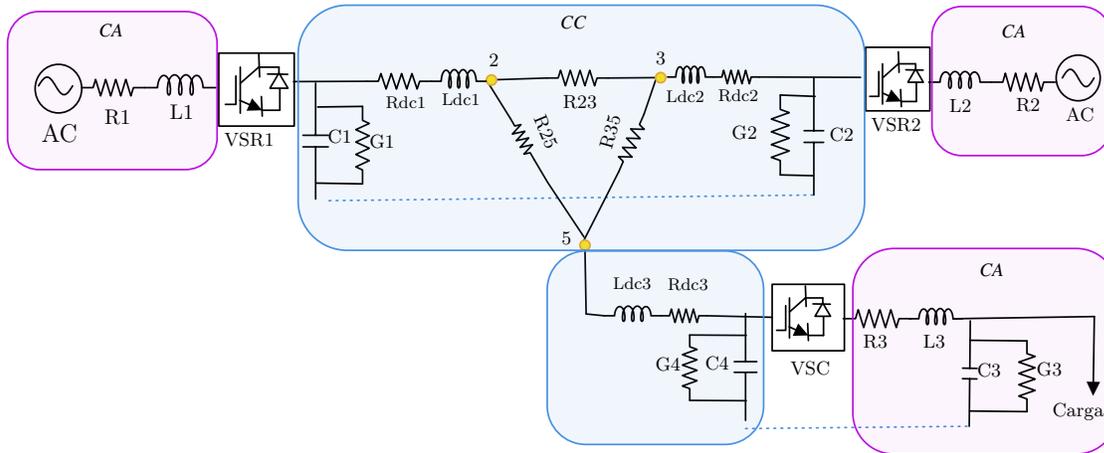


Fig. 1. Enlace multiterminal VSC-HVDC

VSC como Inversor y finalmente, el modelo no-lineal del enlace multiterminal VSC-HVDC. Para cada uno de los modelos se supone lo siguiente:

- S.1 Los elementos resistivos, inductivos y capacitivos son lineales.
- S.2 El sistema está balanceado.

A lo largo de esta sección, se hará alusión a las siguiente notación para las variables de estado, correspondiente a las Fig. 2 y 3

$x_{1R}, x_{2R}$	Corriente que sale del filtro RL del VSR en coordenadas $d$ y $q$ , respectivamente
$x_{3R}$	Voltaje del capacitor en DC del VSR
$x_{1I}$	Voltaje del capacitor en DC del VSC
$x_{2I}, x_{3I}$	Corriente que sale del filtro RL del VSC en coordenadas $d$ y $q$ , respectivamente
$x_{4I}, x_{5I}$	Voltaje que sale del filtro RC del VSC en coordenadas $d$ y $q$ , respectivamente

Así como la notación correspondiente a la Fig.1:

$x_1, x_2$	Corriente que sale del filtro RL del VSR1 en coordenadas $d$ y $q$ , respectivamente
$x_3$	Voltaje del capacitor en DC del VSR1
$x_4, x_5$	Corriente que sale del filtro RL de VSR2 en coordenadas $d$ y $q$ , respectivamente
$x_6$	Voltaje del capacitor en DC del VSR2
$x_7$	Voltaje del capacitor en DC del VSC
$x_8, x_9$	Corriente que sale del filtro RL del VSC en coordenadas $d$ y $q$ , respectivamente
$x_{10}, x_{11}$	Voltaje que sale del filtro RC del VSC inversor en coordenadas $d$ y $q$ , respectivamente
$x_{12}$	Corriente en DC del VSR1
$x_{13}$	Corriente en DC del VSR2
$x_{14}$	Corriente en DC del VSC inversor
$u_d, u_q$	Señal de control en coordenadas $dq$

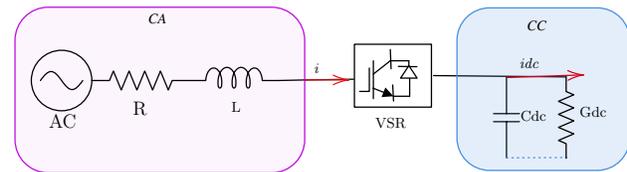


Fig. 2. VSR trifásico

### 3.1 VSC (Rectificador)

El modelo promediado de un VSR, mostrado en la Fig.2, en coordenadas  $dq$  está dado por:

$$\begin{aligned} L\dot{x}_{1R} &= -Rx_{1R} + Lwx_{2R} - x_{3R}u_{dR} + V_d \\ L\dot{x}_{2R} &= -Lwx_{1R} - Rx_{2R} - x_{3R}u_{qR} + V_q \\ C\dot{x}_{3R} &= x_{1R}u_{dR} + x_{2R}u_{qR} - Gx_{3R} - I_{dc} \end{aligned}$$

con  $L$  la inductancia,  $C$  la capacitancia,  $R$  la resistencia,  $G$  la conductancia y  $w$  la frecuencia nominal. Ahora bien, si se define una función de almacenamiento de energía como:

$$H(x)_R = \frac{1}{2}x_R^T D_R x_R \quad (3)$$

donde  $D_R := \text{diag}[L, L, C]$  y  $x_R = [x_{1R}, x_{2R}, x_{3R}]^T$ , entonces el sistema se puede reescribir como:

$$D_R \dot{x}_R = [J(u)_R - R_R]x_R + M_R \quad (4)$$

con:

$$J(u)_R = \begin{bmatrix} 0 & Lw & -u_{dR} \\ Lw & 0 & -u_{qR} \\ u_{dR} & u_{qR} & 0 \end{bmatrix} = -J^T(u)_R$$

$$R_R := \text{diag}[R, R, G], \quad M_R := [V_d, V_q, -I_{dc}]^T.$$

Note que se han utilizado variables de co-energía (corrientes y voltajes), por lo que haciendo uso de las siguientes relaciones constitutivas

$$id = \frac{\phi_d}{L}, iq = \frac{\phi_q}{L}, V_c = \frac{q_c}{C}, \quad (5)$$

la ecuación (4) puede reescribirse como el sistema pH:

$$\dot{x}_R = [J(u)_R - R_R] \frac{\partial H(x)_R}{\partial x_R} + M_R \quad (6)$$

### 3.2 VSC (Inversor)

Como se mencionó, el tipo de inversor considerado es un VSC. Sin embargo, tomando en cuenta la topología de interconexión, mostrado en la Fig. 3, el sistema tiene como entrada una corriente  $I_{dc}$ , por lo que es necesario añadir un filtro de primer orden del lado de CC. Por su parte, el VSC es conectado a un filtro de segundo orden del lado de CA, para obtener un modelo matemático de tercer orden, en el marco  $dq$ , dado por las siguientes ecuaciones

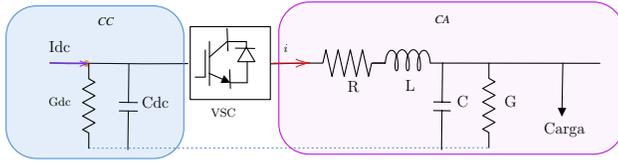


Fig. 3. VSC inversor trifásico

$$\begin{aligned} C_{dc}\dot{x}_{1I} &= -G_{dc}x_{1I} - u_{dI}x_{2I} - u_{qI}x_{3I} + I_{dc} \\ L\dot{x}_{2I} &= -Rx_{2I} - x_{4I} + u_{dI}x_{1I} + Lwx_{3I} \\ L\dot{x}_{3I} &= -Rx_{3I} - x_{5I} + u_{qI}x_{1I} - Lwx_{2I} \\ C\dot{x}_{4I} &= -Gx_{4I} + x_{2I} - i_{od} + Cwx_{5I} \\ C\dot{x}_{5I} &= -Gx_{5I} + x_{3I} - i_{oq} - Cwx_{4I}. \end{aligned}$$

Considerando una función de almacenamiento de energía, definida como:

$$H(x)_I = \frac{1}{2}x_I^T D_I x_I \quad (7)$$

donde  $D_I := \text{diag}[C_{dc}, L, L, C, C]$  y  $x_I = [x_{1I}, x_{2I}, x_{3I}]^T$ , el sistema anterior se puede escribir como

$$D_I \dot{x}_I = [J(u)_I - R_I]x_I + M_I, \quad (8)$$

con las matrices

$$J(u)_I = \begin{bmatrix} 0 & -u_{dI} & -u_{qI} & 0 & 0 \\ u_{dI} & 0 & Lw & -1 & 0 \\ u_{qI} & -Lw & 0 & 0 & -1 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & Cw \\ 0 & 0 & 1 & -Cw & 0 \end{bmatrix} = -J^T(u)_I,$$

$R_I := \text{diag}[C_{dc}, R, R, G, G]$ ,  $M_I := [I_{dc}, 0, 0, -I_{od}, -I_{oq}]^T$ . Utilizando las relaciones constitutivas (5) y la ecuación (8) el modelo en su forma pH queda dado por:

$$\dot{x}_I = [J(u)_I - R_I] \frac{\partial H(x)_I}{\partial x_I} + M_I \quad (9)$$

### 3.3 Enlace multiterminal VSC-HVDC

El sistema bajo estudio, mostrado en la Fig.1, es tomado de Castro and Acha (2016) para ejemplificar un red HVDC multiterminal compuesta de tres cables con resistencias  $R_{23}$ ,  $R_{25}$  y  $R_{35}$  formando con esto una red de potencia mallada en CC. En términos del modelo,

esta red de CC incrementa la dimensión del estado en tres, pues introduce tres líneas modeladas como circuitos  $RL$  por medio de  $x_{12}$ - $x_{14}$ . Este subsistema tiene como puertos de entrada, los voltajes de los VSR y VSC, respectivamente, y tiene como puertos de salida los voltajes en los nodos 2, 3, 5, denotados por  $v_2, v_3, v_5$ , respectivamente. Así, aunque en el modelo dinámico los estados correspondientes a estas líneas pueden formar parte del modelo completo sin perder la estructura original del sistema, en el análisis de estado estacionario introducirán restricciones algebraicas que deberán satisfacerse.

Por lo tanto, el sistema completo esta conformado por tres VCS trifásicos donde dos van a operar como Rectificadores y uno como Inversor. Cada VSC está conectado a un filtro CA. El modelo no-lineal del enlace multiterminal VSC-HVDC en coordenadas  $dq$  se describe por las siguientes ecuaciones:

$$\begin{aligned} L_1\dot{x}_1 &= -R_1x_1 + L_1w_1x_2 - x_3u_{d1} + V_{d1} \\ L_1\dot{x}_2 &= -L_1w_1x_1 - R_1x_2 - x_3u_{q1} + V_{q1} \\ C_1\dot{x}_3 &= x_1u_{d1} + x_2u_{q1} - G_1x_3 - x_{12} \\ L_2\dot{x}_4 &= -R_2x_4 + L_2w_2x_4 - x_6u_{d2} + V_{d2} \\ L_2\dot{x}_5 &= -L_2w_2x_4 - R_2x_5 - x_6u_{q2} + V_{q2} \\ C_2\dot{x}_6 &= x_4u_{d2} + x_5u_{q2} - G_2x_6 - x_{13} \\ C_4\dot{x}_7 &= -G_4x_7 - u_{d3}x_8 - u_{q3}x_9 + x_{14} \\ L_3\dot{x}_8 &= -R_3x_8 - x_{10} + u_{d3}x_7 + L_3w_3x_9 \\ L_3\dot{x}_9 &= -R_3x_9 - x_{11} + u_{q3}x_7 - L_3w_3x_8 \\ C_3\dot{x}_{10} &= -G_3x_{10} + x_8 - i_{od3} + C_3w_3x_{11} \\ C_3\dot{x}_{11} &= -G_3x_{11} + x_9 - i_{oq3} - C_3w_3x_{10} \\ L_{dc1}\dot{x}_{12} &= -R_{dc1}x_{12} + x_3 - v_2 \\ L_{dc2}\dot{x}_{13} &= -R_{dc2}x_{13} + x_6 - v_3 \\ L_{dc3}\dot{x}_{14} &= -R_{dc3}x_{14} - x_7 + v_5 \end{aligned}$$

Identificando a la función de almacenamiento de energía descrita como:

$$H(x) = \frac{1}{2}x^T D x \quad (10)$$

donde

$$D := \text{bdiag}[D_{11}, D_{22}, D_{33}, D_{44}] \quad (11)$$

con cada submatriz esta formada por:

$$\begin{aligned} D_{11} &:= \text{diag}[L_1, L_1, C_1], \\ D_{22} &:= \text{diag}[L_2, L_2, C_2], \\ D_{33} &:= \text{diag}[C_4, L_3, L_3, C_3, C_3], \\ D_{44} &:= \text{diag}[L_{dc1}, L_{dc2}, L_{dc3}] \end{aligned}$$

y

$$x = [x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6, x_7, x_8, x_9, x_{10}, x_{11}, x_{12}, x_{13}, x_{14}]^T$$

El enlace completo se puede reescribir como:

$$D\dot{x} = [J(u) - R]x + M \quad (12)$$

con la matriz de interconexión:

$$J(u) = \begin{bmatrix} J_{11} & 0 & 0 & J_{14} \\ 0 & J_{22} & 0 & J_{24} \\ 0 & 0 & J_{33} & J_{34} \\ -J_{14}^T & -J_{24}^T & -J_{34}^T & 0 \end{bmatrix} = -J^T(u). \quad (13)$$

En este caso, cada submatriz está dada por:

$$J_{11} = \begin{bmatrix} 0 & L_1 w_1 & -u_{d1} \\ L_1 w_1 & 0 & -u_{q1} \\ u_{d1} & u_{q1} & 0 \end{bmatrix},$$

$$J_{22} = \begin{bmatrix} 0 & L_2 w_2 & -u_{d2} \\ L_2 w_2 & 0 & -u_{q2} \\ u_{d2} & u_{q2} & 0 \end{bmatrix},$$

$$J_{14} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & 0 \end{bmatrix}, J_{24} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 \end{bmatrix}, J_{34} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$J_{33} = \begin{bmatrix} 0 & -u_{d3} & -u_{q3} & 0 & 0 \\ u_{d3} & 0 & L_3 w_3 & -1 & 0 \\ u_{q3} & -L_3 w_3 & 0 & 0 & -1 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & C_3 w_3 \\ 0 & 0 & 1 & -C_3 w_3 & 0 \end{bmatrix}$$

Por su parte, la matriz de disipación  $R$  esta formada por:

$$R := \text{bdiag}[R_{11}, R_{22}, R_{33}, R_{44}] \quad (14)$$

compuesta por las submatrices:

$$\begin{aligned} R_{11} &= \text{diag}[R_1, R_1, G_1], \\ R_{22} &= \text{diag}[R_2, R_2, G_2], \\ R_{33} &= \text{diag}[G_4, R_3, R_3, G_3, G_3], \\ R_{44} &= \text{diag}[R_{dc1}, R_{dc2}, R_{dc3}] \end{aligned}$$

Mientras que la matriz  $M$  es:

$$M := [V_{d1}, V_{q1}, 0, V_{d2}, V_{q2}, 0, 0, 0, 0, -i_{od3}, -i_{oq3}, -V_2, -V_3, V_5]^T$$

Finalmente, utilizando las relaciones constitutivas (5) y la ecuación (12) podemos reescribir el sistema pH como:

$$\dot{x} = [J(u) - R] \frac{\partial H(x)}{\partial x} + M \quad (15)$$

Debe notarse que uno de los beneficios que ofrece esta perspectiva de modelado, en particular el modelo (12) o equivalentemente (15), es que es independiente del tamaño de la red. Lo anterior, queda evidenciado en que aún cuando se consideran una red más grande, la estructura de (4) y (8) se conserva en (15).

Asimismo, gracias a la estructura de los sistemas pH, el efecto de cada variable en la interconexión, en la disipación de energía y el efecto de la entrada de control queda evidenciado. Más aún, si se requiere diseñar un controlador basado en conceptos energéticos, la función Hamiltoniana puede utilizarse como función candidata de Lyapunov bajo ciertas suposiciones.

#### 4. EVALUACIÓN NUMÉRICA

Para evaluar el enlace completo mostrado en la Fig. 1, cada VSC se considera operar a 2000 [MVA], 230[kV] y 50[Hz]. Los valores de los parámetros se pueden consultar en Apéndice A. La comparación con el modelo

matemático se hizo por medio de la librería Simscape de MATLAB/Simulink. Los resultados obtenidos se muestran en las siguientes figuras.

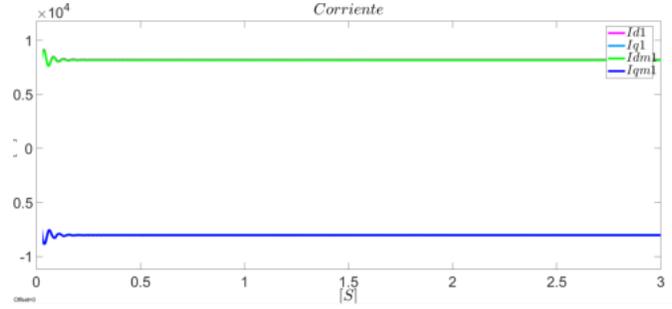


Fig. 4. Corriente en CA del primer VSR

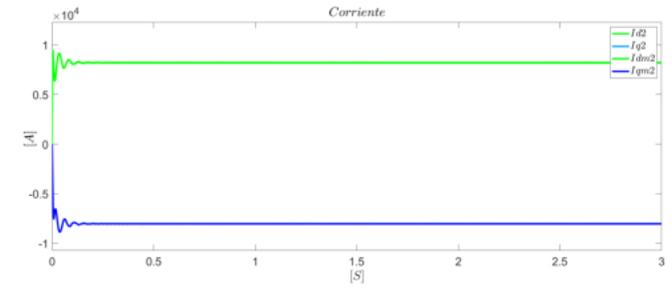
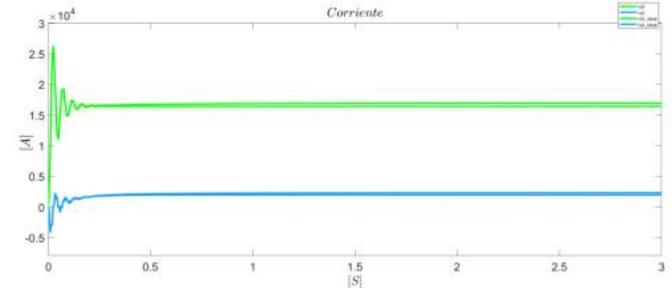
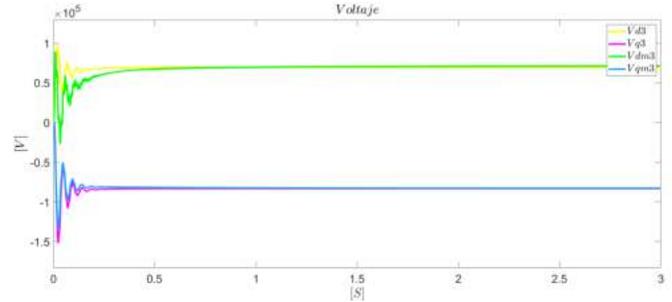


Fig. 5. Corriente en CA del segundo VSR



(a) Corriente en CA



(b) Voltaje en CA

Fig. 6. Corriente y voltaje en CA del VSC inversor

En cada una de las gráficas se observa cómo la solución de las ecuaciones diferenciales dadas por (15) convergen al mismo valor que las variables de la planta eléctrica

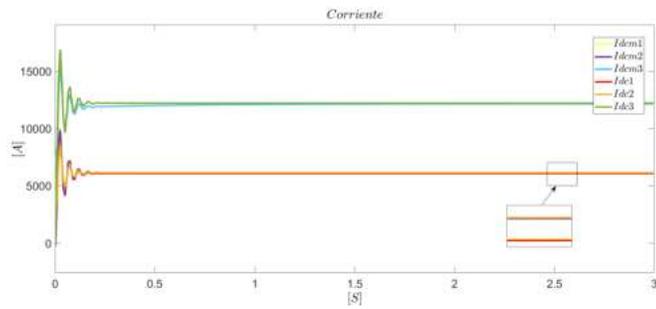


Fig. 7. Corriente en CC de las líneas de Transmisión

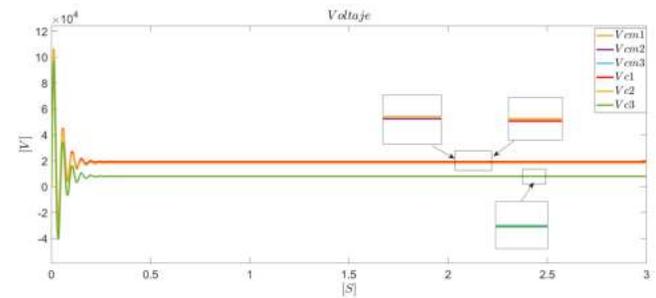


Fig. 8. Voltaje de los capacitores en CC

modelada por medio del Simscape de Simulink. En particular, las gráficas mostradas en la Fig. 4. y la Fig. 5. muestran las corrientes de los VSR en coordenadas  $dq$ . En ambos casos, los valores de las corrientes obtenidas por medio del modelo, coinciden con las obtenidas por medio de Simscape. El mismo resultado se obtiene para el caso del inversor, cuyas gráficas de corrientes y voltajes de salida, en coordenadas  $dq$ , se observan en la Fig. 6. Finalmente, la Fig.7. y la Fig.8. están dedicadas a la parte del sistema que opera en CC.

## 5. CONCLUSIONES

Una de las ventajas de tener el modelo no-lineal del enlace multiterminal VSC-HVDC representado en su forma pH es que no importa el tamaño de la red, ya que gracias a su estructura la inclusión de nuevos buses y VSC's se hace de manera sistemática. En este mismo sentido el esfuerzo computacional se ve reducido. Otra ventaja de la representación pH es que se pueden diseñar esquemas de control de una manera constructiva, como los controladores basados en pasividad.

## REFERENCES

Castro, L.M. and Acha, E. (2016). A unified modeling approach of multi-terminal vsc-hvdc links for dynamic simulations of large-scale power systems. *IEEE Transactions on Power Systems*, 31(6), 5051–5060.

Dong, Y., Ma, J., Wang, S., Liu, T., Chen, X., and Huang, H. (2021). An accurate small signal dynamic model for lcc-hvdc. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 31(8), 1–6.

Gil-Gonzalez, W., Montoya, O.D., and Garces, A. (2019). Direct power control for vsc-hvdc systems: An application of the global tracking passivity-based pi approach. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 110, 588–597.

Grdenić, G., Delimar, M., and Beerten, J. (2020). Assessment of ac network modeling impact on small-signal stability of ac systems with vsc hvdc converters. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 119, 105897.

Irina Stan, A. and Ioan Stroe, D. (2010). *Control of VSC-based HVDC transmission system for offshore wind power plants*. Ph.D. thesis, Master thesis. Aalborg University, Denmark.

Lin, X., Guo, Q., Guo, H., Huang, L., Chen, Q., and Li, S. (2019). Simulation modeling and ac system fault control strategy for the multi-terminal hybrid hvdc system based on rtds. In *2019 IEEE Sustainable Power and Energy Conference (iSPEC)*, 337–341. IEEE.

Roengriang, S., Pongyart, W., and Vanichchanunt, P. (2020). Study of three phase vsc models for controller design by using port-controlled hamiltonian. In *2020 17th International Conference on Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology (ECTI-CON)*, 656–659. IEEE.

Ting, W., Chen-Qing, W., Xing-Hua, H., Wei, H., and Guo-Bing, S. (2016). Exploration of simplified modeling method applied to vsc-hvdc converter. In *2016 China International Conference on Electricity Distribution (CICED)*, 1–5. IEEE.

Van Der Schaft, A., Jeltsema, D., et al. (2014). Port-hamiltonian systems theory: An introductory overview. *Foundations and Trends® in Systems and Control*, 1(2-3), 173–378.

Yu, J., Karady, G.G., and Gu, L. (2012). Applications of embedded hvdc in power system transmission. In *2012 Power Engineering and Automation Conference*, 1–6. IEEE.

Zonetti, D., Ortega, R., and Benchaib, A. (2015). Modeling and control of hvdc transmission systems from theory to practice and back. *Control Engineering Practice*, 45, 133–146.

## Appendix A. PARÁMETROS

Para el VSR se utilizó  $R = 0.0375[\Omega]$ ,  $L = 0.01194[H]$ ,  $G = 8 \times 10^{-5} [\Omega]$ ,  $C = 280 \times 10^{-6} [F]$ ,  $w=50[Hz]$ . Para el VSC inversor se utilizó  $R = 0.00375\Omega$ ,  $G = G_{dc} = 8 \times 10^{-5}[\Omega]$ ,  $L=0.01194 [H]$ ,  $C_{dc}=280 \times 10^{-6} [F]$ ,  $C = 848.8 \times 10^{-6}$   $w=50[Hz]$ . Respecto al enlace multiterminal VSC-HVDC, para las resistencias ( $R_{23}, R_{25}, R_{35}$ ) se utiliza  $1.39 \times 10^{-2}[\frac{\Omega}{km}]$  con 75[km], 100[km] y 150 [km] respectivamente.  $R_1 = R_2 = R_3 = 0.019844 [\Omega]$ ,  $L_1 = L_2 = L_3 = 0.01194 [H]$ ,  $C_1 = C_2 = C_3 = 8 \times 10^{-5}[F]$ ,  $C_4 = 848.8 \times 10^{-6} [F]$ ,  $G_1 = G_2 = G_3 = G_4 = 8 \times 10^{-5} [\Omega]$ ,  $w_1 = w_2 = w_3 = 50[Hz]$ ,  $R_{dc1} = R_{dc2} = R_{dc3} = 0.025 [\Omega]$ ,  $L_{dc1} = L_{dc2} = L_{dc3} = 28.36 \times 10^{-6}[H]$ .