

Evaluation of a passive-based controller for power monitoring in networks of High Voltage Transmission Lines in Direct Current with Voltage Source Converters (VSC–HVDC)

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

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

Abstract:

In this paper a tracking Passivity-based Control (PBC) for a multiterminal Voltage Source Converter based High Voltage Direct Current Network (VSC–HVDC) is evaluated. First, the system (an actual multiterminal HVDC) described as a Port Hamiltonian (PH) System and the controller are presented and subsequently three scenarios are proposed to evaluate the closed-loop behavior, namely: (i) load changes; (ii) generation changes and, (iii) DC-bus changes. Numerical simulations are carried out and results shown the robustness of the closed-loop to cope with these common disturbances.

Keywords: VSC–HVDC links, port–Hamiltonian systems, Passivity–based control, power tracking.

1. INTRODUCCIÓN

El transporte de energía eléctrica por medio de Líneas de Transmisión de Alta Tensión en Corriente Directa (HVDC, por sus siglas en inglés) presenta numerosas ventajas técnicas, por ejemplo, se implementan en lugares donde la generación y el consumo están muy alejados uno del otro, reduciendo las pérdidas; permiten conectar dos redes eléctricas de AC que no operan a la misma frecuencia, entre otras (Kangwa et al. (2017)). Existen diferentes configuraciones de enlaces HVDC, pero una que ha mostrado su valía es la basada en Convertidores de Fuente de Voltaje conocidas como VSC–HVDC. Estos enlaces están compuestos por dos convertidores, uno que funciona como rectificador y el otro como inversor y, dependiendo de la necesidad, se conectan en una configuración *back-to-back* o mediante un cable de DC, como se muestra en la Fig. 1. El objetivo principal de un enlace de este tipo es transmitir potencia de DC constante de una estación rectificadora a otra estación inversora y, si los convertidores se asumen sin pérdidas, el flujo de potencia de DC debe ser igual a la potencia que llega al sistema de AC menos las pérdidas de transmisión en el cable de DC. Cabe señalar que durante la operación,

cada convertidor puede tener control de potencia reactiva independiente (Acha et al. (2004)).

Con respecto a su funcionamiento, los dos convertidores VSC tienen la capacidad de controlar la cantidad de potencia activa inyectada a los nodos de AC respectivos y de controlar el voltaje o la potencia reactiva inyectada en sus nodos de conexión. Para garantizar una operación adecuada del enlace HVDC es necesario controlar al sistema y garantizar su correcta operación en estado estacionario y sujeto a perturbaciones. El control generalmente es indirecto y hace uso de mediciones de potencia activa y reactiva para su cálculo, lo que lo puede llegar a hacer lenta la respuesta (Wang et al. (2014)). Así, por ejemplo, se ha empleado el control por Modos Deslizantes Predictivos (Musa et al. (2018)), que combina el control predictivo, los modos deslizantes y una estrategia de enjambre de partículas. Cabe señalar que el castaño producido por los modos deslizantes no es lo deseable para cuando se usa electrónica de potencia. También se ha empleado el control LQ óptimo (dos controladores PI anidados), usando modelos de pequeña señal para el sistema (Pradhan et al. (2017)). A pesar del buen desempeño en estado estacionario, cuando existe una perturbación el periodo transitorio se ve degradado. Otra técnica que emplea un modelo de pequeña señal es una basada en Control Predictivo basado en Modelo (Fuchs et al. (2014)), sin embargo, la sintonización no es evidente. Las técnicas de

* Parte de este trabajo fue financiado por el proyecto UNAM-PAPIIT IN117123 y CONACYT CVU:1084240

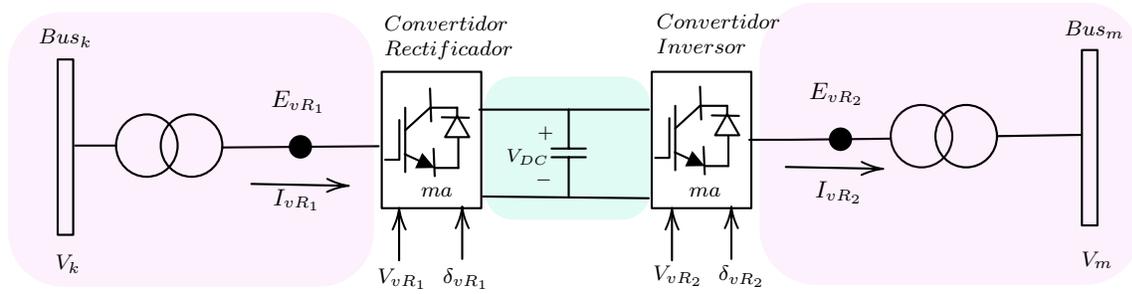


Fig. 1. Esquema de un enlace VSC–HVDC (Acha et al. (2004)).

Control Basado en Pasividad (PBC, por sus siglas en inglés) también han sido empleadas para el control de estas redes, por ejemplo, en (Gil-Gonzalez et al. (2019)) se presenta un control de seguimiento para el control de potencia activa. El resultado es un controlador tipo PI y sus propiedades de convergencia son demostradas usando argumentos tipo Lyapunov.

Aunque se han propuesto diferentes esquemas de control para el sistema VSC–HVDC, en su mayoría sólo se diseña para un único enlace y un solo convertidor. Para una operación correcta del sistema es necesario analizar un enlace HVDC multiterminal que no sólo contenga un VSC como rectificador, si no también otro como inversor. Además, es difícil encontrar en la literatura científica una descripción sistemática de la estructura del sistema que contemple la dinámica presente en la red y que además permita identificar de una manera sencilla la conexión entre cada uno de los dispositivos y, de ser necesario, poder incluir de manera sencilla nuevos elementos a la red.

Con base en lo anterior, en este trabajo se presenta la evaluación de un esquema de control por retroalimentación de estados que asegura la estabilidad del sistema y que resuelve dos problemas: (i) garantizar la regulación de voltaje en los nodos de Corriente Continua y (ii) garantizar el seguimiento de potencia demandada por la carga a pesar de que en la red se presenten diferentes cambios logrando tener una respuesta rápida y sin necesidad del disparo de las protecciones del sistema. Se emplea un modelo matemático no-lineal representado como un sistema Puerto-Hamiltoniano que describe un enlace multiterminal VSC–HVDC real (Trejo-Guerra M (2022)), en donde los VSC son trifásicos de dos niveles que constan de un puente trifásico formado por interruptores de potencia IGBT, controlados a través de señales de conmutación como las señales PWM. Para poder obtener este esquema de control es necesario tener ciertas consideraciones como son, que el estado esté disponible para su medición, determinar las trayectorias deseadas y construir la salida pasiva. Cabe señalar que el controlador basado en pasividad que se utiliza a lo largo del artículo es descentralizado ayudando a que la sintonización sea más sencilla.

2. PRELIMINARES

2.1 Modelo del sistema VSC–HVDC

Bajo la consideración de que la frecuencia de conmutación es mucho mayor (al menos de 10 veces) que la frecuencia del sistema, es posible considerar el modelo promediado para cada uno de los VSC. Así, el sistema bajo estudio es un enlace VSC–HVDC multiterminal mostrado en la Fig. 2, que tiene una representación Hamiltoniana en coordenadas $dq0$ ((Trejo-Guerra M, 2022)) de la forma

$$D\dot{x} = [J(u) - R]x + M \quad (1)$$

donde

$$D := \text{bdiag}[D_{11}, D_{22}, D_{33}, D_{44}], \quad (2)$$

$$D_{11} := \text{diag}[L_1, L_1, C_1], D_{33} := \text{diag}[C_4, L_3, L_3, C_3, C_3].$$

$$D_{22} := \text{diag}[L_2, L_2, C_2], D_{44} := \text{diag}[L_{dc1}, L_{dc2}, L_{dc3}]$$

$y = [x_1, x_2, \dots, x_n]^T$ con $n = 14$. La matriz de interconexión es de la forma

$$J(u) = \begin{bmatrix} J_{11} & 0 & 0 & J_{14} \\ 0 & J_{22} & 0 & J_{24} \\ 0 & 0 & J_{33} & J_{34} \\ -J_{14}^T & -J_{24}^T & -J_{34}^T & 0 \end{bmatrix} = -J^T(u) \quad (3)$$

con cada submatriz dada por:

$$J_{11} = \begin{bmatrix} 0 & L_1 w & -u_{d1} \\ -L_1 w & 0 & -u_{q1} \\ u_{d1} & u_{q1} & 0 \end{bmatrix}, J_{22} = \begin{bmatrix} 0 & L_2 w & -u_{d2} \\ -L_2 w & 0 & -u_{q2} \\ u_{d2} & u_{q2} & 0 \end{bmatrix},$$

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

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

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

$$R := \text{bdiag}[R_{11}, R_{22}, R_{33}, R_{44}] > 0 \quad (4)$$

donde cada submatriz contiene a los elementos disipativos correspondientes y son de la forma:

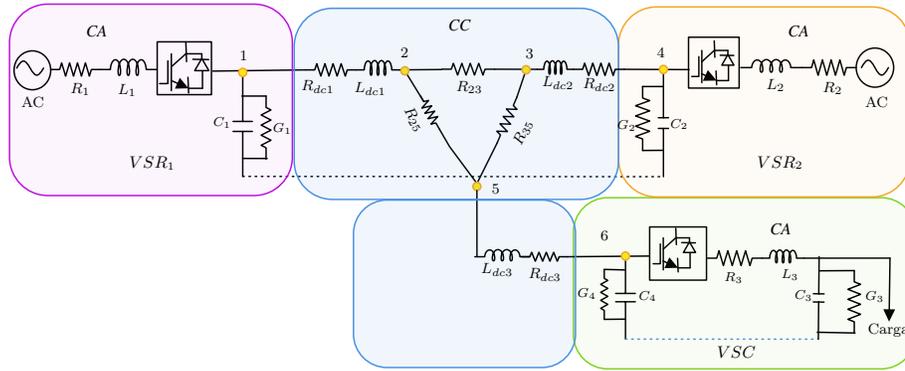


Fig. 2. Enlace multiterminal VSC-HVDC

$$R_{11} = \text{diag}[R_1, R_1, G_1], R_{33} = \text{diag}[G_4, R_3, R_3, G_3, G_3]$$

$$R_{22} = \text{diag}[R_2, R_2, G_2], R_{44} = \text{diag}[R_{dc1}, R_{dc2}, R_{dc3}]$$

Mientras que la matriz M es:

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

A lo largo del artículo, se usará la siguiente notación para las variables de estado, correspondiente a la Fig.2:

x_1, x_2	Corriente que sale del filtro RL del VSR1 en coordenadas d y q , respectivamente
x_3	Voltaje del capacitor en CC 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 CC del VSR2
x_7	Voltaje del capacitor en CC del VSC
x_8, x_9	Corriente que sale del filtro RL del VSC 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 CC del VSR1
x_{13}	Corriente en CC del VSR2
x_{14}	Corriente en CC del VSC inversor
u_d, u_q	Señal de control en coordenadas dq

2.2 Esquema de control

La Fig. 3 se muestra la implementación del esquema de control bajo estudio. Éste es un controlador por retroalimentación de estados que se implementa en una planta que representa un enlace multiterminal VSC-HVDC dado por la expresión (1).

Como se demuestra en (Trejo Guerra (2023)), bajo la suposición de que todos los parámetros son constantes y conocidos y que el estado está disponible para su medición, el sistema (1) en lazo cerrado con la ley de control

$$u = -K_p y + K_i z + u^* \quad (5a)$$

$$\dot{z} = -y \quad (5b)$$

garantiza que

$$\lim_{t \rightarrow \infty} [x - x^*] = 0 \quad (6)$$

mientras se asegura la estabilidad interna.

En (5) se tiene: $K_p = K_p^T \in \mathbb{R}^{6 \times 6} > 0$, $K_i = K_i^T \in \mathbb{R}^{6 \times 6} > 0$, y es la salida pasiva del sistema en lazo cerrado, u^* es el vector de entradas que genera las referencias x^* .

Para la implementación es necesario, primero, hacer el cálculo de las trayectorias deseadas (referencia) x^* , que son funciones derivables, acotadas y cumplen con

$$0 = [J(u^*) - R]x^* + M \quad (7)$$

para alguna señal de control $u^* \in \mathbb{R}^6$.

Estas trayectorias dependen del modo de operación de cada convertidor (rectificador o inversor). Como puede observarse en la Fig. 2, en este caso el VSR1 es un convertidor de potencia slack (VSC_{Slack}) que tiene como objetivo que $V_c = V_c^*$, VSR2 es un convertidor de potencia programada (VSC_{Psch}) que tiene como objetivo $P_{cc} = P_{cc}^*$, VSC es un convertidor potencia pasivo (VSC_{Pass}) que debe garantizar $P_{ac} = P_{ac}^*$ además de asegurar que la potencia reactiva deseada de cada convertidor sea igual a cero (aunque es posible que está potencia sea diferente de cero).

El error de seguimiento se define como

$$\tilde{x} = x - x^* \quad (8)$$

y al emplear la ecuación de las trayectorias admisibles (7) y el sistema (1) se obtiene

$$D\dot{\tilde{x}} = (J(u) - R)\tilde{x} + G(x^*)\tilde{u} \quad (9)$$

con $\tilde{u} = u - u^*$. La salida pasiva se define entonces como

$$y = G^T(x^*)\tilde{x} \quad (10)$$

donde la matriz $G(x^*) \in \mathbb{R}^{14 \times 6}$ es de la forma

$$G(x^*) = \begin{bmatrix} J_1 x^* & J_2 x^* & J_3 x^* & J_4 x^* & J_5 x^* & J_6 x^* \end{bmatrix} \quad (11)$$

3. RESULTADO PRINCIPAL

En esta sección se presenta la evaluación del esquema de control propuesto en un enlace multiterminal VSC-

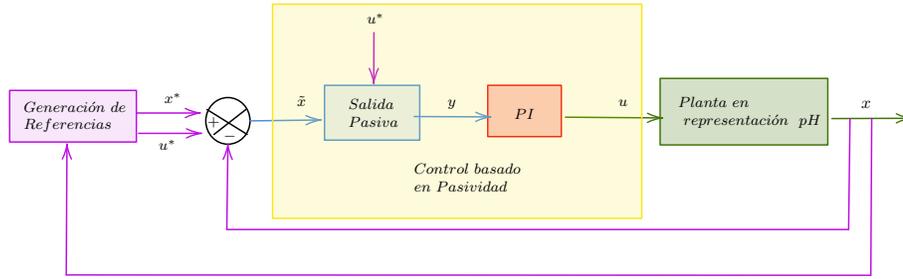


Fig. 3. Esquema de Control

HVDC para garantizar el seguimiento de potencia. Siguiendo el esquema de la Fig. 3, la planta considerada es la mostrada en la Fig. 2 y considerando el modo de operación de cada VSC, en donde el $VSR1$ es el VSC_{Slack} , el $VSR2$ es VSC_{Psch} y el VSC es VSC_{Pass} . Cada VSR opera a una potencia de 20 [p.u], voltaje de 23 [p.u], frecuencia de 50 [Hz]; el VSC tiene una carga de 0.5 [p.u] y una frecuencia de 50[Hz]. Todos los valores de los parámetros se presentan en el Apéndice A.

La evaluación considera tres escenarios diferentes de operación: (i) el sistema está en estado estacionario y en algún momento se presenta un cambio súbito considerable en la carga; este cambio tiene una magnitud tal que no obliga el disparo de las protecciones del sistema pero sí obliga una respuesta rápida del control; (ii) el sistema está en estado estacionario y se presenta una disminución severa en una unidad de generación, tal que no dispare las protecciones del sistema y (iii) a partir del estado estacionario se presenta una perturbación en el bus de CC. Para cada uno de los casos, los valores en estado estacionario (valores deseados) de los voltajes en CC son $VSC_{Slack} = 1[p.u]$, $VSC_{Psch} = 1.087[p.u]$, $VSC_{Pass} = 1.011[p.u]$ y para el seguimiento de potencia demandada por la carga es $VSC_{Slack} = -0.8875[p.u]$, $VSC_{Psch} = 1.5[p.u]$, $VSC_{Pass} = -0.5[p.u]$ (el signo de las corrientes deseadas pueden modificar la dirección de la potencia), con la potencia reactiva igual a cero para los tres convertidores.

Para la sintonización del controlador tenemos que $K_p = K_p^T \in \mathbb{R}^{6 \times 6} > 0$ en donde k_{p1} y k_{p2} son las ganancias que afectan al convertidor VSC_{Slack} , k_{p3} y k_{p4} son las ganancias que afectan al convertidor VSC_{Psch} y k_{p5} y k_{p6} son las ganancias que afectan al convertidor VSC_{Pass} . Mientras que las ganancias $K_i = K_i^T \in \mathbb{R}^{6 \times 6} > 0$ en donde K_p , k_{i1} y k_{i2} son las ganancias que afectan al convertidor VSC_{Slack} , k_{i3} y k_{i4} son las ganancias que afectan al convertidor VSC_{Psch} y k_{i5} y k_{i6} son las ganancias que afectan al convertidor VSC_{Pass} . En este artículo los valores de las ganancias son $K_p = \text{diag}[0.07, 0.07, 0.08, 0.08, 0.7, 0.7]$ y $K_i = \text{diag}[5, 5, 7, 7, 9, 9]$.

A diferencia de otros Convertidores de Potencia, se puede observar que el valor de las ganancias para cada convertidor puede ser diferente entre ellas haciendo que la sintonización del enlace VSC–HVDC sea más sencilla.

Caso 1: La demanda de carga es de 0.5[p.u]. Se presenta un aumento de carga del 10 % en el primer segundo con una duración de 0.1[s]. La Fig. 4 muestra el comportamiento de las variables de control. En la Fig. 4a se ob-

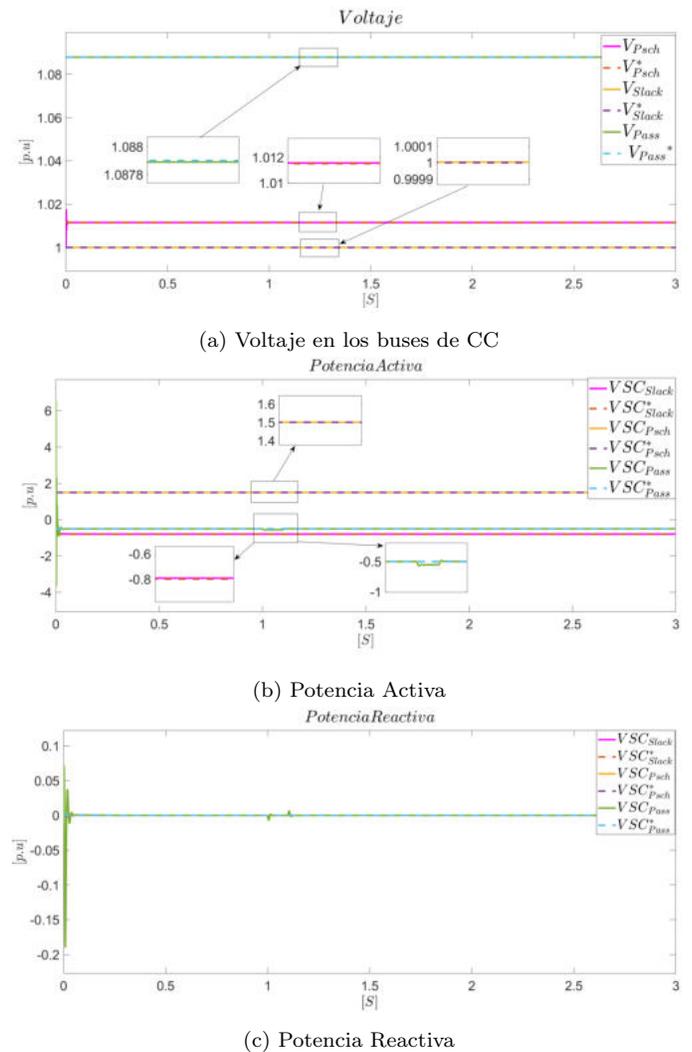


Fig. 4. Caso 1

serva la regulación de voltaje de los buses de CC, en donde los valores deseados x^* y las las señales de referencia

convergen al valor estacionario. La potencia demandada por la carga se presenta en la Fig. 4b. Puede observarse la convergencia a los valores deseados y, además, que la perturbación prácticamente no afecta el seguimiento. En la Fig. 4c se observa como la potencia reactiva se mantiene el cero, como es deseado en estos experimentos.

Caso 2: Se presenta una pérdida de generación del 10% que se modela como un pulso de duración de 0.1[s] que comienza en 1[s]. La regulación de voltaje en los buses de CC se presenta en la Fig. 5a. Aquí se observa como los valores de los buses de CC convergen a sus valores deseados. Se observa que la perturbación solo afecta al voltaje del bus VSC_{Slack} , que es el bus asociado al convertidor que esta conectado a la primera fuente de generación. El seguimiento de la potencia demandada por la carga se presenta en las figuras Fig. 5b y Fig. 5c.

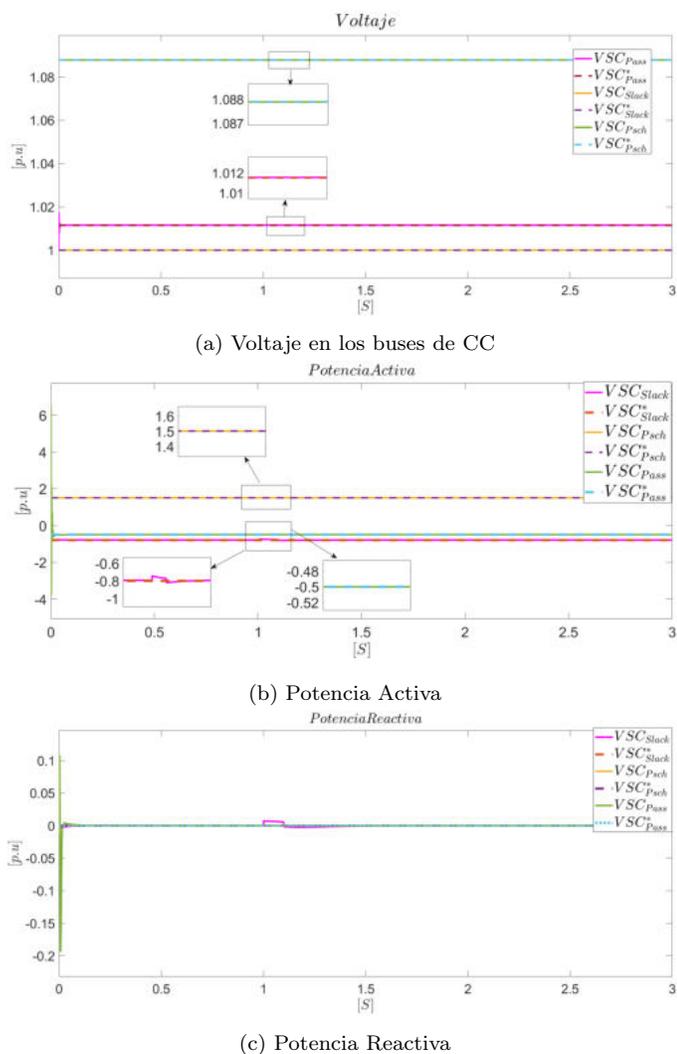


Fig. 5. Caso 2

Es posible observar en la Fig. 5b que se satisface la demanda de la carga. Se puede observar que la pérdida de generación sí introduce un periodo transitorio en la

carga, pero el controlador es capaz de lidiar con este cambio y garantiza la regulación en valores permitidos. Esta perturbación también afecta a la potencia reactiva, (Fig. 5c), pero en un porcentaje menor al 0.05% (casi imperceptible).

Caso 3: La perturbación modela un aumento en el voltaje de CC del 10 % y tendrá una duración de 0.1[s]. En la Fig. 6a se observa la regulación de voltaje en los buses de cc, en donde la perturbación afecta solamente al voltaje del convertidor VSC_{Psch} , sin embargo los valores logran converger a los valores deseados.

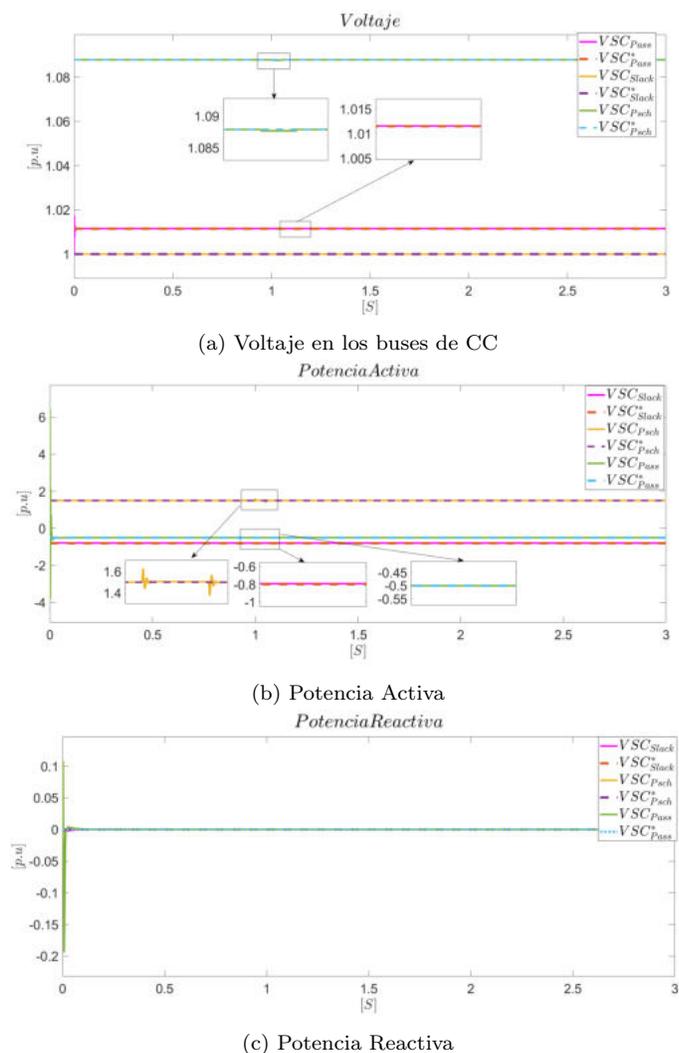


Fig. 6. Caso 3

En la Fig. 6b se presenta la potencia activa, en donde se observa como el sistema llega al estado estacionario y se presenta la perturbación que se encuentra en el nodo 3 (ver en Fig. 2) y afecta solamente al convertidor de potencia programada (VSC_{Psch}), sin embargo, a pesar de esta perturbación las variables logran converger a los valores deseados.

Por último, la Fig. 6c muestra la potencia reactiva, en donde se observa que la perturbación presente no afecta a la potencia reactiva, logrando que los valores converjan a los deseados.

Observaciones: El controlador de la red es descentralizado, esto es, sólo ocupa señales locales para operar, facilitando la adquisición de las señales y la simplicidad de controlador. Esto se puede observar mejor en el caso del sistema perturbado, es decir, dependiendo de donde se encuentra la perturbación solo va a afectar a las variables asociadas al convertidor conectado, por ejemplo en el primer caso en que la perturbación solo afecta a la carga, las variables afectadas son el voltaje en CC del VSC_{Pass} (Fig. 4a), la potencia Activa del VSC_{Pass} (Fig. 4b) y la potencia Reactiva del VSC_{Pass} (Fig. 4c) esto se debe a que la carga esta conectada al convertidor que opera como inversor (VSC).

Si la perturbación afecta a una de las fuentes de generación, como es el Caso 2 en donde afecta a la primera fuente de generación VSC_{Slack} las variables afectadas son las asociadas a este convertidor que opera como rectificador como se observa en la Fig. 5a en la que afecta al voltaje en corriente continua, en la Fig.5b afecta a la potencia activa del VSC_{Slack} y en la Fig.5c que afecta a la potencia reactiva del VSC_{Slack} . Lo mismo pasaría si afectara a la primera fuente de generación, solo que las variables afectadas serían las asociadas al VSC_{Psch} . Cabe señalar que, además de las ventajas anteriores, este esquema de control también permite considerar una potencia reactiva diferente de cero y la inversión del flujo de potencia. El controlador basado en pasividad propuesto es robusto ante cualquiera de estas perturbaciones, su sintonización es simple debido a que es descentralizado logrando los objetivos de control.

4. CONCLUSIONES

El objetivo principal de este trabajo de investigación es el evaluar el esquema de control propuesto que resuelva dos problemas: el primero es la regulación de voltaje en los buses de Corriente Continua y el segundo es el seguimiento de la potencia demandada por la carga, teniendo en cuenta las necesidades de potencia de cada uno de los convertidores logrando obtener un control descentralizado. Una de las ventajas de tener el esquema de control propuesto es que se puede observar de manera detallada los requerimientos necesarios para cumplir con el objetivo que son el poder medir el estado, tener las trayectorias deseadas y formar la salida pasiva del enlace completo. Otra ventaja es que las soluciones numéricas muestran la robustez del controlador, ya que la respuesta rápida del controlador ante los diferentes cambios que puedan presentarse en los enlaces VSC-HVDC siempre y cuando estos cambios eviten el disparo de las protecciones del sistema. Como trabajo a futuro sería que ahora en el esquema de control se pueda diseñar estas trayectorias deseadas de forma eficiente y obtener las propiedades de

convergencia en lazo cerrado utilizando argumentos tipo Lyapunov.

REFERENCES

- Acha, E., Fuerte-Esquivel, C.R., Ambriz-Perez, H., and Angeles-Camacho, C. (2004). *FACTS: modelling and simulation in power networks*. John Wiley & Sons.
- Fuchs, A., Imhof, M., Demiray, T., and Morari, M. (2014). Stabilization of large power systems using vsc-hvdc and model predictive control. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 29(1), 480–488. doi: 10.1109/TPWRD.2013.2280467.
- 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.
- Kangwa, N.M., Venugopal, C., and Davidson, I.E. (2017). A review of the performance of vsc-hvdc and mt dc systems. In *2017 IEEE PES PowerAfrica*, 267–273. doi:10.1109/PowerAfrica.2017.7991235.
- Musa, A., Sabug, L.R., and Monti, A. (2018). Robust predictive sliding mode control for multiterminal hvdc grids. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 33(4), 1545–1555.
- Pradhan, J.K., Ghosh, A., and Bhende, C. (2017). Small-signal modeling and multivariable pi control design of vsc-hvdc transmission link. *Electric Power Systems Research*, 144, 115–126. doi: https://doi.org/10.1016/j.epsr.2016.11.005.
- Trejo Guerra, M.M. (2023). *Control de Convertidores VSC para la regulación de potencia en redes HVDC*. Ph.D. thesis, Tesis de Maestría, UNAM, Ciudad de México.
- Trejo-Guerra M, Avila-Becerril S, M.O.P. (2022). Modeling of multi terminal vsc-hvdc links using port-hamiltonian systems. *Memorias del Congreso Nacional de Control Automático*, 127–132, 2022. doi:ISSN: 2594-2492.
- Wang, W., Beddard, A., Barnes, M., and Marjanovic, O. (2014). Analysis of active power control for vsc-hvdc. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 29(4), 1978–1988. doi:10.1109/TPWRD.2014.2322498.

Appendix A. PARÁMETROS

El voltaje base es $100e^3[V]$ y la potencia base es $100e^6[W]$. Para el VSR: $R = 0.75e^{-3}[p.u.]$, $L = 2.387e^{-4}[p.u.]$, $G = 4e^{-3}[p.u.]$, $C = 0.2264[p.u.]$, $f = 50[Hz]$. Para el VSC inversor: $R = 0.75e^{-3}[p.u.]$, $G = G_{dc} = 4e^{-3}[p.u.]$, $L = 2.387e^{-4}[p.u.]$, $C_{dc} = 0.2264[p.u.]$, $C = 0.0424[p.u.]$, $f = 50$. Respecto al enlace multiterminal VSC-HVDC, las resistencias son (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. $R_1 = R_2 = R_3 = 5e^{-4}[p.u.]$, $L_1 = L_2 = L_3 = 5.67e^{-7}[p.u.]$, $G_1 = G_2 = G_3 = G_4 = 4e^{-3}[p.u.]$, $R_{dc1} = R_{dc2} = R_{dc3} = 0.75e^{-3}[p.u.]$, $L_{dc1} = L_{dc2} = L_{dc3} = 2.387e^{-4}[p.u.]$.