

A Passivity-based direct power control scheme of a back to back – NPC converter

Frank Loredo* Homero Miranda-Vidales*
Ricardo Alvarez-Salas* Víctor Cárdenas*
Mario A. González***

* Centro de Investigación y Estudios de Posgrado, FI-UASLP, (e-mail: hmirandav{ralvarez,mgonzalez,vcardena}@uaslp.mx).

** Investigador cátedra CONAHCyT.

Abstract: In this paper, a direct power control (DPC) is proposed in order to improve the power dispatch in electrical power grids, as well as in microgrids. The objective of defining the active power and reactive power as state variables is to get a representation of the first level in a hierarchical control. The DPC model is studied under passivity rules, and an implementation of passivity-based control is proposed. Simulations are carried out to show the effectiveness of the proposed research.

Keywords: Active front end, high voltage dc transmission, active power, reactive power, passivity-based control, direct power control.

1. INTRODUCCIÓN

Actualmente los convertidores multinivel con punto neutral de enclavamiento (NPC) son ampliamente utilizados como acondicionadores estáticos de potencia (STAT-COM), sistemas FACTS y forman parte de los esquemas de conversión de energías alternativas en redes eléctricas inteligentes y microrredes (Akagi (2017)). De forma general se puede definir a una microrred como un sistema que se alimenta, principalmente, de recursos energéticos distribuidos y en el cual se conectan múltiples cargas eléctricas. Las microrredes operan como una red autónoma ya sea interconectada o aislada de la red pública (Lasseter (2001)); y se componen de convertidores electrónicos de potencia empleados para la conversión de energía obtenida de fuentes de generación fotovoltaica, eólica, celdas de combustible, bancos de baterías, entre otras (Guerrero et al. (2011)). Las microrredes, básicamente, se clasifican en microrredes en *ca*, *cd* e híbridas. Éstas se conectan al sistema eléctrico mediante un convertidor Back to Back (BtB), con el cual se puede mantener el flujo bidireccional de potencia activa entre dos o más sistemas interconectados (a través del concepto de redes multiterminal). La presencia de un enlace de corriente directa (bus de *cd*) da la posibilidad de conectar una microrred en *cd*, o sistemas de almacenamiento de energía. En (Vijay et al. (2021)) se presenta un emulador de red basado en un convertidor BtB para el análisis de una microrred mediante simuladores en tiempo real y así verificar el caso de microrredes desbalanceadas con alta penetración de convertidores monofásicos. El control está basado en el esquema droop y realiza un análisis de las componentes

de secuencia positiva y negativa; sin embargo, el esquema de control se compone de múltiples lazos lo que propicia tiempos de respuesta lentos. Un modelo en pequeña y gran señal se desarrolla en (Naderi et al. (2020a) y Naderi et al. (2020b)), donde se realiza un análisis detallado para obtener un modelo válido y generalizado. Modelos que se emplean para el estudio de microrredes autónomas interconectadas mediante un convertidor BtB. Un convertidor BtB, compuesto de inversores/rectificadores fuente de corriente, se propone y analiza en (Guo et al. (2015)), dada la complejidad de controlar el encendido y apagado de los interruptores en el convertidor, la estrategia de conmutación propuesta es la modulación por espacios vectoriales (SVM), con lo que garantizan una reducción considerable en los rizados de corriente ocasionados por la operación natural del BtB fuente de corriente. El esquema de control está basado en compensadores PI, dedicando el estudio a la técnica de modulación. Una microrred híbrida se estudia en (Majumder et al. (2010)) en la que a través del bus de *cd* se conectan distintas fuentes de energía en corriente directa; demostrando la flexibilidad del uso y manejo de energía; misma que permite el uso de los convertidores BtB. El esquema de control propuesto en los trabajos citados previamente están basados en PIs mostrando tiempos de respuesta altos, limitando la respuesta dinámica en la microrred.

En este trabajo se desarrolla un esquema de control desde el punto de vista del control directo de potencia (DPC), sacando ventaja del modelo y demostrando algunas propiedades que debe cumplir tal que sea posible sintetizar una ley de control basada en pasividad. En la sección 2, se desarrolla el modelo del convertidor BtB formado por

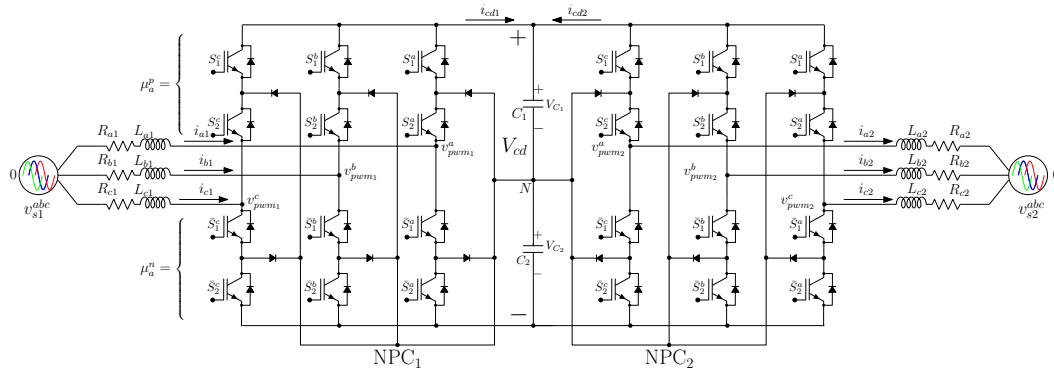


Figura 1. Esquema eléctrico de potencia de una convertidor Back to Back con NPC.

convertidores NPC. El modelo se representa en función de potencias activa y reactiva, para dar pie a la síntesis del esquema de control DPC-PBC. Lo anterior se desarrolla y se presenta en la sección 3. Los resultados de simulación obtenidos en PSIM se muestran en la sección 4 y finalmente las conclusiones se discuten en la sección 5.

2. CONVERTIDORES NPC EN CONFIGURACIÓN BACK TO BACK

La figura 1 muestra un sistema de interconexión mediante dos NPC en modo Back to Back (BtB). Ambos convertidores NPC comparten un bus de corriente directa (cd), formado por dos condensadores.

2.1 Modelo matemático

Para obtener el modelo matemático del sistema de la figura 1, se asumen las siguiente condiciones:

- La tensión eléctrica en cada una de las fuentes del lado de alterna están balanceadas en magnitud y fase.
- Los dispositivos semiconductores son ideales.
- Las pérdidas por conducción y conmutación se modelan como una resistencia en serie a cada uno de los inductores de enlace.

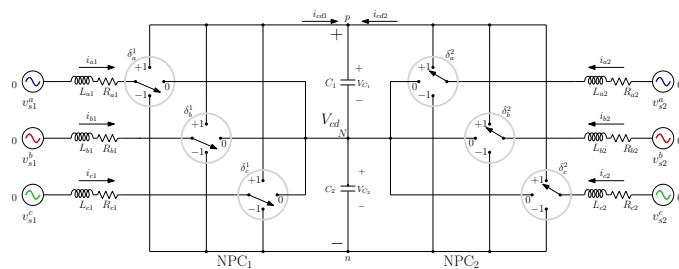


Figura 2. Esquema simplificado del convertidor BtB-NPC.

Para modelar el convertidor es necesario proponer una función de conmutación δ . Tal que, represente el comportamiento de un interruptor de tres posiciones ($\delta_{abc} \in$

$\{-1, 0, 1\}$). La función δ está compuesta de una función de conmutación base que contempla los estados binarios de un interruptor de electrónica de potencia; por lo que se define a μ_{abc}^p y μ_{abc}^n , de modo que $\mu_{abc}^p, \mu_{abc}^n \in \{0, 1\}$. Finalmente, la función δ se describe como $\delta_{abc} = \mu_{abc}^p - \mu_{abc}^n$. Dado lo anterior, el circuito de la figura 1 se simplifica tal como el circuito que se muestra en la figura 2. El circuito de la figura 2 contiene las funciones δ y mediante LK, se obtienen las ecuaciones de malla (por simplicidad, se muestran únicamente las expresiones para un convertidor) de cada una de las fases del sistema,

$$L_a \frac{di_a}{dt} = -R_a i_a - \left[\frac{V_{cd}}{2} (\mu_a^p - \mu_a^n) \right] - V_{N0} + V_s^a, \quad (1)$$

$$L_b \frac{di_b}{dt} = -R_b i_b - \left[\frac{V_{cd}}{2} (\mu_b^p - \mu_b^n) \right] - V_{N0} + V_s^b, \quad (2)$$

$$L_c \frac{di_c}{dt} = -R_c i_c - \left[\frac{V_{cd}}{2} (\mu_c^p - \mu_c^n) \right] - V_{N0} + V_s^c. \quad (3)$$

Con $V_{cd} = V_{c1} + V_{c2}$, $V_{N0} = -\frac{1}{3} \left[\frac{V_{cd}}{2} (\delta_a + \delta_b + \delta_c) \right]$. Por otro lado, las expresiones (4) y (5) se obtienen aplicando LK al bus de cd y en conjunto dan forma a la dinámica del enlace en cd .

$$C_1 \frac{dV_{C1}}{dt} = i_{cd1}^p + i_{cd2}^p, \quad (4)$$

$$C_2 \frac{dV_{C2}}{dt} = -i_{cd1}^n - i_{cd2}^n. \quad (5)$$

Con $i_{cd1}^p = \mu_{a1}^p i_{a1} + \mu_{b1}^p i_{b1} + \mu_{c1}^p i_{c1}$, $i_{cd2}^p = \mu_{a2}^p i_{a2} + \mu_{b2}^p i_{b2} + \mu_{c2}^p i_{c2}$, $i_{cd1}^n = \mu_{a1}^n i_{a1} + \mu_{b1}^n i_{b1} + \mu_{c1}^n i_{c1}$, $i_{cd2}^n = \mu_{a2}^n i_{a2} + \mu_{b2}^n i_{b2} + \mu_{c2}^n i_{c2}$.

Por último, el voltaje (V_{cd}) presente en el bus de cd del sistema interconectado es,

$$C \frac{dV_{cd}}{dt} = (\delta_{a1} i_{a1} + \delta_{b1} i_{b1} + \delta_{c1} i_{c1}) + (\delta_{a2} i_{a2} + \delta_{b2} i_{b2} + \delta_{c2} i_{c2}). \quad (6)$$

Al modelo descrito por (1)–(3) y (6) se le aplica un cambio de coordenadas del marco natural abc al marco de referencia síncrono dq . Por lo que el modelo en dq es,

$$L_1 \frac{di_{d1}}{dt} = -R_1 i_{d1} + \omega_1 L_1 i_{q1} - \frac{1}{2} V_{cd} \delta_{d1} + V_{d1} \quad (7)$$

$$L_1 \frac{di_{q1}}{dt} = -R_1 i_{q1} - \omega_1 L_1 i_{d1} - \frac{1}{2} V_{cd} \delta_{q1} + V_{q1} \quad (8)$$

$$L_2 \frac{di_{d2}}{dt} = -R_2 i_{d2} + \omega_2 L_2 i_{q2} - \frac{1}{2} V_{cd} \delta_{d2} + V_{d2} \quad (9)$$

$$L_2 \frac{di_{q2}}{dt} = -R_2 i_{q2} - \omega_2 L_2 i_{d2} - \frac{1}{2} V_{cd} \delta_{q2} + V_{q2} \quad (10)$$

$$C \frac{dV_{cd}}{dt} = \frac{1}{2} (i_{d1} \delta_{d1} + i_{q1} \delta_{q1}) + \frac{1}{2} (i_{d2} \delta_{d2} + i_{q2} \delta_{q2}) \quad (11)$$

Donde $\{\cdot\}_d$, y $\{\cdot\}_q$, corresponden a las tensiones, corrientes y funciones de conmutación en d y q respectivamente. Una vez obtenido el modelo en el marco dq , el siguiente paso es proponer una ley de control que permita cumplir con los objetivos de control.

3. ESQUEMA DE CONTROL DIRECTO DE POTENCIA (DPC)

Previo al diseño de la ley de control y con el propósito de obtener una representación alterna en términos de potencia activa P (12) y reactiva Q (13), respectivamente, al modelo se le aplica un cambio de variable.

$$P = \frac{3}{2} (v_d i_d + v_q i_q), \quad (12)$$

$$Q = \frac{3}{2} (v_q i_d - v_d i_q). \quad (13)$$

Por otro lado, si se asegura que, tanto las tensiones y corrientes en el sistema de generación se mantienen balanceadas en magnitud y fase; la componente v_q será cero, por lo que finalmente (12) y (13) se reducen a,

$$P = \frac{3}{2} (v_d i_d), \quad Q = -\frac{3}{2} (v_d i_q).$$

Multiplicando ambos lados de (7)–(10) por v_d y ordenando las expresiones resultantes. El modelo en términos de potencias queda como sigue,

$$L_1 \frac{dP_1}{dt} = -R_1 P_1 - \omega_1 L_1 Q_1 - \frac{3}{4} V_{x1} \delta_{d1} + \frac{3}{2} v_{d1}^2, \quad (14)$$

$$L_1 \frac{dQ_1}{dt} = -R_1 Q_1 + \omega_1 L_1 P_1 + \frac{3}{4} V_{x1} \delta_{q1}, \quad (15)$$

$$L_2 \frac{dP_2}{dt} = -R_2 P_2 - \omega_2 L_2 Q_2 - \frac{3}{4} V_{x2} \delta_{d2} + \frac{3}{2} v_{d2}^2, \quad (16)$$

$$L_2 \frac{dQ_2}{dt} = -R_2 Q_2 + \omega_2 L_2 P_2 + \frac{3}{4} V_{x2} \delta_{q2}. \quad (17)$$

Donde: $V_{x1} = v_{d1} V_{cd}$ y $V_{x2} = v_{d2} V_{cd}$. Los términos $\{\cdot\}_1$, y $\{\cdot\}_2$ corresponden a las variables y elementos según el sistema de generación. En el caso de ω , el subíndice da la libertad de que el convertidor BtB–NPC trabaje en modo síncrono ($\omega_1 = \omega_2$) o asíncrono ($\omega_1 \neq \omega_2$).

Por último, para obtener la expresión asociada al bus de cd , es necesario establecer las siguientes condiciones.

- La potencia activa es la misma en ambos convertidores, dado que se requiere transferir de un sistema a otro, por lo tanto $P_1 = P_2 = P$.
- La tensión v_{d1} y v_{d2} se proponen de igual magnitud, por lo tanto, únicamente se define como v_d
- Cada convertidor manejará rangos distintos de potencia reactiva, por lo tanto conservan el subíndice.

Atendiendo las condiciones anteriormente mencionadas; la ecuación asociada al bus de cd es,

$$C \frac{dV_x}{dt} = \frac{3}{4} (P \delta_{d1} - Q_1 \delta_{q1}) + \frac{3}{4} (P \delta_{d2} - Q_2 \delta_{q2}). \quad (18)$$

3.1 Esquema de control basado en pasividad (PBC) para seguimiento de trayectorias

Empleando el modelo descrito por (14)–(18) y aplicando el promediado de las sub-funciones discretas (μ_{dq}) se obtienen las funciones δ_{dq} promedio. Por lo tanto, el modelo se puede reescribir de manera sintética (Ortega and A. Loria (1998)):

$$\mathcal{D}\dot{x} + (\mathcal{C}_R + \mathcal{C}_z)x + \delta\mathcal{M}x = \mathcal{E}, \quad (19)$$

con: $x = [P_1 \ Q_1 \ P_2 \ Q_2 \ V_x]^T$, $\mathcal{D} = \text{diag}\{L_1, L_1, L_2, L_2, C\}$,

Para el caso del convertidor BtB–NPC, las matrices que definen el sistema son:

$$\delta = \text{diag}\{\delta_{d1}, \delta_{q1}, \delta_{d2}, \delta_{q2}, 0\}, \quad \mathcal{E} = \left[\frac{3}{2} V_{d1}^2 \ 0 \ \frac{3}{2} V_{d2}^2 \ 0 \ 0 \right]^T,$$

$$\mathcal{C}_R = \begin{bmatrix} R_1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & R_1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & R_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & R_2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad \mathcal{M} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{3}{4} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{3}{4} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{3}{4} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{3}{4} \\ \frac{3}{4} & -\frac{3}{4} & \frac{3}{4} & -\frac{3}{4} & 0 \end{bmatrix},$$

$$\mathcal{C}_z = \begin{bmatrix} 0 & -\omega_1 L_1 & 0 & 0 & 0 \\ \omega_1 L_1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -\omega_2 L_2 & 0 \\ 0 & 0 & \omega_2 L_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}.$$

donde \mathcal{M} , es una matriz antisimétrica.

En este caso se desea que los estados alcancen un valor deseado x_d , entonces, el error queda definido como $\tilde{x} = x - x_d$. Donde x_d es el valor deseado y x es el valor estimado de la variable de estado. Es necesario definir la ecuación de energía, que se representa como \mathcal{V} , entonces,

$$\mathcal{V} = \frac{1}{2} \tilde{x}^T \mathcal{D} \tilde{x}. \quad (20)$$

Por último la dinámica del sistema en lazo cerrado es,

$$\mathcal{D}\dot{\tilde{x}} + (\mathcal{C}_R + \mathcal{C}_z) \tilde{x} + \delta\mathcal{M}\tilde{x} = \mathcal{E}, \quad (21)$$

y una dinámica auxiliar φ tal que,

$$\varphi = \mathcal{E} - \{\mathcal{D}\dot{\tilde{x}} + (\mathcal{C}_R + \mathcal{C}_z) \tilde{x} + \delta\mathcal{M}\tilde{x}\}. \quad (22)$$

El objetivo es justificar la viabilidad de aplicar un esquema de control basado en pasividad. La estrategia

empleada es bien conocida y se detalla a profundidad en (Ortega and A. Loria (1998)) y (van der Schaft (2000)). Por lo que una vez empleados los criterios de diseño y pruebas necesarias para verificar la propiedades pasivas del sistema; la estructura final del la ley de control es,

$$\delta_{d1} = \varrho \left[L_1 \dot{x}_{1d} + R_1 x_{1d} - \omega_1 L_1 x_{2d} + \frac{3}{2} v_{d1}^2 - k_1 \tilde{x}_1 \right] \quad (23)$$

$$\delta_{q1} = \varrho \left[L_1 \dot{x}_{2d} + R_1 x_{2d} + \omega_1 L_1 x_{1d} - k_2 \tilde{x}_1 \right], \quad (24)$$

$$\delta_{d2} = \varrho \left[L_2 \dot{x}_{3d} + R_2 x_{3d} - \omega_2 L_2 x_{4d} + \frac{3}{2} v_{d2}^2 - k_3 \tilde{x}_3 \right] \quad (25)$$

$$\delta_{q2} = \varrho \left[L_2 \dot{x}_{4d} + R_2 x_{4d} + \omega_2 L_2 x_{3d} - k_4 \tilde{x}_4 \right]. \quad (26)$$

Donde: $\varrho = \frac{4}{3x_{5d}}$, $\tilde{x} = (x - x_d)$. x_{5d} es el valor deseado del bus de cd .

Para la regulación del voltaje en el bus de cd se emplea un control PI, empleando la metodología expuesta en (Miranda et al. (2008)).

4. RESULTADOS DE SIMULACIÓN

En esta sección se exponen algunos resultados obtenidos mediante simulación. Las simulaciones se realizan bajo los siguientes objetivos de control: regulación de voltaje en el bus de cd , potencia reactiva cero, flujo constante de energía y bidireccional. Los parámetros de simulación que se emplean se muestran en la Tabla 1.

Tabla 1. Parámetros de simulación

$v_{s1,2} = 440 V \text{ rms}$	$V_{C1} = V_{C2} = 500 V$
$P = 50 \text{ kW}$	$Q_{1,2} = 0 \text{ VAR}$
$C_{1,2} = 4700 \mu F$	$V_{cd} = 1 \text{ kV}$
$L_1 = 3.2 \text{ mH}$	$R_1 = 0.05 \Omega$
$L_2 = 3.5 \text{ mH}$	$R_2 = 0.06 \Omega$
$m_f = 101$	$f_{(1,2)} = 60 \text{ Hz}$
$k_1 = k_4 = 2$	$k_2 = k_3 = 4$
$k_p^{V_{cd}} = 4.334$	$T_i^{V_{cd}} = 0.02173$

4.1 Operación nominal en redes síncronas

En la primera etapa se desea transferir 50kW en ambos sentidos del sistema. Por lo que se plantea el siguiente escenario:

- (1) Frecuencias iguales ($\omega_1 = \omega_2$)
- (2) Flujo de potencia activa bidireccional de $\pm 50 \text{ kW}$ y potencia reactiva cero.

Se puede observar en la Figura 3 que la respuesta dinámica es suave, por lo que el convertidor logra seguir la referencia y llega al estado estable en un tiempo aproximado de 55ms para ambas etapas del convertidor BtB (ver detalle en Figura 4). Lo anterior se debe a las ganancias del esquema de control PBC. La potencia reactiva

por el lado del convertidor NPC₂ tiene un sobretiro de aproximadamente de 20 kVAR, mientras en el NPC₁ se presenta un sobretiro menor de aproximadamente ± 2 kVAR.

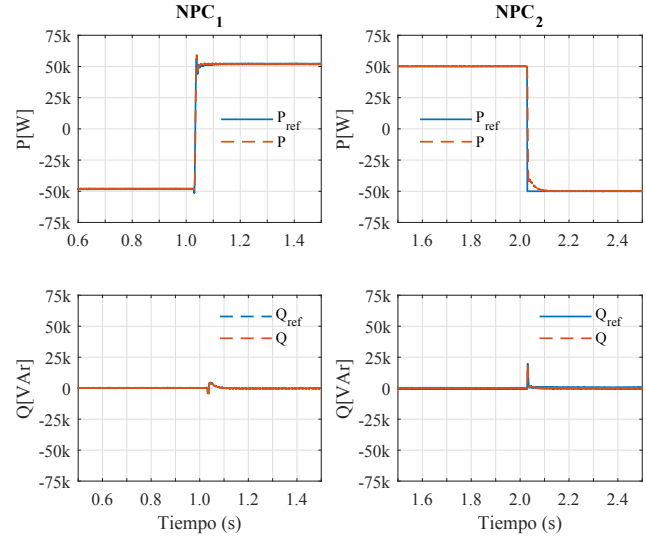


Figura 3. Potencia activa y reactiva en NPC₁, y NPC₂.

El transitorio dura aproximadamente 55ms. El cambio del flujo de potencia, se manifiesta de la misma forma en el voltaje del bus de cd . La caída de voltaje que sufre por el cambio de potencia, tal como se observa en la Figura 5, resulta ser de alrededor de 150 V. El tiempo que le toma llegar a valor deseado es de aproximadamente 90ms. En la misma Figura se presentan también los voltajes en cada capacitor del bus de cd .

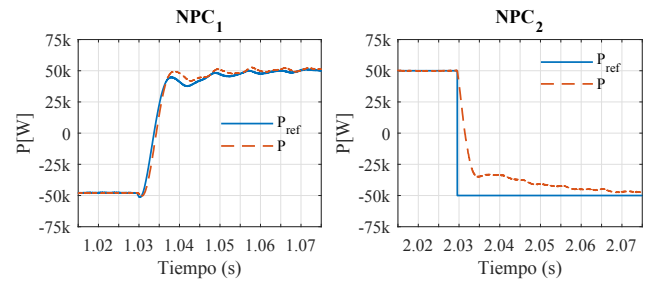


Figura 4. Detalle: Potencia activa en NPC₁, y NPC₂.

En la Figura 6 se puede apreciar que las señales de voltaje y corriente se encuentran en fase. En este caso, dado que se realiza el cambio de transferencia de energía, después de aproximadamente medio ciclo de red ($\approx 20 \text{ ms}$) las corriente en ambas etapas del convertidor BtB llegan al valor deseado. En este caso se verificó que la velocidad de respuesta depende de las ganancias del esquema de control, pero se pueden presentar sobretiros más elevados en el voltaje de cd .

4.2 Operación nominal en redes asíncronas

A continuación, se efectúa la operación en modo asíncrono, $\omega_1 = 60 \text{ Hz}$ y $\omega_2 = 50 \text{ Hz}$. Se transfieren 50kW del

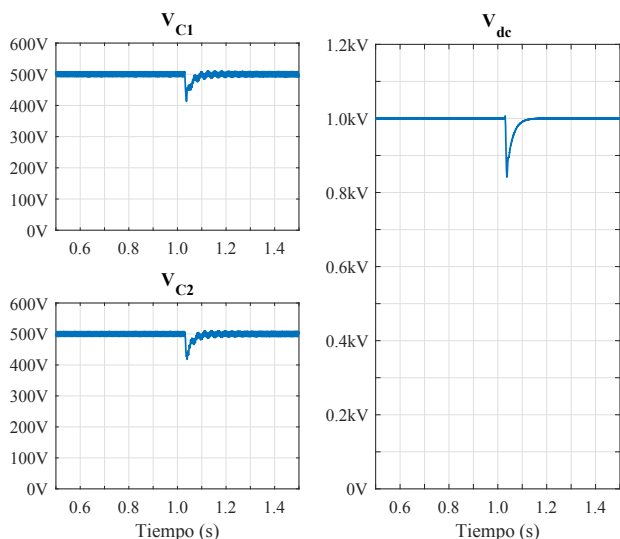


Figura 5. Voltaje del bus de cd : sistemas síncronos

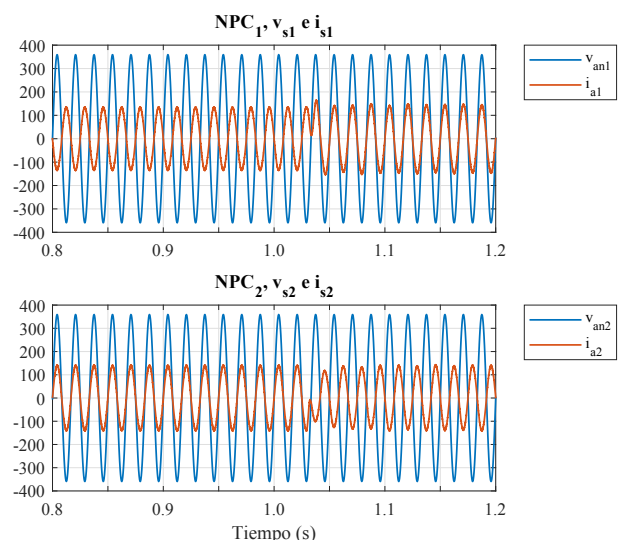


Figura 6. Voltajes y corrientes de fase.

convertidor NPC₁ a NPC₂ y viceversa. En la Figura 7 se puede notar que el seguimiento de potencia muestra un comportamiento similar al caso de redes síncronas. En esta prueba de simulación, con frecuencias asíncronas se observan oscilaciones en las formas de onda. Las oscilaciones están relacionadas a la diferencia de frecuencias y se pronuncian cada vez más conforme se desvía una frecuencia de la otra. Lo anterior se puede presentar en el caso de los generadores eólicos.

Los tiempos que le toman al esquema de control en alcanzar los valores deseados son 50ms y 70ms, aproximadamente. Mientras que la potencia activa tiene una respuesta suave durante el cambio de dirección, la potencia reactiva llega a valores de -2 kVAr y 5 kVAr, en el convertidor NPC₁, y un sobretiro muy similar al caso de frecuencias síncronas en el convertidor NPC₂. La

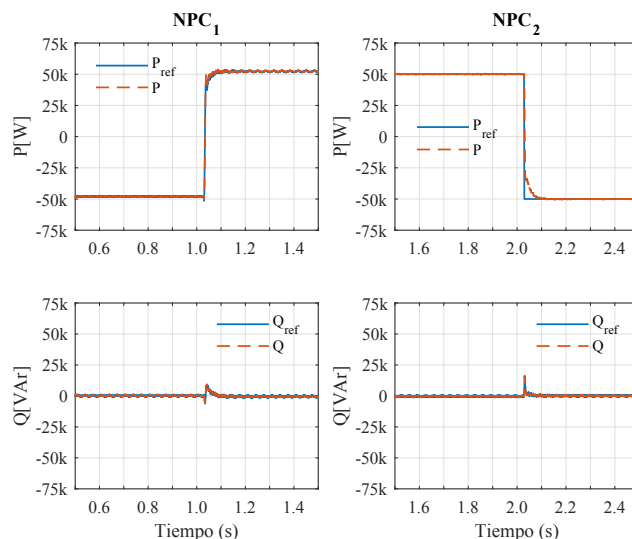


Figura 7. Potencia activa y reactiva en NPC₁, y NPC₂.

Figura 8 muestra una ventana de tiempo más estrecha para apreciar la potencia activa.

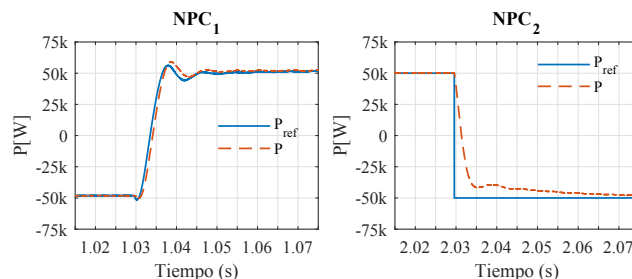


Figura 8. Detalle: Potencia activa en NPC₁, y NPC₂.

La Figura 9 presenta el comportamiento del voltaje en el bus de cd y los voltajes en cada condensador. En la misma Figura se puede observar que la caída de voltaje es de aproximadamente 150 V y le lleva un tiempo para llegar al estado estable de aproximadamente 90ms. También se puede verificar la presencia de un rizo en voltaje causado por la diferencia de frecuencias.

Finalmente, la Figura 10 contiene las formas de onda de la corriente y el voltaje de cada uno de los sistemas eléctricos. Dado que la Q en ambos sistemas es cero, nuevamente el factor de potencia es unitario.

5. CONCLUSIONES

En este trabajo se desarrolló un esquema de control basado en pasividad, y que mediante un cambio de variable aplicado al modelo del convertidor Back to Back con convertidores NPC, se obtuvo una representación alterna del modelo en función de potencias activa y reactiva. Con base al cambio de variable, se propuso un esquema de control directo de potencia basado en pasividad (DPC-PBC). En este sentido, como la aplicación está enfocada a la interconexión de microrredes; el esquema DPC-PBC,

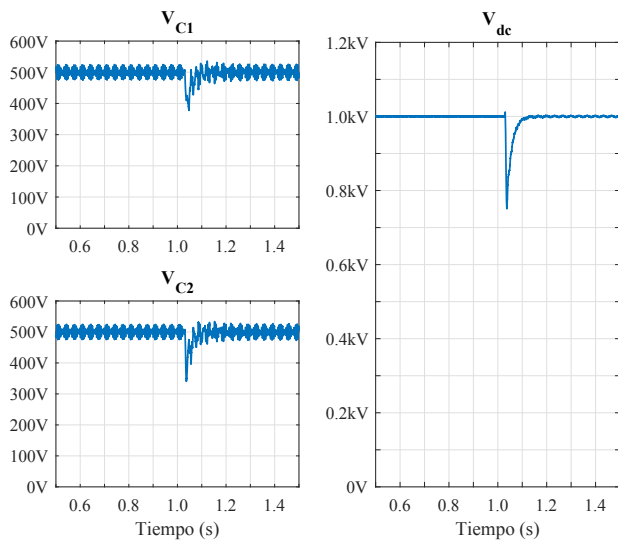


Figura 9. Voltaje del bus de cd : sistemas asíncronos

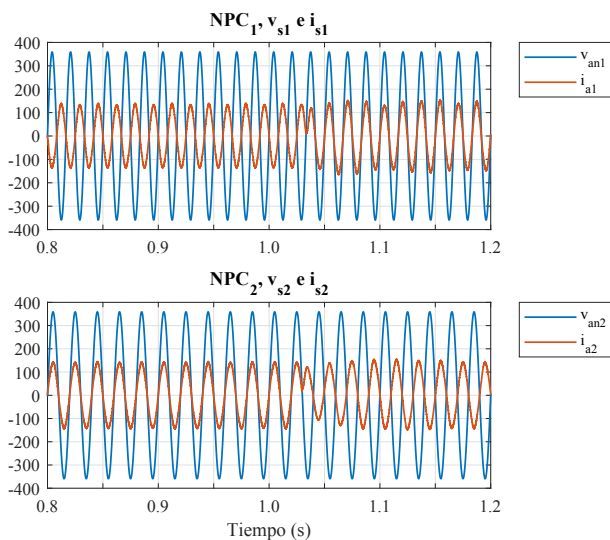


Figura 10. Voltajes y corrientes de fase.

propuesto, se recomienda colocarlo en el primer nivel del control jerárquico. Dado que, este control se encarga de mantener los niveles de potencia activa y reactiva dentro de los rangos requeridos por la microrred en conjunto con el sistema al que está interconectada. El esquema DPC-PBC, se sometió a distintos escenarios de simulación, con el objetivo de comprobar el desempeño en redes síncronas y asíncronas. Los tiempos de respuesta que se obtuvieron mediante las distintas modalidades de operación son muy similares, con una duración aproximada a tres ciclos de red. Una prueba importante es cuando se presentan frecuencias de operación distintas (modo asíncrono), donde se observó la presencia de un rizo de baja frecuencia en el voltaje del bus de corriente directa. Sin embargo, el rizo no afecta el desempeño del esquema de control y a la calidad de las formas de onda de tensión y corriente. Por último, la desviación de tensión entre los voltajes de los

condensadores es despreciable y los sobretiros en el mismo no superan el 10%. El trabajo futuro será implementar el esquema DPC-PBC en una plataforma digital y aplicarlo a una microrred experimental.

REFERENCIAS

- Akagi, H. (2017). Multilevel converters: Fundamental circuits and systems. *Proceedings of the IEEE*, 105(11), 2048–2065.
- Guerrero, J.M., Vasquez, J.C., Matas, J., de Vicuna, L.G., and Castilla, M. (2011). Hierarchical control of droop - controlled ac and dc microgrids - a general approach toward standardization. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 58(1), 158–172.
- Guo, X., Xu, D., Guerrero, J.M., and Wu, B. (2015). Space vector modulation for dc-link current ripple reduction in back-to-back current-source converters for microgrid applications. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 62(10), 6008–6013.
- Lasseter, B. (2001). Microgrids [distributed power generation]. In *2001 IEEE Power Engineering Society Winter Meeting. Conference Proceedings (Cat. No. 01CH37194)*, volume 1, 146–149 vol.1.
- Majumder, R., Ghosh, A., Ledwich, G., and Zare, F. (2010). Power management and power flow control with back-to-back converters in a utility connected microgrid. *IEEE Transactions on Power Systems*, 25(2), 821–834.
- Miranda, H., Cardenas, V., Visairo, N., Sandoval, G., and Espinosa-Perez, G. (2008). A dq0 passivity-based approach for 3ϕ four-wire shunt active power filter based on npc three-level converter. In *2008 34th Annual Conference of IEEE Industrial Electronics*, 3171–3177.
- Naderi, M., Khayat, Y., Shafiee, Q., Dragicevic, T., Bevrani, H., and Blaabjerg, F. (2020a). Interconnected autonomous ac microgrids via back-to-back converters-part i: Small-signal modeling. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 35(5), 4728–4740.
- Naderi, M., Khayat, Y., Shafiee, Q., Dragicevic, T., Bevrani, H., and Blaabjerg, F. (2020b). Interconnected autonomous ac microgrids via back-to-back converters-part ii: Stability analysis. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 35(11), 11801–11812.
- Ortega, R. and A. Loria, Per. J. Nicklasson, H.S.R. (1998). *Passivity-based Control of Euler-Lagrange Systems*. Springer-Verlag, London, first edition.
- van der Schaft, A. (2000). *L₂ Gain and Passivity Techniques in Nonlinear Control*. Springer-Verlag, London, 2nd edition.
- Vijay, A.S., Doolla, S., and Chandorkar, M.C. (2021). A single back-to-back converter based system emulator for testing unbalanced microgrids. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 36(1), 513–523.