

Dynamic Modeling, Simulation and Control of Hybrid Energy Storage System Based on Compressed Air and Supercapacitors

M. Martinez, *Student Member*, IEEE, M. G. Molina, *Member*, IEEE,
P. F. Frack, *Student Member*, IEEE and P. E. Mercado, *Senior Member*, IEEE

Abstract— In this paper, the dynamic modeling and the control design of hybrid energy storage system based on compressed air and supercapacitors (CAES-SC) is presented, which converts excess energy from the power supply to stored pneumatic energy by using a compressor. Efficient charging and discharging of the device is performed under maximum power conditions, so that the machine speed is adjusted for this requirement, and the energy delivered to the power system is controlled through an intermittent operation of the pneumatic converter. In order to smooth the desired output power of the system, a supercapacitors bank (SC) is utilized. In this context, power electronics and its control play a significant role in the integration of the CAES-SC system into the network. The dynamics of the power conditioning system (PCS) and the hybrid energy storage unit with SCs (SCES), affect the validity of the CAES-SC system for power system dynamic control, allowing controlling the energy exchange between all devices. The dynamic performance of the proposed systems is evaluated by digital simulation in SimPowerSystems of MATLAB/Simulink.

Keywords— Compressed air, energy storage, dynamic control, distributed generation, pulse width modulation (PWM), maximum power point tracking (MPPT), supercapacitors.

I. INTRODUCCIÓN

EN LOS últimos años ha surgido un creciente interés en el uso de fuentes de energía renovables. Las principales fuentes, eólica y solar, son opciones viables para la generación de energía. Teniendo en cuenta que estas son fuentes intermitentes, en muchos casos es necesaria la instalación de sistemas de almacenamiento de energía eléctrica. Hasta ahora, las baterías electroquímicas son planteadas como una solución, pero no satisfacen las necesidades de mediano y largo plazo debido a su ciclo de vida limitado y los problemas para ser recicladas. Actualmente varias tecnologías de almacenamiento se han desarrollado comercialmente, tales como súpercapacitores (o ultracapacitores), almacenamiento magnético con superconductores (SMES en inglés), volantes de inercia (o

flywheels en inglés) y almacenamiento de energía con aire comprimido (CAES en inglés), entre otros. En este sentido, CAES ha sido propuesto como una alternativa en el rango de potencia media y alta, esencialmente debido a su elevado ciclo de vida y su reducida producción de materiales de desecho [1].

El desarrollo de una opción a las baterías convencionales es la principal motivación de este trabajo, el cual trata el diseño y análisis del comportamiento dinámico de un sistema CAES-SC en el que se obtiene la mayor parte del almacenamiento por el aumento de presión de una masa de aire. El objetivo de este trabajo es la optimización de los procesos físicos de expansión del aire en un motor neumático, con el fin de extraer tanta potencia como sea posible. Los requisitos de máxima potencia imponen las condiciones de conversión, una vez modulada ésta se lleva a cabo un modo de trabajo intermitente del proceso termodinámico con el fin de obtener un control de la energía entregada a la red [1]. Esto genera oscilaciones de potencia entre el valor máximo que se puede extraer del aire comprimido y cero, por lo que se manifiesta la necesidad de compensar estas variaciones para obtener la potencia demandada. Por este motivo se incorpora la unidad de almacenamiento de energía con súpercapacitores (SCES en inglés), la cual permite compensar rápidamente los desbalances de potencia entre la potencia intermitente entregada por el sistema CAES y la potencia constante requerida del conjunto almacenador propuesto.

Este artículo describe la implementación del sistema CAES-SC y de su control avanzado para aplicaciones a nivel de red de distribución. El sistema CAES-SC consiste principalmente de un tanque de aire comprimido, una máquina neumática (MN), un generador sincrónico de imán permanente (PMSG en inglés), un sistema de acondicionamiento de potencia (PCS en inglés) de elevada eficiencia para la conexión a la red de distribución, y de una unidad SC. El PCS permite controlar simultáneamente e independientemente los flujos de potencia activa y reactiva intercambiados con la red.

Se implementa un algoritmo de seguimiento del punto de máxima potencia (MPPT en inglés) para la optimización en tiempo real de la conversión de energía en función de las condiciones cambiantes del suministro de aire. Para hacer frente a la dinámica de la demanda eléctrica, un modo de operación on-off (encendido-apagado) de modulación por

M. Martinez, Universidad Nacional de San Juan, San Juan, Argentina, mmartinez@iee.unsj.edu.ar

M. G. Molina, Universidad Nacional de San Juan, San Juan, Argentina, mgmolina@ieeee.org

P. F. Frack, Universidad Nacional de San Juan, San Juan, Argentina, pfrack@ieeee.org

P. E. Mercado, Universidad Nacional de San Juan, San Juan, Argentina, pmercado@ieeee.org

ancho de pulso (PWM en inglés) se aplica a la máquina neumática para obtener la energía demandada. Por otra parte, se diseña un sistema de control de tres niveles basado en el modelado promedio del espacio de estados, que incluye una completa estrategia de control de desacople de corriente en el marco de referencia giratorio dq . Finalmente, se valida el comportamiento dinámico de los sistemas propuestos mediante simulación digital en MATLAB/Simulink.

II. DESCRIPCIÓN GENERAL DEL SISTEMA CAES-SC

El sistema CAES-SC se muestra de manera resumida en la Fig. 1. Este está constituido por la unidad CAES, la unidad SCES y el PCS. Asimismo, la unidad CAES está formada por un tanque de aire comprimido, una electroválvula, un motor/compresor neumático, y un motor/generador sincrónico de imán permanente. La unidad SCES incluye el banco de súpercapacitores y un convertidor cc/cc reductor-elevador (o buck-boost). El PCS se compone de un convertidor ca/cc/ca

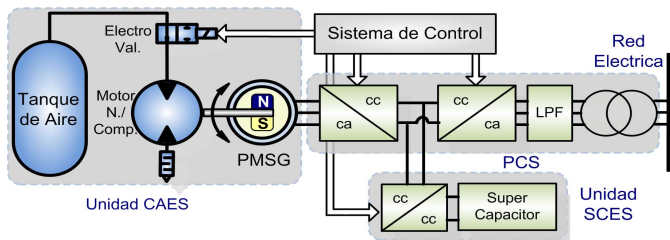


Figura 1. Esquema general del sistema CAES-SC.

espalda-contra-espalda o (back-to-back) compuesto por dos inversores trifásicos fuente de tensión.

El principio de funcionamiento consiste en que durante la carga del sistema CAES-SC, el PMSG actúa como motor moviendo el compresor, éste toma aire del ambiente y lo transporta al tanque de aire comprimido a una mayor presión. En la descarga, el aire comprimido se expande en la máquina neumática, la cual acciona el PMSG como generador y produce un flujo de corriente hacia el sistema eléctrico.

Para el caso estudiado, la descarga se realiza bajo la condición de extraer la máxima potencia posible del proceso termodinámico. El requerimiento de máxima potencia impone las condiciones de conversión (velocidad de rotación), y una vez logrado esto, con el fin de cumplir con la producción eléctrica, se aplica a la electroválvula de la MN un modo de funcionamiento con modulación por ancho de pulsos para obtener el control de la energía provista [1]. Esta característica proporciona pulsos de potencia que se suavizan mediante la unidad SCES. Finalmente, se ejecuta un algoritmo MPPT en tiempo real para optimizar la conversión, siguiendo los cambios del suministro de aire.

III. MODELO DE LA UNIDAD CAES

A. Modelo del Sistema de Aire Comprimido

Se supone al aire del tanque como un gas perfecto, las transformaciones se presumen a temperatura constante, y las

pérdidas y cambios de presión debido a las variaciones en la energía cinética del aire se desprecian. La ecuación de estado de los gases perfectos (1) relaciona los tres parámetros, presión (p), volumen (v) y temperatura (T) en cualquier estado, donde R ($286.9 \text{ Nm kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$) es la constante específica del gas [2]. Teniendo en cuenta el volumen constante del tanque, la variación de presión en su interior es una función del flujo de masa Q_M que entra o sale del tanque, como se describe en (2) [3].

$$p \cdot v = m \cdot R \cdot T, \quad (1)$$

$$p = k \cdot Q_M, \quad (2)$$

B. Modelo del Motor Neumático

El motor neumático utilizado es un motor tipo paleta marca NEUMAC modelo 6,5 CR-30. El modelo se construye sobre la base de las curvas y tablas suministradas por el fabricante [4]. Las ecuaciones características para una presión de entrada variable se obtienen mediante la inclusión de funciones de corrección (3), (4) y (5), que detallan el efecto de la variación de presión sobre las características a presión nominal [1].

$$f_t = c_{t1}p + c_{t2} \quad (3)$$

$$f_N = c_{N1}p^2 + c_{N2}p + c_{N3} \quad (4)$$

$$f_a = c_{a1}p + c_{a2}, \quad (5)$$

c_{t1} , c_{t2} , c_{N1} , c_{N2} , c_{N3} , c_{a1} y c_{a2} son las constantes de interpolación.

El par mecánico M_m se expresa en (6), donde M_0 es el par inicial a velocidad cero, N es la velocidad angular (rpm) de operación de la MN, y N_F es la velocidad angular libre (sin carga). La potencia mecánica P_m se describe en (7), y el caudal volumétrico de aire Q_V se estima a través de (8).

$$M_m = f_t M_0 \left(1 - \frac{N}{f_N N_F} \right) \quad (6)$$

$$P_m = \frac{2\pi}{60} N \cdot M_m = \frac{\pi}{30} f_t M_0 \left(N - \frac{N^2}{f_N N_F} \right) \quad (7)$$

$$Q_V = f_a 10^{(c_1 N^2 + c_2 N + c_3)}, \quad (8)$$

c_1 , c_2 , y c_3 son las constantes de interpolación de las características de flujo de aire. La Fig. 2 muestra las variaciones de las características con la presión.

C. Modelo del Generador Sincrónico de Imanes Permanentes

Las ecuaciones (9), (10) y (11) modelan eléctricamente el comportamiento dinámico de un PMSG en coordenadas $dq\theta$, donde L_q y L_d son las inductancias, i_d e i_q son las corrientes, u_q y u_d son las tensiones en los ejes d y q respectivamente. El número de pares de polos es el pP , R_s es la resistencia del estator, ψ es la amplitud del flujo inducido por el rotor de imanes permanentes en las fases del estator, I_m es la corriente pico del estator, ω_r es la velocidad angular del rotor, y el par electromagnético es M_{em} . La ecuación (12) representa el

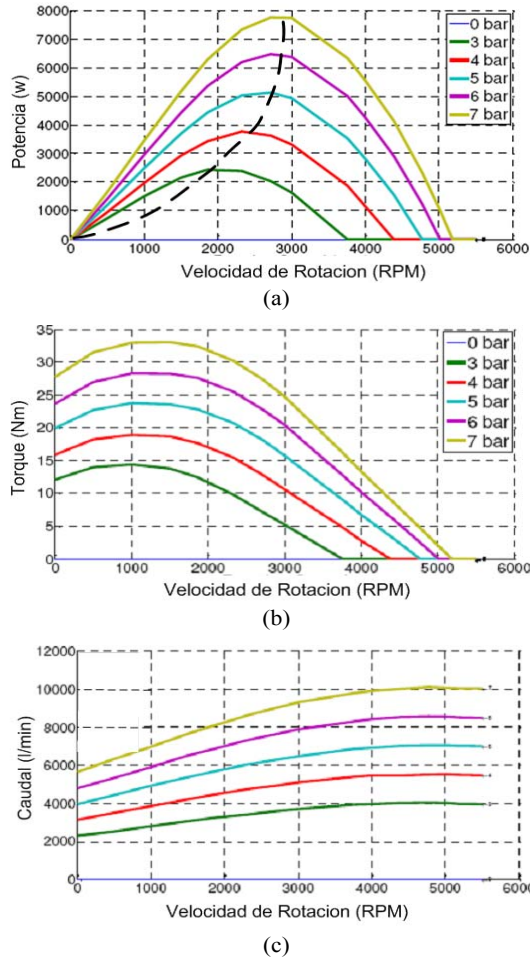


Figura 2. Curvas características de la máquina neumática. (a) Potencia. (b) Torque. (c) Caudal.

modelo mecánico, donde J es la inercia del motor eléctrico, y C_{fm} es el coeficiente de fricción del motor [5].

$$v_d = R_S i_d + L_d \frac{di_d}{dt} - \omega_r L_q i_q \quad (9)$$

$$v_q = L_q \frac{di_q}{dt} + R_S i_q + L_d \omega_r i_d + \psi \omega_r \quad (10)$$

$$M_{em} = 1,5 \cdot p_p \left[\psi \cdot i_q + (L_d - L_q) \cdot i_d \cdot i_q \right] \quad (11)$$

$$\frac{d}{dt} \omega_r = \frac{1}{J} (M_{em} - C_{fm} \omega_r - M_m) \quad (12)$$

IV. MODELO DE LA UNIDAD SCES

La integración de la unidad SCES requiere de un convertidor cc/cc buck-boost, el cual se presenta en la Fig. 3. El convertidor cc/cc (o chopper) tiene dos modos de trabajo, el modo carga (buck) y el modo descarga (boost). En el modo buck, se conmuta la llave IGBT T_{bck} , mientras se mantiene la llave IGBT T_{bst} desconectada todo el tiempo, para producir un flujo de corriente al banco de SCs. En el modo boost, se

conmuta T_{bst} , y se mantiene T_{bck} siempre desconectado, para producir la descarga del banco de SCs. La ecuación (13) relaciona la tensión media de salida V_{SCB} y la tensión de la barra cc (V_{dc}), siendo el índice de modulación $m=D$ para el modo buck y $m=(1-D)$ para el modo boost. La relación de operación para conmutar T_{bck} o T_{bst} es D según el modo de operación (carga o descarga) [6].

$$V_{SCB} = m \cdot V_{dc} \quad (13)$$

V. MODELO DEL SISTEMA DE ACONDICIONAMIENTO DE POTENCIA (PCS)

El sistema de acondicionamiento de potencia usado para conectar la unidad CAES a la red de distribución requiere generar energía eléctrica de alta calidad y al mismo tiempo ser flexible, eficiente y confiable. El PCS que se muestra en la Fig. 3, se compone de un convertidor back-to-back ca/cc/ca que cumple con los requerimientos mencionados previamente.

Dado que el PMSG produce una tensión con amplitud y frecuencia variables, se requieren acondicionamientos adicionales para cumplir con los requerimientos de la red eléctrica. Se propone utilizar dos inversores fuentes de tensión (VSI en inglés) trifásicos de tres niveles con IGBTs para la realización de la conversión ca/cc/ca. Esta topología de inversor, se propone por sobre otras, ya que genera una forma de onda de tensión de salida más sinusoidal, sin aumentar la frecuencia de conmutación. De esta forma, el desempeño del inversor se ve mejorado, mientras se obtiene mayor eficiencia y confiabilidad respecto de la topología de dos niveles. La conexión a la red eléctrica se realiza a través de un transformador y un filtro paso bajo, a fin de reducir la perturbación producida en la red de distribución causadas por los armónicos generados por el control PWM [1].

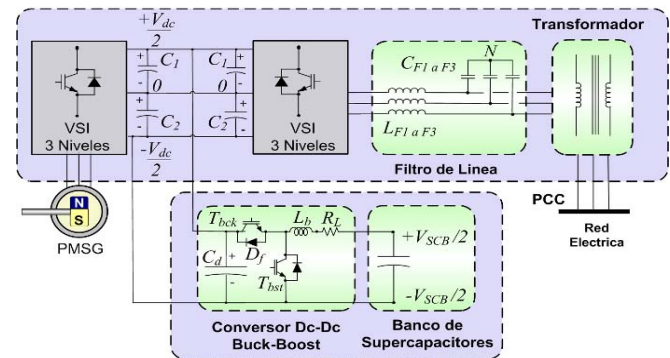


Figura 3. Modelo detallado de la unidad SCES y el PCS del sistema CAES-SC propuesto.

Ambos inversores trifásicos propuestos, corresponden a un inversor de potencia conmutado que usa IGBTs, manejados a través de un control PWM sinusoidal [7]. Este está conectado en paralelo a la red a través de una inductancia L_s que representa el flujo de dispersión equivalente del transformador, y una resistencia en serie R_s que representa la resistencia de los arrollamientos del transformador y las pérdidas de conducción de los semiconductores del VSI. La

inductancia de magnetización del transformador también se toma en cuenta a través de la inductancia mutua M .

La dinámica del PCS se resume en la ecuación de espacio de estado indicada en (14). Este modelo describe la dinámica del VSI en coordenadas dq , y se utiliza como base para el control de nivel medio. En esta ecuación V_{dc} es la tensión del vínculo de cc, ω es la velocidad angular sincrónica de la tensión de la red, mi es el índice de modulación ($mi \in [0, 1]$), a es la relación de tensión del transformador de acoplamiento, y α es el desplazamiento de fase de la tensión de salida del VSI a partir de la posición de referencia [1].

La ecuación (14) puede extenderse al inversor vinculado al PMSG, pero reemplazando ω por la velocidad eléctrica de rotación del rotor.

$$s \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \\ V_d \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{-R_s}{L_s - M} & \omega & \frac{mi \cdot a \cos \alpha}{2(L_s - M)} \\ -\omega & \frac{-R_s}{L_s - M} & \frac{mi \cdot a \sin \alpha}{2(L_s - M)} \\ \frac{3mi \cdot a \cos \alpha}{2C_d} & \frac{-3mi \cdot a \sin \alpha}{2C_d} & \frac{2}{R_p C_d} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \\ V_d \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} |v| \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (14)$$

VI. ESTRATEGIA DE CONTROL

El esquema de control del sistema CAES-SC, se representa en la Fig. 4. Este control de tres niveles consta de un nivel externo, medio e interno, con diferentes jerarquías. La técnica de control se basa en conceptos de potencia instantánea en el marco de referencia giratorio sincrónico dq [7].

A. Control de Nivel Externo

Este control determina el intercambio de potencia entre el sistema CAES-SC y la red, con el modo de control de potencia activa (APCM) y el modo de control de tensión (VCM) [6]. El objetivo del APCM es controlar el punto de trabajo del motor neumático. El comportamiento dinámico del sistema electromecánico se describe en la ecuación (12), donde C_{fm} se reemplaza por el coeficiente de fricción total C_f y

J se reemplaza por la inercia total J_T del sistema MN-PMSG.

Sobre la base de varias medidas (presión, velocidad del rotor, etc.), el MPPT determina la velocidad óptima que corresponde a la potencia máxima que puede desarrollar la MN, como se ve en las curvas de potencia de la Fig. 2 [1]. Esta cantidad a través del regulador de velocidad se convierte en un par de referencia M_{emr} , que ajusta la velocidad real de la máquina a la velocidad de referencia propuestos por el bloque MPPT, utilizando un controlador proporcional-integral (PI). El VCM está diseñado para controlar la tensión en el punto de acoplamiento común (PCC) del VSI, a través de la modulación de la componente reactiva de la corriente de salida (componente fundamental en cuadratura, i_{q1}). Con este fin, la magnitud de la tensión en el PCC (v_{d1}) se compara con una tensión de referencia. Se produce una señal de error, y esta alimenta al integrador PI del controlador que determina la corriente de referencia i_{qr1} [6].

B. Control de Nivel Medio

Este control alcanza la salida esperada a través del seguimiento dinámico de los valores de referencia establecidos por el nivel externo. Como se observa en (14), hay un acoplamiento cruzado de ambas componentes de la corriente de salida del VSI a través de ω . Para lograr un control de potencia activa y reactiva completamente desacoplado, se utilizan las señales X_1 y X_2 , obtenidas haciendo cero las derivadas de las corrientes en la ecuación (15) (lado de ca). Para lograr esta condición en estado estacionario, se introducen dos controladores PI con realimentación adecuada de i_{d1} e i_{q1} , como sigue [6]:

$$s \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{-R_s}{L_s - M} & 0 \\ 0 & \frac{-R_s}{L_s - M} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} X_1 \\ X_2 \end{bmatrix}, \quad (15)$$

A partir de (14), puede observarse el acoplamiento

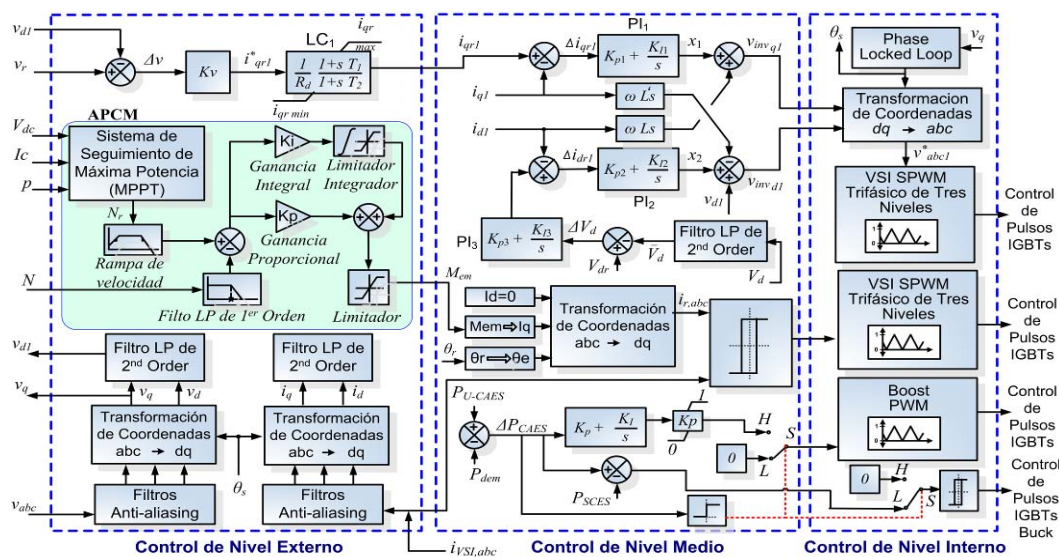


Figura 4. Esquema de control multinivel del sistema de almacenamiento híbrido propuesto.

adicional resultante de la tensión continua V_d , tanto en el lado de cc como de ca. Esto exige mantener constante V_d , a fin de disminuir la influencia dinámica de V_d . La solución es usar un compensador PI que elimine las variaciones de tensión en la barra de cc [7]. Por otro lado, el control medio del VSI ca/cc se realiza a través de 4 bloques principales. El bloque convertidor de torque a corriente en coordenadas dq convierte M_{emr} en una corriente i_{dr} , ya que el par desarrollado es directamente proporcional a i_q ($M_{em}=1.5.P.\psi.i_q$), debido al tipo de máquina utilizada [8]. La corriente i_d se fija en cero [8]. El bloque $dq-abc$ realiza la conversión del sistema de referencia dq al sistemas de coordenadas abc [7].

El bloque regulador de corriente es un controlador de corriente bang-bang, con ancho de banda de histéresis ajustable [9]. El bloque convertidor de ángulo se utiliza para calcular el ángulo eléctrico del rotor.

El modo buck o boost, así como la potencia de carga o descarga de la unidad SCES se determina por la diferencia entre la potencia demandada y la potencia instantánea desarrollada por la unidad CAES (ΔP_{CAES}) [6]. Cuando esta es positiva el interruptor S adopta la posición L (modo buck), y cuando es negativa la posición H (modo boost). Puesto que la corriente del SC es muy sensible a la tensión aplicada, se propone una técnica de control de histéresis adaptativa (AHCC) para el funcionamiento del convertidor cc/cc en modo de conducción continua. De esta manera, la carga del SCES se logra rápidamente con una potencia constante cercana a ΔP_{CAES} . En el modo de operación boost, ΔP_{CAES} se convierte en la corriente de referencia de descarga a través de un controlador PI, el cual ajusta la potencia entregada por el SC a través de la regulación del ciclo de trabajo D [6].

C. Control de Nivel Interno

Este es responsable de generar las señales de conmutación para las llaves de los VSI, y del convertidor cc/cc de acuerdo con los modos de control (PWM sinusoidal, PWM, y AHCC) y los tipos de llaves utilizadas (IGBT). Este nivel se compone de un módulo de sincronización con la red, dos generadores de pulsos de disparos SPWM trifásico de tres niveles, un generador de disparos PWM, y un generador de disparos por histéresis. El módulo de sincronización con la red consiste en un lazo enganchado en fase (PLL en inglés) [10].

VII. ALGORITMO DE CONTROL MPPT

La potencia entregada al vínculo de cc del PCS es la medida de referencia de la estrategia de generación de máxima potencia. El objetivo del algoritmo MPPT es mantener el punto de trabajo de la MN siempre en la línea punteada de las curvas de potencia de la Fig. 2. Esto se logra a través de un método iterativo llamado "Perturbación y Observación" (P&O). La técnica P&O consiste en aumentar o disminuir la velocidad de rotación constantemente, y ver los cambios en la potencia de salida. El cambio posterior de la velocidad se hace de tal manera de tener siempre el sistema en movimiento en la dirección de aumento de la potencia [6].

El diagrama de flujo de la Fig. 5 resume el algoritmo

MPPT. Inicialmente este encuentra el valor óptimo de velocidad inicial N_0 para la presión de entrada de aire, usando las tablas de datos proporcionados por el fabricante. El N_0 se utiliza como valor inicial para el algoritmo, con el fin de iniciar en forma rápida y precisa cerca de la velocidad óptima. A continuación se realizan las mediciones en el vínculo de cc ($V_{dc}(k-1)$ e $I_c(k-1)$) para calcular el valor de la potencia generada $P_g(k-1)$. A continuación, con un incremento de $N(k)$ en una cantidad ΔN , se perturba la potencia $P_g(k)$, esta se compara con el ciclo anterior, y si es mayor, menor o igual, se toma la decisión de incrementar o disminuir $N(k)$.

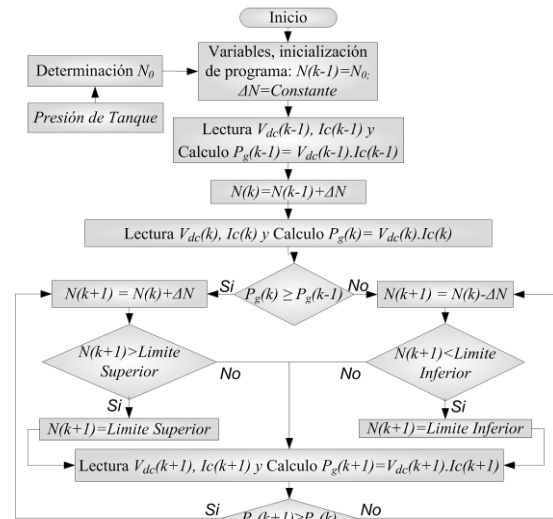


Figura 5. Diagrama de flujo del algoritmo de control MPPT.

VIII. CONTROL DE LA POTENCIA SUMINISTRADA POR LA UNIDAD CAES

Como se mencionó previamente, la variación de la potencia eléctrica de salida se basa en la modulación de la operación intermitente del convertidor termodinámico. El control de la potencia provista a la barra de cc se realiza en función de extraer la máxima potencia posible del sistema neumático, la cual generalmente no es igual a la potencia demandada. En este caso, el exceso de energía se almacena en la unidad SCES y luego se utiliza para suministrar al sistema eléctrico durante la parada del motor neumático. Por lo tanto, la energía almacenada durante el tiempo de funcionamiento del motor (t_{on}) debe ser igual a la energía requerida por la carga durante el tiempo que no funciona el sistema ($T-t_{on}=t_{off}$). La ecuación (16) expresa lo anterior [1].

$$\int_0^{t_{on}} (P_g - P_{dem}) dt = \int_{t_{on}}^T P_{dem} dt \Leftrightarrow \int_0^{t_{on}} P_g dt = \int_0^T P_{dem} dt, \quad (16)$$

Si se considera el caso simple, que la potencia producida por la unidad CAES (P_g) y la potencia demandada (P_{dem}) son constantes, se puede obtener los gráficos de la Fig. 6. El parámetro de control es la energía resultante de la diferencia entre la energía demandada (E_{dem}) y la generada (E_g). Cuando llega a un valor mínimo el control enciende la MN, y cuando

alcanza el valor máximo la detiene. La frecuencia de trabajo se ajusta en función de la relación entre P_g y P_{dem} [1].

IX. RESULTADO DE LAS SIMULACIONES DIGITALES

Con el fin de investigar la efectividad de los modelos y algoritmos de control propuestos del sistema CAES-SC, se realizaron simulaciones dinámicas en tiempo discreto utilizando el ambiente de SimPowerSystems de MATLAB/Simulink [11]. El sistema consta de un tanque de aire comprimido de 30 m³ a 25 °C y 6 bares de presión, el motor neumático 6,5 CR-30, y un PMSG de 5,8 kW/380V.

La Fig. 7(a) muestra la potencia demandada (4,5 kW los primeros 4 s, 1,5 kW los siguientes 8 s, y 2,5 kW el tiempo restante), la potencia generada por la unidad CAES, y la potencia suministrada por el sistema completo CAES-SC. En esta gráfica se observa que la MN suministra la máxima potencia cuando está funcionando, la cual es función de la presión del aire de entrada, que a su vez va disminuyendo cada vez que trabaja la MN. También se observa el funcionamiento del control de energía de la unidad CAES, que actúa sobre la electroválvula neumática cerrando el paso del aire al motor neumático, de tal manera que las áreas bajo las curvas de potencia (energías) de generación de la unidad CAES y demanda sean aproximadamente iguales. La diferencia de potencias es absorbida por la unidad SCES, la

cual se representa en la Fig. 7(b), y como resultado se obtiene la potencia suministrada por el sistema CAES-SC.

En la Fig. 7(c) se puede observar cómo el control de velocidad hace que la velocidad del motor neumático siga la velocidad de referencia formulada por el algoritmo MPPT cuando la MN se encuentra funcionando.

X. CONCLUSIONES

Se puede concluir que la estrategia de optimización de la potencia puede mejorar significativamente la conversión termodinámica. Esta topología requiere un dispositivo auxiliar con el fin de producir una potencia de salida más suave, consumiendo el exceso de energía y entregando esta cuando es necesario. Esta función la cumple perfectamente la unidad SCES. Esta combinación de aire comprimido y súpercapacitor permite mejorar la flexibilidad y el comportamiento dinámico del sistema de almacenamiento, y lo hace adecuado para aplicaciones tales como apoyo a las fuentes de energía renovables, y para la mejora de la calidad de potencia suministrada a usuarios sensibles.

REFERENCIAS

- [1] M. Martínez, M. G. Molina, y P. E. Mercado, "Dynamic performance of compressed air energy storage (CAES) plant for applications in power systems", en 2010 IEEE/PES Transmission and Distribution Conf. and Expo.: Latin America, São Paulo, 8-10 Nov., 2010, pp.496-503.
- [2] C. A. García, "Termodinámica Técnica", 3ra ed. Buenos Aires: Alsina, 1984.
- [3] T. Gómez-Acebo, "Física y Química Termodinámica Básica", Navarra: tecnum, Octubre 2005.
- [4] NEUMAC S.A. "Motores Neumáticos", España, Diciembre 2004. Disponible: <http://www.neumac.es>.
- [5] Dal Y. Ohm, "Dynamic Model of PM Synchronous Motors", Drivetech, Inc., Blacksburg, Virginia, Mayo 2000, Disponible: <http://www.drivetechinc.com>.
- [6] M. Martínez, M. G. Molina, I. R. Machado, P. E. Mercado, y E. H. Watanabe, "Modelling and simulation of wave energy hyperbaric converter (WEHC) for applications in distributed generation", International Journal of Hydrogen Energy, Agosto 2012, en Prensa, doi: 10.1016/j.ijhydene.2012.01.172.
- [7] M. G. Molina y P. E. Mercado, "Control Design and Simulation of DSTATCOM with Energy Storage for Power Quality Improvements", en 2006 IEEE/PES Transmission & Distribution Conf. and Exp.: Latin America, 15-18 Aug., 2006, pp.1-7.
- [8] P. C. Krause, O. Wasynczuk, S. D. Sudhoff, "Analysis of Electric Machinery", Board, 1994.
- [9] B. K. Bose, "Modern Power Electronics and AC Drives", Prentice-Hall, N.J., 2002.
- [10] M. G. Molina y P. E. Mercado, "Modelling and Control Design of Pitch-Controlled Variable Speed Wind Turbines", en: Al-Bahadly I (editor), Wind Turbines, Vienna: InTech Ed. & Pub; 2011, pp. 373-402.
- [11] The MathWorks Inc. SimPowerSystems for use with Simulink: User's Guide, Natick, MA, 2011.

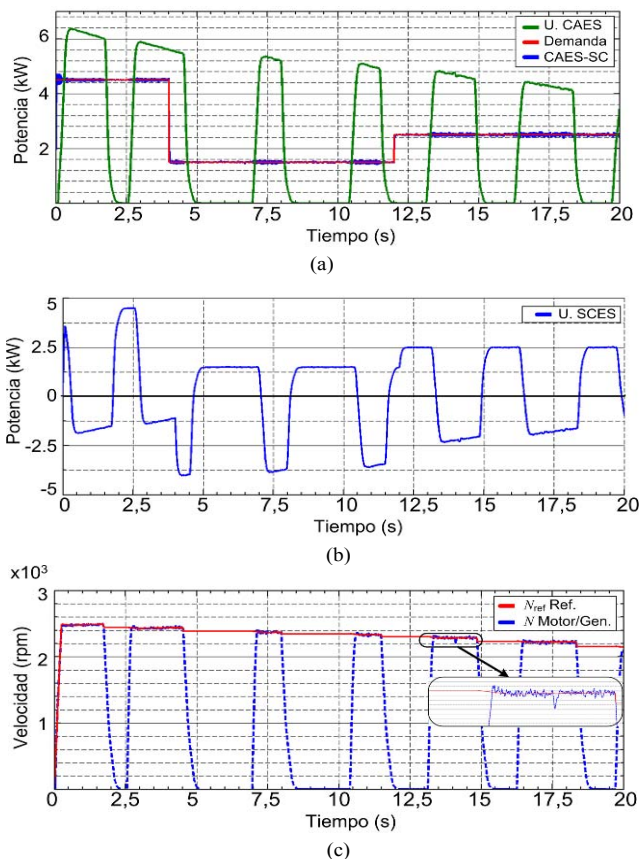


Figura 7. Respuesta dinámica del sistema CAES-SC propuesto en función de la potencia demandada



Maximiliano Martínez (S'10) nació en San Juan, Argentina. Se graduó como Ingeniero Electromecánico en la Universidad Nacional de San Juan (UNSJ), Argentina en 2007. Durante el año 2010, fue becario de Doctorado de la Fundación Coordinación de Perfeccionamiento de Personal de Nivel Superior (CAPES), en la Universidad Federal de Río de Janeiro, Brasil. Es miembro de la Sociedad de Estudiantes de Ingeniería de Potencia del IEEE. Sus intereses de investigación incluyen dinámica y control sistemas de potencia, modelos de electrónica de potencia, recursos de energía renovables y aplicación de almacenamiento de energía en redes eléctricas.



Marcelo G. Molina (M'01) nació en San Juan, Argentina. Se graduó summa cum laude como Ingeniero Electrónico en la Universidad Nacional de San Juan (UNSJ), Argentina, en 1997 y recibió el Doctorado egresando de la UNSJ en 2004. Durante el año 2004, fue becario de Investigación Doctoral en la Universidad Federal de Río de Janeiro (UFRJ), Brasil, con el apoyo de CAPES. De 2005 a 2007 trabajó como Investigador Post-Doctoral del Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET) en el Instituto de Energía Eléctrica (IEE) de la UNSJ. En 2009 fue profesor visitante en la Universidad de Siegen, Alemania, financiado por el Servicio Alemán de Intercambio Académico (DAAD), y en 2010 en la UFRJ, Brasil, con el apoyo de CAPES. En 2004, se convirtió en Profesor Asistente en la UNSJ y fue promovido a Profesor Asociado en 2011. Desde 2008, el Dr. Molina es Investigador del CONICET y en 2011 fue nombrado Sub-director del IEE en la UNSJ. Es miembro de la Sociedad de Ingeniería en Potencia del IEEE, de la Sociedad de Electrónica de Potencia del IEEE y de la Sociedad Brasileña de Electrónica de Potencia (SOBRAEP). Sus intereses de investigación incluyen modelado, análisis y control de sistemas eléctricos de potencia, electrónica de potencia y accionamientos eléctricos, tecnologías de microrredes y redes inteligentes, recursos de energía distribuida con énfasis en generación distribuida y renovable, y la aplicación de almacenamiento de energía en sistemas de potencia.



Pablo F. Frack (S'10) nació en Chubut, Argentina. Se graduó summa cum laude como Ingeniero Electrónico en la Universidad Nacional de San Juan (UNSJ), Argentina en 2009. En el 2011, fue becario de Doctorado de la Fundación Coordinación de Perfeccionamiento de Personal de Nivel Superior (CAPES), en la Universidad Federal de Río de Janeiro, Brasil. Es miembro de la Sociedad de Ingeniería en Potencia del IEEE, de la Sociedad de Electrónica de Potencia del IEEE y de la Sociedad Brasileña de Electrónica de Potencia (SOBRAEP). Sus intereses de investigación incluyen dinámica y control de microrredes, modelos de electrónica de potencia, y almacenamiento de energía en sistemas de potencia.



Pedro E. Mercado (M'02, SM'02) nació en San Juan, Argentina. Se graduó como Ingeniero Electromecánico en la Universidad Nacional de San Juan (UNSJ). Recibió su Ph.D. en la Universidad de Tecnología de Aachen, Alemania. El Dr. Mercado actualmente es Profesor de Ingeniería Eléctrica en la UNSJ e Investigador del CONICET. Es Miembro Senior de la Sociedad de Ingeniería en Potencia del IEEE y de la Sociedad de Electrónica de Potencia del IEEE. Sus actividades de investigación se centran en la simulación dinámica, seguridad de la operación, electrónica de potencia, sistemas de energía renovable, y operación económica y control de sistemas eléctricos de potencia.