

DISEÑO DE UN SISTEMA DE
CONTROL DESCENTRALIZADO
DE UN SISTEMA EÓLICO
EMULADO CON UN GRUPO
MOTOR CD-GENERADOR CA

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE CIUDAD JUÁREZ

Ricardo Duarte Jáquez
Rector

David Ramírez Perea
Secretario General

Manuel Loera de la Rosa
Secretario Académico

Francisco López Hernández
Director del Instituto de Ingeniería y Tecnología

Luis Enrique Gutiérrez Casas
Coordinador General de Investigación y Posgrado

Ramón Chavira
*Director General de Difusión Cultural
y Divulgación Científica*

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE CIUDAD JUÁREZ

DISEÑO DE UN SISTEMA DE
CONTROL DESCENTRALIZADO
DE UN SISTEMA EÓLICO
EMULADO CON UN GRUPO
MOTOR CD-GENERADOR CA

ONOFRE AMADOR MORFÍN GARDUÑO

ABEL EDUARDO QUEZADA CARREÓN

MANUEL IVÁN CASTELLANOS GARCÍA

ARMANDO GÁNDARA FERNÁNDEZ

ARNULFO CASTRO VÁZQUEZ

JAVITT HIGMAR NAHITT PADILLA FRANCO

INGENIERÍA Y TECNOLOGÍA

LISBEILY DOMÍNGUEZ RUVALCABA

COORDINADORA DE LA COLECCIÓN

Colección Reportes Técnicos de Investigación ISBN: 978-607-7953-80-7
Serie IIT, Vol. 16. ISBN: 978-607-520-147-4

D.R. © 2015 Morfín Garduño, Onofre Amador; Quezada Carreón, Abel Eduardo; Castellanos García,
Manuel Iván; Gándara Fernández, Armando; Castro Vázquez, Arnulfo; Padilla Franco,
Javitt Higmar Nahitt.

La edición, diseño y producción editorial de este documento estuvo
a cargo de la Dirección General de Difusión Cultural y Divulgación Científica,
a través de la Subdirección de Publicaciones

Cuidado de la edición y diagramación: Subdirección de Publicaciones

Primera edición, 2015
© 2015 Universidad Autónoma de Ciudad Juárez
Av. Plutarco Elías Calles 1210
Fovissste Chamizal, C.P. 32310
Ciudad Juárez, Chihuahua, México
Tel. +52 (656) 688 2260

<http://www.uacj.mx/DGDCDC/SP/Paginas/RTI.aspx>

ÍNDICE

Resumen	7
Abstract	7
Palabras clave	8
Usuarios potenciales	8
Reconocimientos	8
I. INTRODUCCIÓN	9
II. PLANTEAMIENTO	
2.1 Antecedentes	10
2.2 Marco teórico	11
III. METODOLOGÍA	
3.1 Descripción del sistema de control	12
3.2 Controlador de velocidad del motor de CD	13
IV. RESULTADOS	26
V. CONCLUSIONES	29
Referencias	
31Anexo A	34

RESUMEN

En este proyecto se integró una estación de diseño de sistemas de control en lazo cerrado aplicado a máquinas eléctricas y fuentes de energía renovable, como los sistemas eólicos y fotovoltaicos. Esta estación incluye: sistema fotovoltaico de 1.3 kW, motor de CD de 1 HP, motor de inducción trifásico jaula de ardilla de $\frac{3}{4}$ HP, generador de inducción doblemente alimentado de $\frac{1}{4}$ HP, tres inversores trifásicos tipo puente con IGBT, dos tarjetas de control y adquisición de datos dSPACE DS 1103 e interfaces de medición y acondicionamiento de señal para la activación de los IGBT de los inversores. En el presente informe se propone el diseño de un controlador descentralizado aplicado a un sistema eólico a escala que utiliza un generador de inducción doblemente alimentado, el cual incluye: 1) un controlador de velocidad de motor de CD, utilizado para emular la operación de la turbina de viento; 2) un controlador de par del generador, para maximizar la captura de la energía del viento; y 3) un controlador de voltaje del bus de enlace de CD en el convertidor lado de la red, para interconectar la energía generada en el circuito del rotor con la red eléctrica. La técnica de control aplicada en el sistema de control descentralizado se basa en una combinación de la técnica de linealización por control a bloques y modos deslizantes usando el algoritmo “supertwisting” de segundo orden. La robustez de los esquemas de control propuestos se valida en tiempo real, utilizando la estación de diseño de sistemas de control ubicada en el Laboratorio de Eléctrica del Instituto de Ingeniería y Tecnología (IIT) de la Universidad Autónoma de Ciudad Juárez (UACJ).

ABSTRACT

In this project a work-bench was integrated to operate as a design station of closed-loop control systems applied to electric machines and renewable energy systems such as wind and photovoltaics. The work-bench involves: 1.3 kW photovoltaic system, 1 HP DC- motor, $\frac{3}{4}$ HP induction motor type squirrel cage, $\frac{1}{4}$ HP induction generator type wound rotor, three SEMIKRON DC/AC converter, two dSPACE DS 1103 controller board, and measurement and TTL/CMOS conditioning inter-

8 faces. In this report, it is proposed a decentralized controller applied to scaled wind system that uses a doubly fed induction generator, this controller involves: 1) a DC motor velocity controller to emulate the wind turbine operation; 2) a DFIF torque controller to maximize the wind energy capture; and 3) a side grid converter controller to control the DC voltage bus of CA/DC/AC converter and feed the generated energy from rotor circuit toward de grid. The applied control technique at the decentralized control system is based on a combination of the block feedback linearization and sliding mode techniques using a second order SM super-twisting algorithm. The robustness of the proposed control schemes is validated in real time by using the control system design station, which is located at the Electrical Laboratory in the Technology and Engineering Institute of the Autonomous University of Juarez City.

Palabras clave: Sistema eólico, estación de diseño de sistemas de control, generador de inducción doblemente alimentado, modos deslizantes de segundo orden, algoritmo “supertwisting”, control por bloques.

USUARIOS POTENCIALES

Plantas industriales, empresas de servicios e instituciones educativas que requieran diseñar sistemas automáticos de control aplicados a las máquinas eléctricas y a la generación de energía eléctrica por medio de sistemas eólicos y fotovoltaicos. Además, es posible realizar investigaciones sobre el control automático de redes eléctricas que incluyan generación distribuida, de acuerdo al concepto de “smart grids”.

En el área educativa, los alumnos de los programas de licenciatura y maestría en Ingeniería Eléctrica, Ingeniería en Sistemas Digitales y Comunicaciones, e Ingeniería Mecatrónica podrán desarrollar proyectos de investigación y prácticas en las materias de Control Automático, Control No-lineal, Control Aplicado, Control de Máquinas, Teoría de Control I y Calidad de la Energía.

RECONOCIMIENTOS

Agradecemos al Programa para el Desarrollo Profesional Docente (Prodep), por el apoyo otorgado con la beca de reincorporación de ex-becario, al Instituto de Ingeniería y Tecnología (IIT) de la Universidad Autónoma de Ciudad Juárez (UACJ) por el apoyo en financiamiento, logística y construcción de la mesa prototipo.

Manifestamos nuestro reconocimiento a los alumnos que nos apoyaron en este proyecto, así como a los trabajadores de la dirección de planta física que realizaron la instalación y apoyaron en la construcción de este prototipo.

Diseño de un sistema de control descentralizado de un sistema eólico emulado con un grupo motor CD-generador CA

I. INTRODUCCIÓN

A partir de la década de los cincuenta, la industria a nivel mundial ha tenido un desarrollo permanente y prácticamente se ha incrementado en forma exponencial para satisfacer diversas necesidades en el ámbito industrial, comercial, residencial y en el transporte; este hecho ha impactado el crecimiento de la demanda en el consumo y en la generación de la energía eléctrica (Basalla, 1988).

Los seres humanos procuramos tener confort en nuestra vida y adquirimos aparatos de muy diversos tipos que son alimentados con electricidad. El uso de estos dispositivos para la realización de nuestras actividades diarias nos ha vuelto en gran medida dependientes de la energía eléctrica, por lo que es muy difícil concebir las actividades de la sociedad mundial actual sin la existencia suficiente de este tipo de energía.

Actualmente, un gran porcentaje de la energía eléctrica que se usa en el mundo proviene de combustibles fósiles, los cuales cada vez son más escasos, por lo cual su precio se incrementa de forma permanente. Ante este panorama, es necesaria una mayor capacidad de generación para satisfacer la demanda en el consumo y así cubrir las necesidades energéticas de la sociedad. Con la quema de combustibles fósiles como fuentes de energía primaria en las centrales termoeléctricas, la generación de energía eléctrica ha presentado un impacto negativo en nuestro medio ambiente por las altas emisiones de CO_2 . Por ello se han creado políticas energéticas entre los países más desarrollados para fomentar el uso de energías renovables, también conocidas como energías verdes o limpias. El estudio y el desarrollo de estas tecnologías verdes es de importancia fundamental para gobiernos, universidades e iniciativa privada en virtud de la mayor conciencia ambiental generada por los drásticos cambios climáticos producto del calentamiento global. Aunque bien es cierto que no existe evidencia contundente del calentamiento global, se asume que la gran cantidad de emisiones a la atmósfera ha propiciado este fenómeno. Es por eso que las tecnologías verdes jugarán un papel muy importante en el futuro cercano, al permitir que se cubran las necesidades eléctricas y reducir, en consecuencia, las emisiones de CO_2 (Ahiduzzaman & Sadrul, 2011; Themelis, 2007).

Una de las energías verdes que ha tenido mucho auge en las últimas décadas es la energía eólica (Bervrani, Ghosth, & Ledwich, 2010; Stanley, 2001; Manzano, Alcayde, Montoya, Zapata, & Gil, 2013), en la cual se aprovecha el frente de viento que incide en una turbina para producir potencia mecánica en la flecha, para luego convertirse en energía eléctrica al impulsar un generador (Burton, Sharpe, Jenkins, & Bossanyi, 2001). La energía eólica se ha convertido en una opción de generación muy rentable para suministrar energía a la red eléctrica. Además de ser la fuente de energía renovable con mayor desarrollo, cuenta con una capacidad instalada de aproximadamente 240 000 MW a nivel mundial. China, Estados Unidos, Alemania, España, Dinamarca y la India son los países con mayor capacidad instalada de sistemas eólicos (Gsänger & Pitteloud, 2012). Mientras tanto, México cuenta con una capacidad eólica instalada de más de 200 MW con sus tres parques eólicos en el estado de Oaxaca.

Mucha atención se ha enfocado en los sistemas eólicos como una fuente alternativa de generación de energía eléctrica, debido a la producción limpia e inagotable de potencia que caracteriza a la energía del viento. Cuando incide un frente de viento en la turbina eólica, la potencia mecánica producida en la flecha está en función de la velocidad del viento elevada al cubo (Caralis & Zervos, 2010). Sin embargo, los problemas tecnológicos principales de operación de los sistemas eólicos se relacionan con las características irregulares de la energía del viento, debido a su aleatoriedad y turbulencia. Adicionalmente, los usuarios demandan calidad en la energía eléctrica con una buena regulación de voltaje y un contenido mínimo de armónicos. Esto último puede lograrse por medio de un sistema de control automático robusto en lazo cerrado (Munteanu, Bractu, & Ceanga, 2008).

En la actualidad, la tendencia en las investigaciones realizadas en las universidades en relación con el diseño de controladores para los sistemas eólicos consiste, en la gran mayoría de los casos, en la implementación de una estación de diseño de sistemas de control para realizar pruebas experimentales involucrando un grupo motor CD-generador CA que emule la operación de un sistema eólico (Campbell & S., 2009; Arribas y otros, 2011; Ovando, Aguayo, & Cotorogea, 2007).

II. PLANTEAMIENTO

2.1 Antecedentes

Los esquemas de control para sistemas eólicos comúnmente se basan en una estrategia de control desacoplado usando algoritmos que van desde el control clásico,

Diseño de un sistema de control descentralizado de un sistema eólico emulado con un grupo motor CD-generador CA

tal como el control proporcional-integral tradicional (Munteanu, Bractu, & Ceanga, 2008), hasta los algoritmos de control óptimo (Qiao, Venayagamoorthy, & Harley, 2006); estos controladores han sido diseñados para realizar un seguimiento de la velocidad mecánica y mantener el factor de potencia del estator del generador de inducción doblemente alimentado (GIDA) en un nivel deseado preestablecido. Los esquemas de control desacoplado que se han propuesto se diseñan a partir del modelo de generador como planta, por lo que la ley de control está en función de los parámetros del generador y de perturbaciones externas.

Recientemente, para sobrellevar las limitaciones de los esquemas de control lineal desacoplados, se ha puesto mucha atención en la implementación de técnicas de control moderno, tal como la de control en modos deslizantes. Un controlador discreto por modos deslizantes aplicado a un sistema eólico fue propuesto en Ruiz, Sánchez, Loukianov, & Harley (2011) y se caracteriza por utilizar la ley de control equivalente, el cual es sensitivo a la variación de parámetros de la planta.

2.2 Marco teórico

En este proyecto se ha construido una estación de diseño de controladores en lazo cerrado de máquinas eléctricas, donde se puede configurar un sistema eólico emulado a pequeña escala, el cual está constituido por: un motor de CD acoplado con un generador de inducción doblemente alimentado (GIDA), un sistema de control descentralizado en lazo cerrado programado en una tarjeta de control dSPACE DS-1103, interfaces de medición y acondicionamiento de señales, y el software RTI para visualizar las señales del sistema en tiempo real y corroborar el desempeño del sistema eólico.

El diseño del sistema de control descentralizado en lazo cerrado se basa en la técnica de linealización por control a bloques (Loukianov, 2002) combinada con un algoritmo de modos deslizantes de segundo orden denominado “supertwisting” (Fridman & Levant, 1995). La técnica por control a bloques se utiliza para diseñar una superficie de deslizamiento en la cual las variables de error de seguimiento tienden asintóticamente a cero, mientras que el algoritmo “supertwisting” asegura convergencia robusta del movimiento de las variables de estado del sistema en lazo cerrado hacia la superficie diseñada, logrando este movimiento en un tiempo finito. El algoritmo de modos deslizantes de segundo orden propuesto establece una señal de control cuasi-continua acotada, por lo que el efecto “chattering”, que usualmente aparece en esquemas de control discontinuo, puede ser significativamente reducido (Levant, 1993).

III. METODOLOGÍA

3.1 Descripción del sistema de control

Con un sistema de control de velocidad del motor de CD, con magnetización constante, se puede emular la operación de la turbina de viento con muy buena aproximación. Su hardware está conformado por una interfaz de medición de las corrientes de los devanados de campo y de armadura; un sensor de velocidad con 2048 pulsos de resolución; una interfaz en Simulink/Matlab, donde se simula la dinámica del tren de flechas del aerogenerador teniendo como salida la velocidad de referencia para el control de seguimiento de velocidad; una tarjeta dSPACE DS1103 que tiene como salida una señal PWM (modulación por ancho de pulso) para activar los IGBT de un convertidor CD/CD tipo puente en “H” para acondicionar el nivel de voltaje en CD, que se debe aplicar al devanado de armadura para lograr el control de seguimiento de velocidad.

Con un controlador de par del GIDA, aplicado en el convertidor lado del rotor, se maximiza la captura de energía del viento en la turbina y se inyecta la mayor parte de la energía generada a la red eléctrica, a través del devanado del estator. Se tiene como hardware una interfaz de medición de voltajes y corrientes en el estator y de corrientes en el rotor, que proporciona información de entrada a la tarjeta de adquisición de datos dSPACE DS1103, donde se calcula el algoritmo de control, el cual actúa las compuertas de los IGBT del convertidor lado del rotor con la técnica SVPWM (modulación de ancho de pulso en el espacio vectorial), a través de una interfaz de acondicionamiento de señal TTL/CMOS, para establecer el nivel y frecuencia del voltaje que alimenta al devanado del rotor para lograr los objetivos de control.

Finalmente, con un controlador del convertidor lado de la red se regula el voltaje del bus de CD, para lograr un buen desempeño del controlador de par e interconectar la potencia generada en el circuito del rotor con la red eléctrica a través del convertidor CA/CD/AC, conformado por dos inversores conectados en la configuración “back to back” tradicional. Su hardware es similar al utilizado en el controlador de par con la diferencia, en la interfaz de medición, de que en este caso se sensan el voltaje en CD, los voltajes y corrientes de la red eléctrica y la inclusión de un filtro LC que se conecta en terminales del inversor lado de la red para reducir la distorsión en corriente (THD) de las tres fases. Con la operación simultánea de los tres subsistemas descritos se integra completamente el sistema de control automático descentralizado del sistema eólico a escala, el cual es mostrado en las figuras 1 y 2, mientras que los datos de placa y valores nominales para ambas máquinas son presentados en las tablas 1 y 2, en el anexo A.

Diseño de un sistema de control descentralizado de un sistema eólico emulado con un grupo motor CD-generator CA

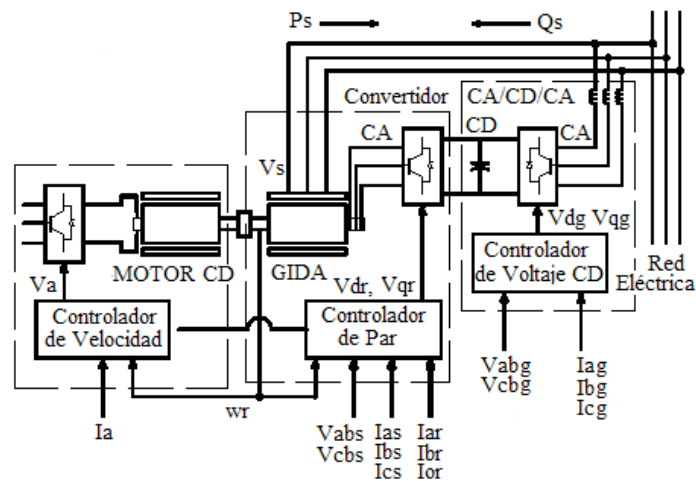


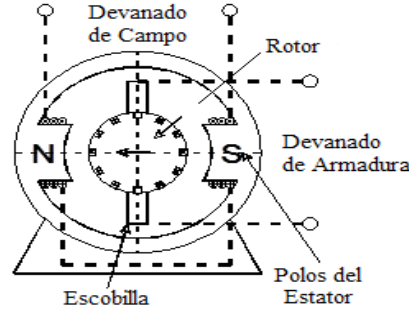
Fig. 2. Control de un sistema eólico a escala emulado en laboratorio



3.2 Controlador de velocidad del motor de CD

El motor de CD es construido con un devanado de campo montado en el estator utilizado para establecer la magnetización de la máquina, y un devanado de armadura montado en el rotor donde el flujo de potencia eléctrica produce el par mecánico del motor (ver figura 3). La ventaja principal de los motores de CD consiste en su simplicidad en la regulación del par y la velocidad. El marco teórico que se presenta en esta sección fue reportado en el congreso internacional American Control Conference en el 2012 (Morfin O. A. y otros, 2012).

Fig. 3. Esquema del motor de CD



Las ecuaciones de equilibrio en el motor de CD con magnetización constante, de fuerzas torsionales en el tren de flechas y de voltaje en el devanado de armadura son (Krause, Wasynczuk, & Sudhoff, 2002):

$$T_e - B_m \omega_m - T_g = J_m \frac{d\omega_m}{dt}$$

$$u_a = R_a i_a + L_a \frac{di_a}{dt} + K_f I_f \omega_m$$

donde ω_m e i_a son la velocidad angular y corriente de armadura; I_f es la corriente de campo que permanece constante; T_g es el par electromagnético de oposición establecido por el GIDA; u_a es el voltaje de alimentación aplicado al devanado de armadura; R_a y L_a son la resistencia e inductancia del devanado de armadura, respectivamente; J_m y B_m son el momento de inercia y el coeficiente de fricción del tren de flechas del grupo motor CD-generador AC, respectivamente; K_f es la constante de máquina considerando una relación lineal entre la corriente de campo y el flujo de magnetización que establece.

Despejando los términos que involucran las derivadas para la velocidad ω_m y corriente de armadura i_a en , se establece el modelo matemático del motor de CD con magnetización constante, el cual tienen la siguiente representación (Krause, Wasynczuk, & Sudhoff, 2002):

$$\frac{d\omega_m}{dt} = \frac{K_f I_f i_a}{J_m} - \frac{1}{t_m} \omega_m - \frac{1}{J_m} T_g$$

$$\frac{di_a}{dt} = -\frac{1}{t_a} i_a - \frac{K_f I_f \omega_m}{L_a} + \frac{1}{L_a} u_a,$$

Diseño de un sistema de control descentralizado de un sistema eólico emulado con un grupo motor CD-generador CA

donde τ_a es la constante de tiempo del devanado de armadura y τ_m es la constante de tiempo del tren de flechas del grupo motor CD-generator CA.

En el proceso de diseño del controlador de velocidad del motor de CD para emular la operación de la turbina eólica, se tiene la alternativa de aplicar la técnica de linealización por bloques para obtener una representación con dinámica equivalente del modelo de la planta, con variables de error de seguimiento de la velocidad del rotor y de la corriente de armadura. Una vez obtenida la representación en la forma controlable por bloques del sistema, el problema original de seguimiento de trayectoria se interpreta como un problema de estabilización de las variables de error de seguimiento. La primera variable de error que se define corresponde al error de seguimiento de velocidad y se define como

$$e_1 = \omega_{mref} - \omega_m$$

donde ω_{ref} es la velocidad angular de referencia que debe seguir el controlador, la cual es establecida por un exosistema que simula la ecuación de oscilación mecánica que involucra las masas de la turbina y generador, así como también sus coeficientes de fricción mecánica presente en los puntos de apoyo.

La dinámica del error de seguimiento de velocidad se obtiene a partir del modelo de la planta, y aplicando la técnica de linealización por control a bloques, esta dinámica debe ser estable y de primer orden de acuerdo con la siguiente expresión:

$$\dot{\varepsilon}_1 = \dot{\omega}_{ref} - \frac{K_f I_f}{J_m} i_a + \frac{1}{\tau_m} \omega_m + \frac{1}{J_m} T_g = -K_1 \varepsilon_1,$$

donde $K_1 > 0$. Al resolver en para la corriente de armadura se define la corriente de referencia para realizar el control a través de la corriente de armadura, resultando en

$$i_{ref} = \frac{K_1 J_m}{K_f I_f} \varepsilon_1 + \frac{B_m}{K_f I_f} \omega_m + \frac{J_m}{K_f I_f} \dot{\omega}_{mref} + \frac{1}{K_f I_f} T_g$$

La segunda variable de error de seguimiento se define como el error de seguimiento de la corriente de armadura de la forma siguiente:

$$e_2 = i_{ref} - i_a$$

Definiendo la dinámica de la variable de error de seguimiento en corriente al derivar, e involucrando la ecuación de estado de la corriente de armadura y, la representación en la forma controlable por bloques con las nuevas variables ε_1 y ε_2 es

16 representado como

$$\dot{\varepsilon}_1 = -K_1 \varepsilon_1 - \frac{K_f I_f}{J_m} \varepsilon_2$$

$$\dot{\varepsilon}_2 = -\left(\frac{B_m}{K_f I_f \tau_a} + \frac{K_f I_f}{L_a} + \frac{K_1^2 J_m}{K_f I_f} - \frac{K_1 B_m}{K_f I_f} - \frac{K_1 J_m}{K_f I_f \tau_a} \right) \varepsilon_1 - \left(\frac{1}{\tau_m} + \frac{1}{\tau_a} \right) \varepsilon_2$$

$$+ \frac{J_m}{K_f I_f} \ddot{\omega}_{ref} + \left(\frac{B_m}{K_f I_f} + \frac{J_m}{K_f I_f \tau_a} \right) \dot{\omega}_{ref} + \left(\frac{K_f I_f}{L_a} + \frac{B_m}{K_f I_f \tau_a} \right) \omega_{ref} + \frac{1}{K_f I_f} \dot{T}_g + \frac{1}{K_f I_f \tau_a} T_g - \frac{1}{L_a} u_a$$

La forma controlable por bloques equivalente a la planta tiene una forma escalonada de dos sistemas de primer orden, por lo que la variable de error de seguimiento de las corrientes puede ser seleccionada directamente para definir la superficie de deslizamiento (Utkin, Guldner, & Shi, 1999)

$$s = \mathbf{e}_2$$

Para forzar el movimiento en modos deslizantes del nuevo sistema, libre del efecto “chattering” sobre la superficie de deslizamiento $s = 0$, el algoritmo “supertwisting” es aplicado como ley de control en, el cual es definido por (Fridman & Levant, 1995); (Levant, 1993)

$$u_a = \lambda_1 |s|^{1/2} \text{sign}(s) + u_1$$

$$\dot{u}_1 = \begin{cases} V_a, & |u_a| > V_a \\ \lambda_2 \text{sign}(s), & |u_a| \leq V_a \end{cases}$$

donde V_a es el voltaje nominal del devanado de armadura del motor de CD. En (Fridman & Levant, 1995), (Moreno & Osorio, 2008), (Davila, Moreno, & Fridman, 2009) es mostrado que existen ganancias $\lambda_1 > 0$ y $\lambda_2 > 0$ tal que el vector de estados del sistema en lazo cerrado converge hacia la superficie $s = 0$ en tiempo finito.

Controlador de par electromagnético del GIDA

El generador de inducción doblemente alimentado (GIDA) se utiliza en sistemas eólicos de gran capacidad debido a que la mayoría del flujo de potencia generado se dirige directamente a la red eléctrica por el devanado del estator, mientras que el control del generador es establecido por el circuito del rotor, el cual se conecta a la red eléctrica a través de un convertidor CA/CD/AC, vía un juego trifásico de anillos rozantes

Diseño de un sistema de control descentralizado de un sistema eólico emulado con un grupo motor CD-generator CA

y escobillas. El convertidor tiene una capacidad del 30% de la potencia del generador y es apto para manejar la potencia eléctrica en forma bidireccional. Los devanados del estator y rotor del GIDA tienen una estructura física simétrica, están eléctricamente balanceados y sus ejes magnéticos están desfasados 120° espacialmente.

El GIDA puede operar arriba y debajo de la velocidad síncrona, a la cual gira el campo magnético en el entrehierro producido por las corrientes trifásica en el estator. Cuando la velocidad del rotor supera la velocidad de sincronismo, el flujo de potencia se dirige del rotor hacia la red, y cuando está debajo de la de sincronismo el sentido del flujo de potencia, se invierte (Munteanu, Bractu, & Ceanga, 2008). Con el sistema de control del convertidor lado del rotor identificado como controlador de par del GIDA, es posible controlar los flujos de potencia activa y reactiva, maximizando la captura de la energía del viento. El trabajo descrito en esta sección se publicó en las conferencias internacionales: “American Control Conference”, en 2012, e “International Conference on Electrical Engineering, Computing Science and Automatic Control” en 2009 (Morfin O. A., y otros, 2012) y (Morfín O. A. y otros, 2009).

Las ecuaciones de voltaje del GIDA, en convención generador, en terminales del estator y rotor en el sistema trifásico son establecidas por (Krause, Wasynczuk, & Sudhoff, 2002)

$$v_s = R_s i_s + L_s \frac{di_s}{dt} + L_{sr} \frac{di_r}{dt} + w_r \frac{dL_{sr}}{dq_r} i_r$$

$$v_r = R_r i_r + L_{sr}^t \frac{di_s}{dt} + L_r \frac{di_r}{dt} + w_r \frac{dL_{sr}^t}{dq_r} i_s$$

Donde los vectores de voltaje y corriente para el devanado del estator y rotor, respectivamente, son

$$V_s = \begin{bmatrix} V_{bs} \\ V_{cs} \\ V_{as} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i_{bs} \\ i_{cs} \\ i_{as} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_{br} \\ V_{cr} \\ V_{ar} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i_{br} \\ i_{cr} \\ i_{ar} \end{bmatrix}$$

Y las matrices de parámetros son dadas por

$$R_s = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix}, \quad R_r = \begin{bmatrix} R_r & 0 & 0 \\ 0 & R_r & 0 \\ 0 & 0 & R_r \end{bmatrix}, \quad L_s = \begin{bmatrix} L_{ss} & L_{sm} & L_{sm} \\ L_{sm} & L_{ss} & L_{sm} \\ L_{sm} & L_{sm} & L_{ss} \end{bmatrix}$$

$$L_r = \begin{bmatrix} L_{rr} & L_{rm} & L_{rm} \\ L_{rm} & L_{rr} & L_{rm} \\ L_{rm} & L_{rm} & L_{rr} \end{bmatrix}, \quad L_{sr} = L_{sm} \begin{bmatrix} \cos q_r & \cos \left(q_r + \frac{2p}{3} \right) & \cos \left(q_r + \frac{4p}{3} \right) \\ \cos \left(q_r + \frac{4p}{3} \right) & \cos q_r & \cos \left(q_r + \frac{2p}{3} \right) \\ \cos \left(q_r + \frac{2p}{3} \right) & \cos \left(q_r + \frac{4p}{3} \right) & \cos q_r \end{bmatrix}$$

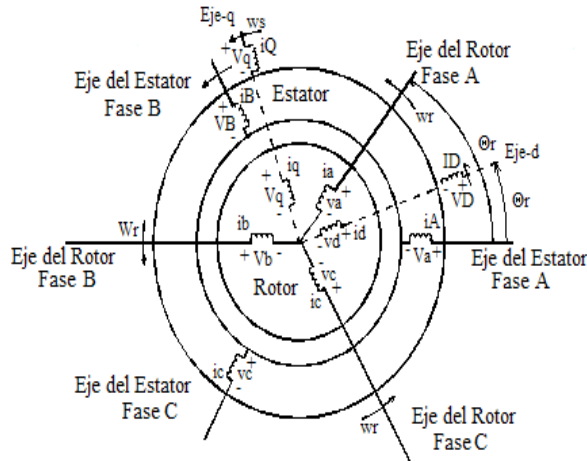
donde R_s y R_r son las resistencias del devanado del estator y rotor, respectivamente; L_{ss} y L_{sm} son las inductancias propias y mutuas del estator; L_{rr} y L_{rm} son las inductancias propias y mutuas del rotor; L_{srm} es la máxima inductancia mutua entre los devanados del estator y rotor, la cual varía en forma periódica debido al movimiento relativo entre los devanados del estator y el rotor (Morfin, Loukianov, & Cañedo, 2008).

Es práctica común, en el estudio de sistemas de potencia trifásicos, aplicar una transformación de similitud para referir las variables eléctricas del sistema trifásico en abc a una nueva base denominada marco de referencia ortogonal en dq , cuyos ejes giran en concordancia con la frecuencia de la red eléctrica. La transformación de similitud tiene la siguiente forma (Krause, Wasynczuk, & Sudhoff, 2002):

$$\mathbf{T}_{dq} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos \beta & \cos\left(\beta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\beta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ -\sin \beta & -\sin\left(\beta - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\beta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \frac{\sqrt{2}}{2} & \frac{\sqrt{2}}{2} & \frac{\sqrt{2}}{2} \end{bmatrix}$$

donde $\beta = \theta_s$ es usado para las variables del estator y $\beta = \theta_s - \theta_r$ es usado para las variables del rotor.

Fig. 4. Transformación de similitud del marco de coordenadas abc al dq



Al aplicar la transformación de similitud al modelo del GIDA en el marco de referencia trifásico abc se reduce el orden de la planta. Ahora todos los coeficientes son constantes en su totalidad y quedan desacopladas de los estados las entradas de

Diseño de un sistema de control descentralizado de un sistema eólico emulado con un grupo motor CD-generador CA

control, que corresponden a los voltajes de alimentación al devanado del rotor. Por lo tanto, el modelo del GIDA, en el marco de coordenadas dq , toma la siguiente forma (Morfin, Cañedo, & Loukianov, 2009):

$$\frac{d\mathbf{i}_s}{dt} = \mathbf{A}_{11}\mathbf{i}_s + \mathbf{A}_{12}\mathbf{i}_r + \mathbf{A}_{13}\mathbf{v}_s + \mathbf{B}_1\mathbf{v}_r$$

$$\frac{d\mathbf{i}_r}{dt} = \mathbf{A}_{21}\mathbf{i}_s + \mathbf{A}_{22}\mathbf{i}_r + \mathbf{A}_{23}\mathbf{v}_s + \mathbf{B}_2\mathbf{v}_r$$

donde los vectores de voltaje y corriente para el devanado del estator y rotor son definidos respectivamente como

$$\mathbf{v}_s = [v_{ds} \quad v_{qs}]^T; \quad \mathbf{i}_s = [i_{ds} \quad i_{qs}]^T; \quad \mathbf{v}_r = [v_{dr} \quad v_{qr}]^T; \quad \mathbf{i}_r = [i_{dr} \quad i_{qr}]^T;$$

y las matrices de parámetros quedan definidas como

$$\mathbf{A}_{11} = \begin{bmatrix} -\frac{R_s}{\sigma L_s} & \left(\omega_s + \frac{1-\sigma}{\sigma}\omega_r\right) \\ -\left(\omega_s + \frac{1-\sigma}{\sigma}\omega_r\right) & -\frac{R_s}{\sigma L_s} \end{bmatrix}; \quad \mathbf{A}_{12} = \begin{bmatrix} \frac{R_r L_m}{\sigma L_s L_r} & \omega_r \frac{L_m}{\sigma L_s} \\ -\omega_r \frac{L_m}{\sigma L_s} & \frac{R_r L_m}{\sigma L_s L_r} \end{bmatrix};$$

$$\mathbf{A}_{13} = \begin{bmatrix} -\frac{1}{\sigma L_s} & 0 \\ 0 & -\frac{1}{\sigma L_s} \end{bmatrix}; \quad \mathbf{B}_1 = \begin{bmatrix} \frac{L_m}{\sigma L_s L_r} & 0 \\ 0 & \frac{L_m}{\sigma L_s L_r} \end{bmatrix}; \quad \mathbf{B}_2 = \begin{bmatrix} -\frac{1}{\sigma L_r} & 0 \\ 0 & -\frac{1}{\sigma L_r} \end{bmatrix};$$

$$\mathbf{A}_{21} = \begin{bmatrix} \frac{R_s L_m}{\sigma L_s L_r} & -\omega_r \frac{L_m}{\sigma L_r} \\ \omega_r \frac{L_m}{\sigma L_r} & \frac{R_s L_m}{\sigma L_s L_r} \end{bmatrix}; \quad \mathbf{A}_{22} = \begin{bmatrix} -\frac{R_r}{\sigma L_r} & \left(\omega_s - \frac{1}{\sigma}\omega_r\right) \\ -\left(\omega_s - \frac{1}{\sigma}\omega_r\right) & -\frac{R_r}{\sigma L_r} \end{bmatrix};$$

$$\mathbf{A}_{23} = \mathbf{B}_1; \quad L_s = L_{ss} - L_{sm}; \quad L_r = L_{rr} - L_{rm}; \quad L_m = \frac{3}{2}L_{sr}; \quad \sigma = 1 - \frac{L_m^2}{L_s L_r};$$

donde σ es el factor de acoplamiento y es un factor estándar que se utiliza en el modelo de las máquinas eléctricas de CA; ω_s y ω_r son la frecuencia eléctrica del estator y rotor, respectivamente. Puede distinguirse, en el modelo matemático del GIDA en el marco de coordenadas dq , que la planta es no lineal, de cuarto orden, con dos en-

20 tradas eléctricas conocidas que corresponden a los voltajes de la red, y dos entradas de control las cuales son los voltajes de alimentación del circuito del rotor.

Las variables de salida controladas en sistemas eólicos que usan un GIDA son la potencia activa y reactiva de la energía generada, maximizando la captura de la energía del viento en la turbina. Estos objetivos de control pueden ser alcanzados en forma indirecta, controlando el par electromagnético o la velocidad del rotor y el factor de potencia del estator. Para validar la operación de la mesa de trabajo, los objetivos de control para el controlador del GIDA propuesto son formulados como: 1) controlar el par electromagnético T_e en un valor constante y 2) mantener un factor de potencia unitario en el estator fp_s .

Por lo tanto, el vector de las variables de salida controladas que ha sido seleccionado, tiene como componentes al par electromagnético T_e y la potencia reactiva del estator Q_s ; este vector puede ser expresado, en función de las corrientes, de la siguiente manera (Morfín, Cañedo, & Loukianov, 2009):

$$\begin{bmatrix} T_e & Q_s \end{bmatrix}^T = \begin{bmatrix} \mathbf{i}_s^T \mathbf{M}_T \mathbf{i}_r & \mathbf{v}_s^T \mathbf{M}_Q \mathbf{i}_s \end{bmatrix}^T \quad (13)$$

donde

$$\mathbf{M}_T = \begin{bmatrix} 0 & \frac{3}{4} PL_m \\ -\frac{3}{4} PL_m & 0 \end{bmatrix}; \quad \mathbf{M}_Q = \begin{bmatrix} 0 & \frac{3}{2} \\ -\frac{3}{2} & 0 \end{bmatrix}.$$

Por lo que respecta a la definición del vector de las funciones de referencia, se utiliza la siguiente formulación (Morfín, Cañedo, & Loukianov, 2009):

$$\begin{bmatrix} T_{eref} & Q_{sref} \end{bmatrix}^T = \begin{bmatrix} T_{eref} & \frac{\omega_{sin} \sqrt{1 - (pf_s)^2}}{pf_s} T_{eref} \end{bmatrix}^T \quad (14)$$

donde T_{eref} es el valor de referencia del par electromagnético en N.m, ω_{sin} es la velocidad de sincronismo en rad/s, y pf_s es el factor de potencia del devanado del estator.

En el proceso de diseño del controlador de par del GIDA, primero se define el vector de las variables de error de seguimiento como:

$$\boldsymbol{\varepsilon} = \begin{bmatrix} \varepsilon_T & \varepsilon_Q \end{bmatrix}^T = \begin{bmatrix} T_{eref} - T_e & Q_{sref} - Q_s \end{bmatrix}^T \quad (15)$$

Substituyendo 13 y 14 en 15 resulta

$$\boldsymbol{\varepsilon} = \begin{bmatrix} T_{eref} - \mathbf{i}_s^T \mathbf{M}_T \mathbf{i}_r & Q_{sref} - \mathbf{v}_s^T \mathbf{M}_Q \mathbf{i}_s \end{bmatrix}^T \quad (16)$$

Diseño de un sistema de control descentralizado de un sistema eólico emulado con un grupo motor CD-generador CA

Mediante un análisis de las componentes del vector de salida , de las variables de error de seguimiento para el par electromagnético y la potencia reactiva, e involucrando el modelo del sistema , puede comprobarse que ambas componentes tienen grado relativo uno, porque en su primer derivada aparece el control. Por lo tanto, la selección de la superficie de deslizamiento se corresponde con el vector de las variables de error de seguimiento, es decir

$$\mathbf{s} = [\varepsilon_T \quad \varepsilon_Q]^T = \mathbf{0} \quad (17)$$

Calculando la dinámica del vector de las variables de salida , el sistema equivalente al modelo del GIDA con nuevas variables toma la siguiente representación:

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{x}} &= \mathbf{F} + \mathbf{B}(\mathbf{i}_s, \mathbf{i}_r) \mathbf{v}_r \\ \frac{d\mathbf{i}_r}{dt} &= \mathbf{A}_{21}\mathbf{i}_s + \mathbf{A}_{22}\mathbf{i}_r + \mathbf{A}_{23}\mathbf{v}_s + \mathbf{B}_2\mathbf{v}_r \end{aligned} \quad (18)$$

donde

$$\mathbf{F} = \begin{bmatrix} (\mathbf{A}_{11}\mathbf{i}_s + \mathbf{A}_{12}\mathbf{i}_r + \mathbf{A}_{13}\mathbf{v}_s)^T \mathbf{K}_T \mathbf{i}_r + \mathbf{i}_s^T \mathbf{K}_T (\mathbf{A}_{21}\mathbf{i}_s + \mathbf{A}_{22}\mathbf{i}_r + \mathbf{A}_{23}\mathbf{v}_s) - 2b_2\omega_m \frac{1}{J_{tb}} (T_m - T_e) \\ \mathbf{v}_s^T \mathbf{K}_Q (\mathbf{A}_{11}\mathbf{i}_s + \mathbf{A}_{12}\mathbf{i}_r + \mathbf{A}_{13}\mathbf{v}_s) - 2G_a b_2 \omega_m \frac{1}{J_{tb}} (T_m - T_e) \end{bmatrix}$$

El nuevo sistema , con variables de error de seguimiento del par electromagnético y potencia reactiva, se caracteriza por estar acoplado respecto a las entradas de control \mathbf{v}_r por la siguiente matriz:

$$\mathbf{B}(\mathbf{i}_s, \mathbf{i}_r) = \begin{bmatrix} \mathbf{i}_r^T \mathbf{M}_T \mathbf{B}_1 + \mathbf{i}_s^T \mathbf{M}_T \mathbf{B}_2 \\ \mathbf{v}_s^T \mathbf{M}_Q \mathbf{B}_1 \end{bmatrix} \quad (19)$$

Se propone desacoplar el sistema con la siguiente transformación aplicada a la superficie de deslizamiento :

$$\mathbf{s}^* = \mathbf{B}^{-1}(\mathbf{i}_s, \mathbf{i}_r) \mathbf{s}, \quad (20)$$

Por lo tanto, el sistema desacoplado equivalente a la planta toma la siguiente forma:

$$\mathbf{g} = \mathbf{F}_s(\mathbf{i}_s, \mathbf{i}_r) - \mathbf{v}_r$$

(21)

$$\frac{d\mathbf{i}_r}{dt} = \mathbf{A}_{21}\mathbf{i}_s + \mathbf{A}_{22}\mathbf{i}_r + \mathbf{A}_{23}\mathbf{v}_s + \mathbf{B}_2\mathbf{v}_r$$

donde
$$\mathbf{F}_s(\mathbf{i}_s, \mathbf{i}_r) = \mathbf{B}^{\mathbf{r}^{-1}}(\mathbf{i}_s, \mathbf{i}_r)\mathbf{s} + \mathbf{B}^{-1}(\mathbf{i}_s, \mathbf{i}_r)[\mathbf{f}(\mathbf{i}_s, \mathbf{i}_r)].$$

y la ecuación de estado para el vector de las corrientes del rotor \mathbf{i}_r , se considera como una dinámica interna (residual).

Para inducir el movimiento de los estados en $\mathbf{s}^* = \mathbf{0}$ y por lo tanto en $\mathbf{s} = \mathbf{0}$, se aplica el algoritmo “supertwisting” como ley de control al sistema (Fridman & Levant, 1995)

$$\mathbf{v}_r = \lambda |\mathbf{s}^*|^{\frac{1}{2}} \text{sign } \mathbf{s}^* + \mathbf{v}_{r1}$$

$$\mathbf{g}_{r1} = \begin{cases} \mathbf{V}_b, & |\mathbf{v}_r| > |\mathbf{V}_b| \\ \alpha \text{sign } \mathbf{s}^*, & |\mathbf{v}_r| \leq |\mathbf{V}_b| \end{cases}$$

donde $\mathbf{V}_b = \mathbf{V}_b \mathbf{1}$, v_b es el voltaje CD del bus de enlace del convertidor CA/CD/CA. Las matrices diagonales λ y α tienen componentes cuyos valores se han seleccionado para que el vector de las variables de error de seguimiento sean estables y converjan al vector cero en tiempo finito, y en consecuencia los objetivos del control sean alcanzados (Moreno & Osorio, 2008).

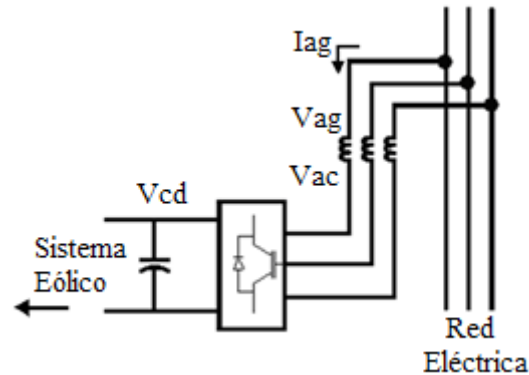
Controlador del convertidor lado de la red

Con el control del convertidor lado de la red es posible inyectar la potencia generada en el devanado del rotor con la red eléctrica, cuando la velocidad del rotor supera la velocidad de sincronismo, y alimentar el circuito del rotor desde la red eléctrica cuando la velocidad está por debajo de la de sincronismo. Es decir, el convertidor CA/CD/CA se comporta como una fuente trifásica bidireccional y es necesario conectar una bobina de acoplamiento en serie con un puente LC por cada fase para interconectar el circuito con la red eléctrica con un mínimo de distorsión en corriente.

Los objetivos de control del convertidor lado de la red son: 1) regular el voltaje CD del bus de enlace del convertidor CA/CD/CA en un valor deseado; 2) mantener el factor

de desplazamiento unitario en el flujo de potencia en forma bidireccional entre el circuito del rotor y la red eléctrica. El sistema del convertidor lado de la red consiste en un inversor trifásico tipo puente con seis IGBT, un banco de capacitores, tres bobinas de acoplamiento conectadas en serie con un puente LC cada una, la red eléctrica y el sistema de control donde la ley de control se acondiciona con la técnica SVPWM (modulación de ancho de pulso en espacio vectorial) para activar los semiconductores del inversor (ver figura 5). La metodología y desarrollo teórico presentados en esta sección fueron publicados en dos congresos internacionales: “American Control Conference”, en 2012 (Morfin O. A., y otros, 2012), e “International Conference on Electrical Engineering, Computing Science and Automatic Control” en 2011 (Morfin O. A., y otros, 2011).

Fig. 5. Sistema de convertidor lado de la red



El modelo del sistema del convertidor lado de la red se establece de acuerdo con el equilibrio de voltajes en terminales de las inductancias de acoplamiento y el flujo de potencia en el convertidor, y su representación en el marco de coordenadas abc es (Morfin O. A., y otros, 2011)

$$\mathbf{v}_g - \mathbf{v}_i = \mathbf{R}_c \mathbf{i}_g + \mathbf{L}_c \frac{d\mathbf{i}_g}{dt} \quad (23)$$

$$\mathbf{v}_b \mathbf{C}_b \frac{d\mathbf{v}_b}{dt} = \mathbf{v}_g^T \mathbf{i}_g$$

donde los vectores de voltaje y corriente en la red, y el vector de voltaje en terminales del convertidor, respectivamente, son

$$\mathbf{v}_g = [v_{ag} \quad v_{bg} \quad v_{cg}]^T; \quad \mathbf{i}_g = [i_{ag} \quad i_{bg} \quad i_{cg}]^T \quad \mathbf{v}_i = [v_{ai} \quad v_{bi} \quad v_{ci}]^T;$$

y las matrices de parámetros son

$$\mathbf{R}_c = \begin{bmatrix} R_c & 0 & 0 \\ 0 & R_c & 0 \\ 0 & 0 & R_c \end{bmatrix}; \quad \mathbf{L}_c = \begin{bmatrix} L_c & 0 & 0 \\ 0 & L_c & 0 \\ 0 & 0 & L_c \end{bmatrix};$$

donde R_c y L_c son la resistencia e inductancia de las bobinas de acoplamiento; C_b es la capacitancia del capacitor en el bus de enlace; y v_b es el voltaje en CD del bus de enlace de los dos inversores.

El sistema es de cuarto orden, y las señales eléctricas tienen forma senoidal a 60 Hz. Al aplicar la transformación de similitud para referir las variables del sistema de coordenadas abc al sistema dq , el modelo del convertidor lado de la red toma una representación más simple y de orden menor, similar a un modelo equivalente en CD

$$\frac{dv_b}{dt} = \frac{3}{2C_b v_b} \mathbf{v}_g^T \mathbf{i}_g \quad (24)$$

$$\frac{d\mathbf{i}_g}{dt} = C_1 \mathbf{i}_g + C_2 \mathbf{v}_g - D_1 \mathbf{v}_i$$

donde los vectores de voltaje y corriente en la red, y voltaje en terminales del convertidor en el sistema de coordenadas dq son:

$$\mathbf{i}_g = [i_{dg} \quad i_{qg}]^T; \quad \mathbf{v}_g = [v_{dg} \quad v_{qg}]^T; \quad \mathbf{v}_i = [v_{di} \quad v_{qi}]^T$$

y las matrices de parámetros son:

$$C_1 = \begin{bmatrix} -\frac{R_c}{L_c} & \omega_s \\ -\omega_s & -\frac{R_c}{L_c} \end{bmatrix}; \quad C_2 = \begin{bmatrix} \frac{1}{L_c} & 0 \\ 0 & \frac{1}{L_c} \end{bmatrix}; \quad C_3 = \begin{bmatrix} \frac{1}{L_c} & 0 \\ 0 & \frac{1}{L_c} \end{bmatrix}$$

R_c y L_c son la resistencia e inductancia de las bobinas de acoplamiento, respectivamente; y C_b es la capacitancia del banco de capacitores en el bus de enlace, mientras que ω_s es la frecuencia eléctrica de la red. Comúnmente, el eje d se alinea con el eje de la fase a al aplicar la transformación de similitud a los voltajes de la red, lo que

Diseño de un sistema de control descentralizado de un sistema eólico emulado con un grupo motor CD-generador CA

resulta en un valor de cero para el voltaje v_{qs} . El sistema está desacoplado respecto a las dos entradas de control v_{di} y v_{qi} , por lo que solamente dos variables de salida pueden ser controladas. Las salidas seleccionadas son: 1) el voltaje en CD del bus de enlace v_b localizado entre los dos inversores, y 2) el factor de desplazamiento unitario del flujo de potencia entre el circuito del rotor y la red eléctrica. Es importante resaltar que el objetivo principal de control consiste en mantener el voltaje de CD del bus de enlace en un valor deseado, sin tomar en cuenta la dirección del flujo de potencia entre el rotor y la red eléctrica (Morfin O. A., y otros, 2011).

En el proceso de diseño del controlador del bus, se procede a plantear un modelo equivalente con variables de error de seguimiento, del cual la primer variable se define como

$$\boldsymbol{\varepsilon}_1 = \boldsymbol{v}_{ref} - \boldsymbol{v}_b \quad (25)$$

donde v_{ref} es el nivel de voltaje de referencia en el bus de enlace.

Aplicando la técnica de linealización por control a bloques (Loukianov, 2002), donde se propone una dinámica estable de primer orden para la primera variable, la dinámica de la variable de error de seguimiento del voltaje de bus es

$$\dot{\boldsymbol{\varepsilon}}_1 = \boldsymbol{\varepsilon}_{ref} - \frac{3}{2C_b} \frac{1}{v_b} v_{dg} i_{dg} = -k_1 \boldsymbol{\varepsilon}_1 \quad (26)$$

Resolviendo para la corriente en i_{dg} e involucrando el error de seguimiento del voltaje $\boldsymbol{\varepsilon}_1$, se define la corriente de referencia, la cual establece la dinámica deseada del error de seguimiento del voltaje en CD del bus de la siguiente forma

$$i_{ref} = \frac{2}{3} k_1 C_b \frac{v_{ref} \boldsymbol{\varepsilon}_1 - \boldsymbol{\varepsilon}_1^2}{v_{dg}} \quad (27)$$

La segunda y tercera variables a definir para el nuevo sistema consisten en la variable de error de seguimiento en corriente y de potencia reactiva, como sigue:

$$\boldsymbol{\varepsilon}_2 = \boldsymbol{i}_{ref} - \boldsymbol{i}_{dg} \quad (28)$$

$$\boldsymbol{\varepsilon}_3 = \boldsymbol{Q}_{ref} - \boldsymbol{Q}_i \quad (29)$$

Evaluando la dinámica de las variables de seguimiento de la corriente y de la potencia reactiva [y] e involucrando i_{ref} y Q_{ref} , el nuevo sistema toma la siguiente representación:

$$\begin{aligned}
\mathfrak{E}_1 &= -k_1 \varepsilon_1 + \frac{3}{2C_b} \frac{1}{v_b} v_{dg} \varepsilon_2 \\
\mathfrak{E}_2 &= g_d + \frac{1}{L_c} v_{di} \\
\mathfrak{E}_3 &= g_q - \frac{3v_{dg}}{2L_c} v_{qi}
\end{aligned} \tag{30}$$

donde

$$\begin{aligned}
g_d &= -\frac{k_1}{v_{di}} \varepsilon_1 \varepsilon_2 - \frac{R_c}{L_c} \varepsilon_2 - \frac{2}{3} \frac{\omega_s}{v_{dg}} \varepsilon_3 + \left(\frac{k_1}{v_{dc}} + \frac{R_c}{L_c} \right) i_{ref} + \frac{2}{3} \frac{\omega_s}{v_{ds}} Q_{ref} - \frac{1}{L_c} v_{dg} \\
g_q &= -\frac{3}{2} \omega_s v_{dg} \varepsilon_2 - \frac{R_c}{L_c} \varepsilon_3 + \frac{3}{2} \omega_s v_{dg} i_{ref} + \mathfrak{E}_{ref} + \frac{R_c}{L_c} Q_{ref}.
\end{aligned}$$

El nuevo sistema con variables de error de seguimiento es de tercer orden y está desacoplado respecto a las entradas de control v_{di} y v_{qi} ; en consecuencia, las variables de deslizamiento son definidas como $s_d = \varepsilon_2$ y $s_q = \varepsilon_3$, y el algoritmo “supertwisting” es aplicado para definir el control del sistema, el cual es

$$\begin{aligned}
v_{ji} &= \lambda_j |s_j|^{\frac{1}{2}} \text{sign}(s_j) + v_j \\
\mathfrak{E}_j &= \alpha_j \text{sign}(s_j), \quad j = d, q.
\end{aligned}$$

donde los voltajes v_{di} y v_{qi} , como señales de control, establecen los voltajes en terminales del inversor lado de la red aplicando la técnica de modulación por ancho de pulso en el espacio vectorial (SVPWM).

IV. RESULTADOS

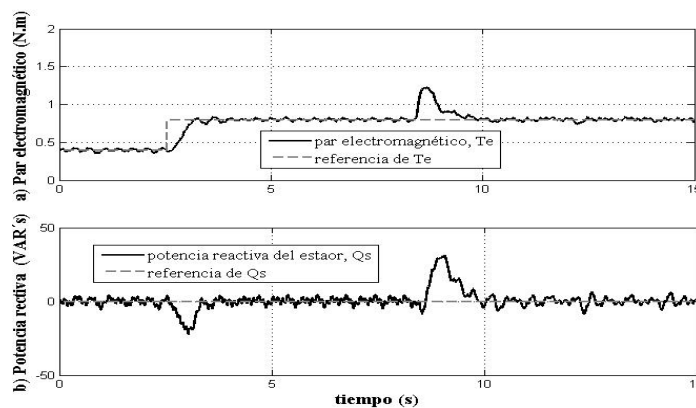
La robustez en la operación del sistema de control descentralizado en lazo cerrado es validada por medio de experimentos en tiempo real. El sistema de control principal corresponde al controlador del GIDA, el cual regula: 1) el par electromagnético en un valor constante, considerando su valor nominal de 1 N.m; y 2) el factor de potencia unitario del estator. En forma simultánea, el controlador del motor de CD regula la

Diseño de un sistema de control descentralizado de un sistema eólico emulado con un grupo motor CD-generador CA

velocidad angular del tren de flechas en un valor deseado, arriba y por debajo de la velocidad de sincronismo (188.5 rad/s). Además, el controlador del convertidor lado de la red regula: a) el voltaje CD del bus de enlace del convertidor CA/CD/CA en 100 Volts; y b) el factor de desplazamiento unitario entre el voltaje y la corriente por fase del flujo de potencia alimentado a la red eléctrica.

Se han configurado dos perturbaciones experimentalmente: 1) en 2.5 s, el valor de referencia del par electromagnético, T_{ref} , se incrementa de 0.4 a 0.8 N.m, lo cual representa una perturbación externa para el controlador del motor de CD; y 2) en 8.0 s, la velocidad del rotor se incrementa de 184 a 192 rad/s, superando la velocidad de sincronismo, y este cambio representa una perturbación externa para el controlador del GIDA.

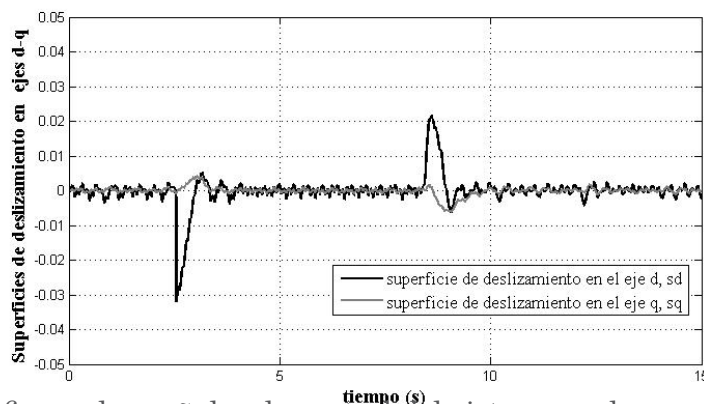
Fig. 6. Seguimiento de las variables de salida en el controlador de par



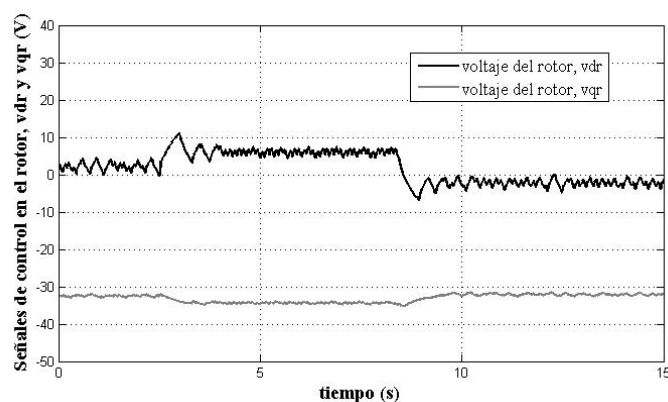
Los objetivos de control del GIDA se logran satisfactoriamente debido a que las respuestas dinámicas del par electromagnético y de la potencia reactiva del estator, como variables de salida controladas, siguen los valores de referencia con buena exactitud y rapidez, como se muestra en las figuras 6a y 6b, respectivamente. Cuando la referencia del par se cambia de 0.4 a 0.8 N.m, este evento representa una perturbación externa para el controlador de velocidad del motor de CD, por lo que se origina una pequeña oscilación en la velocidad angular en 2.5 s, la cual se estabiliza en un tiempo muy corto (ver figura 11). Por otro lado, cuando la velocidad angular de referencia en el controlador del motor de CD se cambia de 184 a 192 rad/s y supera la velocidad de sincronismo, este cambio representa una perturbación externa para el controlador de par del GIDA con una oscilación acotada y estable en 8.0 s.

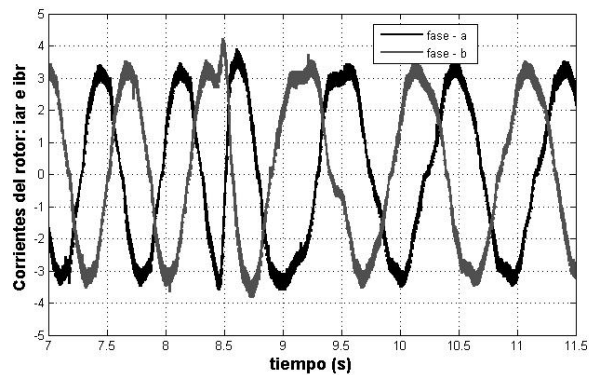
En relación con las respuestas dinámicas de las superficies de deslizamiento en los ejes d y q , se puede apreciar en la figura 7 que se presentan oscilaciones estables y de corta duración ante los cambios de las referencias en el par y en la velocidad, las cuales son modeladas como perturbaciones externas.

Fig. 7. Superficies de deslizamiento del controlador de par



En lo que se refiere a las señales de control del sistema en lazo cerrado del GIDA, que corresponden a los voltajes alimentados al rotor, v_{dr} y v_{qr} , se muestra que estas señales son cuasi-continuas y acotadas (ver figura 8). Por otro lado, las corrientes del rotor en las fases a y b son mostradas en la figura 9; como se puede apreciar, en 8.4 s la velocidad del rotor cambia de 184 a 192 rad/s superando la velocidad de sincronismo de 188.5 rad/s, lo que provoca que la secuencia de fases de los voltajes y corrientes del rotor cambien de secuencia positiva a negativa, por lo que después del cambio de velocidad, el flujo de potencia invierte su dirección, ahora del devanado del rotor hacia la red eléctrica.

Fig. 8. Voltajes del rotor como señales de control en el eje d y q 



Respecto al subsistema de control del convertidor lado de la red, la respuesta de sus variables controladas de salida se muestra en la figura 10. El voltaje en CD del bus de enlace v_b se controla en 100 Volts, aún en la presencia de cambios en la velocidad y en el par (ver figura 10 a) y el factor de desplazamiento se mantiene unitario debido a que la potencia reactiva se controla en 0 VAR (figura 10 b).

Para finalizar, la respuesta dinámica de la velocidad como variable de salida del subsistema de control del motor de CD se muestra en la figura 11. En 8.0 s, se presenta un cambio en la velocidad de referencia de 184 a 192 rad/s, y en 2.5 s se presenta un cambio en el par, como perturbación externa, mostrando un buen desempeño en el seguimiento de la velocidad de referencia.

Fig. 10. Seguimiento de las variables de salida del convertidor lado de la red

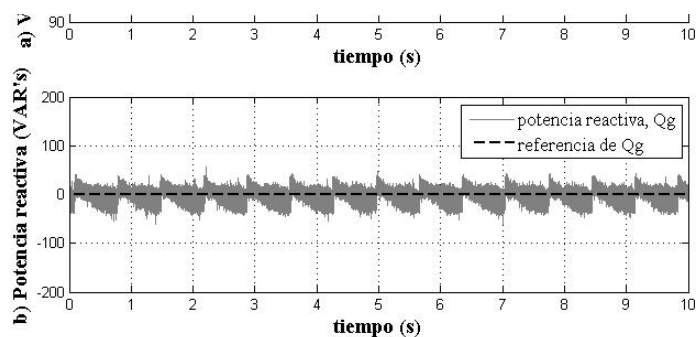
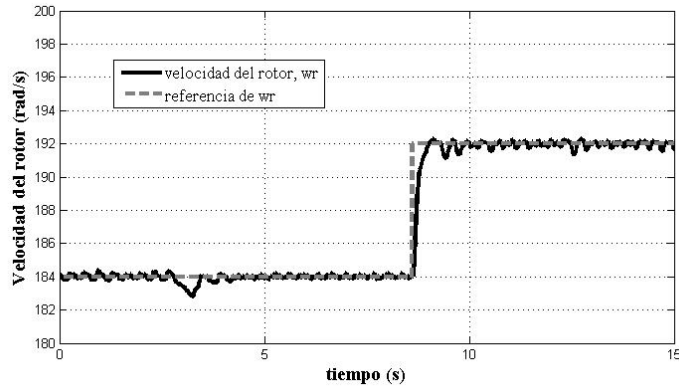


Fig. 11. Controlador de velocidad del motor de CD



V. CONCLUSIONES

Cuando el sistema de control descentralizado, que utiliza el algoritmo de modos deslizantes de segundo orden “supertwisting” combinado con la técnica de linealización por control a bloques, se aplica al grupo motor CD-GIDA utilizando la plataforma de la tarjeta dSPACE DS1103 e interfaces de medición y acondicionamiento de señal, es posible emular la operación en lazo cerrado de un sistema eólico a escala, utilizando el grupo motor CD-generator CA de la estación de diseño de sistemas de control construida.

De acuerdo con los resultados obtenidos en forma experimental, se corrobora la robustez de la operación del sistema de control descentralizado en lazo cerrado ante la presencia de perturbaciones externas, variación de parámetros y dinámicas no modeladas. Cuando se cambia el par de referencia en el controlador del GIDA, este evento representa una perturbación para el controlador de velocidad del motor de CD, y cuando la velocidad de referencia se cambia, representa una perturbación para el controlador de par del GIDA; estas perturbaciones son rechazadas por los controladores correspondientes.

Como principal resultado de la investigación, el controlador del GIDA regula el par electromagnético T_e , con lo que es posible maximizar la captura de energía del viento en una turbina de un sistema eólico y mantener el factor de potencia del estator del GIDA en un valor deseado. El seguimiento del par de referencia se alcanza satisfactoriamente cuando se cambia su valor de referencia y también cuando se supera la velocidad de sincronismo del generador.

Diseño de un sistema de control descentralizado de un sistema eólico emulado con un grupo motor CD-generator CA

Además, el subsistema de control del motor de CD regula la velocidad respecto a un valor de referencia deseado, por lo que puede emular la operación de la turbina de viento de un sistema eólico a escala. Finalmente, el controlador del convertidor lado de la red regula el voltaje en CD del bus de enlace del convertidor CA/CD/CA y mantiene el factor de desplazamiento unitario en el flujo de energía entre el circuito del rotor y la red eléctrica.

REFERENCIAS

- Ahiduzzaman, M., & Sadrul, A. K. (2011). Greenhouse gas emission and renewable energy sources for renewable and energy sources for sustainable development in Bangladesh. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 4659-4666.
- Arribas, J. R., Blázquez, F., Platero, C. A., Ramírez, D., Martines, S., A., S. J., & Herrero, N. (2011). Computer-based simulation and scaled laboratory bench system for the teaching and training of engineers on the control of doubly fed induction wind generators. *IEEE Transactions on Power Systems* vol. 26 no. 3, 1534-1543.
- Basalla, G. (1988). *The evolution of technology*. United Kingdom: Cambridge University Press.
- Bervrani, H., Ghosth, A., & Ledwich, G. (2010). Renewable energy sources and frequency regulation: survey and new perspectives. *IET Renewable Power Generation* vol. 4, Iss 5, 438-457.
- Burton, T., Sharpe, D., Jenkins, N., & Bossanyi, E. (2001). *Wind energy handbook*. Chichester, United Kingdom: John Wiley and Sons.
- Campbell, J., & S., S. (2009). Design and performance of a scaled electromechanical wind turbine power train model. *IEEE Power & Energy Society General Meeting* (pp. 1-6). St. Louis, MO, USA: Stringer.
- Caralis, G., & Zervos, A. (2010). Value of wind energy on the reliability of autonomous power systems. *IET Renewable Power Generation* vol. 4, Iss. 2, 186-197.
- Davila, A., Moreno, J. A., & Fridman, L. (2009). Optimal Lyapunov function selection for reaching time estimation of Super Twisting Algorithm. *IEEE Conference on Decision and Control* (pp. 8405-8410). Shanghai, China.
- Fridman, L., & Levant, A. (1995). High order sliding modes as a natural phenomenon in control theory. *Ser. Lectures Notes in Control and Information Science* vol. 217, 107-133.

32 Gsänger, S., & Pitteloud, J. D. (2012). *Technical Report*. Alemania: World Wind Energy Association.

Krause, P., Wasynczuk, O., & Sudhoff, S. (2002). Analysis of electric machinery and drive systems. *IEEE Press Power Engineering Series*.

Levant, A. (1993). Sliding order and sliding accuracy in sliding mode control. *International Journal of Control* vol. 58 no. 6, 1247-1263.

Loukianov, A. (2002). Robust block decomposition sliding mode control design. *Mathematical Problems in Engineering*, 349-365.

Manzano, F., Alcayde, A., Montoya, F., Zapata, A., & Gil, C. (2013). Scientific production of renewable energies worldwide: an overview. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* vol. 18, 134-143.

Moreno, J., & Osorio, M. (2008). A Lyapunov approach to second-order sliding mode controllers and observers. *IEEE Conference on Decision and Control* (pp. 2856-2861). Cacun.

Morfín, O. A., Cañedo, J., & Loukianov, A. (2009). Direct electromagnetic torque controller of a wound rotor induction generator via second order sliding modes. *International Conference on Electrical Engineering* (pp. 1-6). Toluca, México.

Morfín, O. A., Loukianov, A. G., Ruiz, R., Sánchez, E. N., Castellanos, M. I., & Valenzuela, F. A. (2012). Torque controller via second order sliding modes of WRIG impelled by DC-motor for application in wind systems. *American Control Conference* (pp. 985-990). Montreal, Canadá.

Morfín, O. A., Loukianov, A. G., Ruiz, R., Sánchez, E. N., Valenzuela, F., & Castellanos, M. I. (2011). Grid side converter controller applied in wind systems via second order sliding modes. *International Conference on Electrical Engineering, Computing Science and Automatic Control* (pp. 1-6). Mérida, México.

Morfín, O., Loukianov, A., & Cañedo, J. (2008). Robust non-linear control of a wound rotor induction generator: integral sliding modes. *North American Power Symposium* (pp. 1-6). Calgary, Canadá.

Munteanu, I., Bractu, A., & Ceanga, E. (2008). *Optimal control of wind energy systems*. London: Springer.

Ovando, R., Aguayo, J., & Cotorogea, M. (2007). Emulation of a low power wind turbine with a DC motor in Matlab/Simulink. *Power Electronics Specialists Conference* (pp. 859-864). Orlando, Florida.

Qiao, W., Venayagamoorthy, G. K., & Harley, R. G. (2006). Design of optimal PI

Diseño de un sistema de control descentralizado de un sistema eólico emulado con un grupo motor CD-generador CA

controllers for doubly fed induction generators driven by turbines using particle swarm optimization. International Joint Conference on Neural Networks (pp. 1982-1987). Vancouver, BC, Canadá.

33

Rashid, M. H. (2001). Power electronics handbook. Academic Press.

Ruiz, R., Sánchez, E. N., Loukianov, A. G., & Harley, R. G. (2011). Discrete-time block control of a doubly fed induction generator coupled to a wind turbine. IEEE International Conference on Control Applications (pp. 1321-1326). Denver, Colorado, Estados Unidos.

Stanley, R. (2001). Renewable Power Generation. Proceedings of the IEEE vol. 89 núm. 8, 1216-1226.

Themelis, N. J. (2007). Renewable energy instead of greenhouse gas. Waste to Energy, 1 -13.

Utkin, V. I., Guldner, J., & Shi, J. (1999). Sliding mode control in electromechanical systems. Taylor & Francis.

ANEXO 1

Tabla 1. Valores nominales del GIDA y del motor CD

GIDA		Motor de CD	
Potencia	180 W	Potencia	$\frac{3}{4}$ HP
Voltaje del estator	208/120 V	Voltaje de campo	100 V
Voltaje del rotor	104/60V	Corriente de armadura	7.5 A
Corriente del estator	0.86/1.5 A	Corriente de campo	0.6 A
Corriente del rotor	1.15/2 A	Velocidad nominal	1750 rpm

Tabla 2. Parámetros del motor de CD y GIDA

GIDA		Motor de CD	
Resistencia del estator, R_s	12.6 Ω	Resistencia de armadura, R_a	1.27 Ω
Resistencia del rotor, R_r	16.7 Ω	Inductancia de armadura, L_a	0.821 H
Inductancia del estator, L_s	0.376 H	Momento de inercia, J_m	0.0022 Nms ²
Inductancia de magnetización, L_m	0.352 H	Coefficiente de fricción, B_m	0.0015 Nms
Inductancia del rotor, L_r	0.38 H		
Momento de inercia, J_g	0.0016 Nms ²		
Relación de vueltas estator-rotor	516/264		
Coefficiente de fricción, B_g	0.00094 Nms		