

Identificación y control multivariable en espacio de estados de un generador eólico de imanes permanentes

EDUARDO GIRALDO SUÁREZ¹
DANNA LISSETH ALBARRACÍN ÁVILA²

RESUMEN

En el presente artículo se muestran los resultados del método de identificación utilizado en sistemas multivariables, y cómo a partir de una adecuada identificación de estos sistemas se obtiene un rendimiento competente de los controladores por realimentación de variables de estado que son implementados. Existen métodos de identificación que se basan en subespacios y tienen gran aceptación por las atractivas características que poseen. Estos métodos proporcionan las matrices y el estado inicial, que representan y configuran el modelo lineal de espacios de estados del sistema por controlar, que es discreto e invariante en el tiempo. Con la identificación establecida del sistema multivariable, se procede a implementar controladores que estiman y realizan la respectiva corrección de estimación de variables de estado ante cualquier perturbación, interna o externa, que pueda afectar al sistema en un determinado instante de tiempo, y así, disminuir el efecto de las incertidumbres que se tengan sobre la dinámica real de la planta.

Palabras clave: identificación, control, observador adaptativo, realimentación, tiempo discreto.

¹ Doctor en Ingeniería, Línea Automática, por la Universidad Nacional de Colombia, Manizales, Colombia. Magíster en Ingeniería Eléctrica por la Universidad Tecnológica de Pereira, Colombia. Ingeniero eléctrico por la Universidad Tecnológica de Pereira, Colombia. Profesor asociado del programa de Ingeniería Eléctrica de la Universidad Tecnológica de Pereira, Colombia. Correo electrónico: egiraldos@utp.edu.co.

² Ingeniera electricista por la Universidad Tecnológica de Pereira, Colombia. Estudiante de la Maestría en Ingeniería Eléctrica en la Universidad Tecnológica de Pereira, Colombia. Correo electrónico: dlalbarracin@utp.edu.co

FECHA DE RECEPCIÓN: 2 DE FEBRERO DEL 2014 • FECHA DE APROBACIÓN: 19 DE MAYO DEL 2014

Cómo citar este artículo: Giraldo Suárez, E. y Albarracín Ávila, D.L. (2014). Identificación y control multivariable en espacio de estados de un generador eólico de imanes permanentes. *Épsilon* (22), 169-188.

Identification and Multivariable State-Space Control of a Permanent Magnet Wind Generator

ABSTRACT

This article presents the results of the identification method used in multivariable systems, and how, through a proper identification of these systems, a competent controller performance is obtained by feedback on the state variables implemented. There exist identification methods that are based on subspaces and have great acceptance due to the attractive features they possess. These methods provide the matrices and the initial state that represent and constitute the linear state space model of the system to control, which is discrete and time-invariant. With the multivariable system identification established, it is necessary to implement controllers that estimate and perform the respective correction of the state variables estimation in light of any disturbance, internal or external, that may affect the system at a given instant of time, and thus reduce the effect of possible uncertainties about the actual dynamics of the plant.

Keywords: identification, control, adaptive observer, feedback, discrete time.

Identificação e controle multivariável em espaço de estados de um gerador eólico de ímãs permanentes

RESUMO

Neste artigo se mostram os resultados do método de identificação utilizado em sistemas multivariáveis, e como a partir de uma adequada identificação destes sistemas se obtém um rendimento competente dos controladores por realimentação de variáveis de estado que são implementados. Existem métodos de identificação que se baseiam em subespaços e têm grande aceitação devido às atraentes características que possuem. Estes métodos proporcionam as matrizes e o estado inicial, que representam e configuram o modelo lineal de espaços de estados do sistema a controlar, que é discreto e invariante no tempo. Com a identificação estabelecida do sistema multivariável, procede-se a programar controladores que estimam e realizam a respectiva correção de estimação de variáveis de estado perante qualquer perturbação, interna ou externa, que possam afetar o sistema em um determinado instante de tempo, e da mesma forma, diminuir o efeito das incertezas que se tenham sobre a dinâmica real da planta.

Palavras chave: identificação, controle, observador adaptativo, realimentação, tempo discreto.

Introducción

Con la limitación existente de los recursos de la energía fósil y con la preocupación por el aumento de la contaminación del medioambiente, se ha iniciado, en todos los países del mundo, un importante proceso de desarrollo basado en energías renovables para el sostenimiento de la sociedad humana. Los impactos ambientales de las energías renovables son pequeños, por lo que la incorporación o combinación de estas fuentes de energía a los sistemas de energía o potencia logra que cada vez más la comunidad científica se especialice en obtener la mayor eficiencia de cada una de las fuentes, a partir de estudios o investigaciones. La energía eólica desempeña un papel importante en la energía renovable, por lo cual se ha incrementado el interés en un análisis (Baggu *et al.*, 2006) acoplado a sistemas de potencia (Verma *et al.*, 2013). Esto conlleva el estudio de los efectos que tiene la velocidad del viento variable y las perturbaciones en el sistema (Kodama *et al.*, 2002), así como proponer varios desarrollos en técnicas de control de los generadores (Ernst *et al.*, 2007).

El desarrollo y la evolución de la teoría de control permiten implementar diferentes técnicas tanto de identificación como de control. Entre las técnicas de control existentes se mencionan, como técnicas básicas, el tradicional controlador proporcional integral derivativo (PID) y el control por reubicación de polos (Mejía *et al.*, 2007). En uno de los primeros controladores utilizados en un sistema turbina-generador se implementó un control de tono individual para minimizar las cargas de los componentes del sistema (Pao *et al.*, 2011).

Con base en su principio de funcionamiento, los sistemas de control pueden emplear o no información acerca de la planta, a fin de elaborar estrategias de supervisión y control. Se cuenta así con dos tipos de sistemas de control: de lazo abierto y de lazo cerrado. Los sistemas de control adaptativo están basados en la identificación de los parámetros que caracterizan o modelan el generador. En trabajos recientes (Wu *et al.*, 2006) se plantean diversas técnicas de control que se han estudiado intensamente para controlar tanto los componentes no lineales (Nakamura *et al.*, 2002) como los componentes que tienen alta complejidad en los sistemas de potencia (Weihua *et al.*, 2012).

Sin embargo, estas técnicas de control tienen pocas aplicaciones reales, debido, probablemente, a sus estructuras complicadas o a la falta de confianza en su estabilidad. Con la utilización de convertidores de frecuencia variable se puede lograr

un control completo del generador solo con una fracción de la potencia total, para así aumentar la eficiencia de los generadores (Chakravarty *et al.*, 2011). Los controladores proporcionales integrales (PI) de los generadores, especialmente del generador de inducción doblemente alimentado (DFIG), incluyen tres grupos de parámetros que tienen una influencia crucial en la dinámica del sistema DFIG; por tanto, se ha desarrollado un cúmulo de métodos para determinarlos. A su vez, estos pueden clasificarse en enfoque basado en experiencia y experimento (método complejo que requiere una gran cantidad de experimentos), enfoque basado en un modelo simple independiente (requiere prueba de campo para sintonizar estos parámetros) y modelo completo basado en enfoque coordinado (método que tiene en cuenta la interacción de los tres grupos). Utilizando estos métodos, los parámetros pueden ser encontrados a través de la experiencia y en una serie de experimentos (Ancheng *et al.*, 2012).

En este artículo se analiza detalladamente el modelado matemático de los aerogeneradores, estudiando principalmente el problema de la interacción entre sus variables. Por ello, se proponen esquemas de identificación de sistemas multivariables no lineales basados en un modelo lineal, con el fin de mejorar el rendimiento de respuesta de los aerogeneradores identificados. Finalmente, se evalúan las respuestas del sistema con controladores, desde los parámetros establecidos en los esquemas de identificación y en la variación de carga o perturbaciones en los sistemas.

Descripción del modelo

El modelo de un aerogenerador con un generador síncrono de imanes permanentes (PMSG, por sus siglas en inglés) está compuesto a partir de los submodelos de la turbina, la transmisión y el generador síncrono. Una estructura general se muestra en la figura 1.

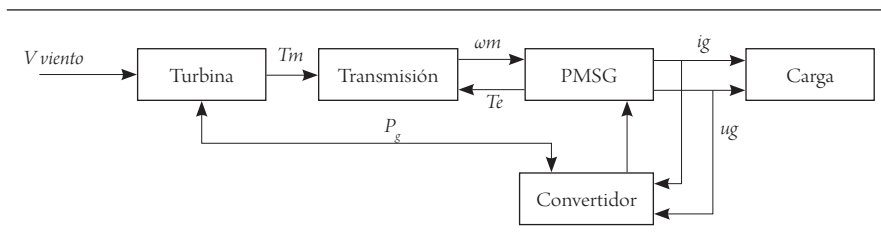


Figura 1. Estructura general de la turbina eólica

Fuente: elaboración propia.

Modelo de la turbina

La turbina eólica extrae la potencia del viento y luego la convierte en energía mecánica (Sánchez *et al.*, 2007). La potencia extraída del viento esté expresada como:

$$P_w = \frac{\pi \rho R a^2}{2} C_p(\lambda) v^3 \quad (1)$$

Donde ρ es la densidad del aire, Ra es el radio de la zona cubierta por el viento y v es la velocidad del viento. El torque producido por el viento es presentado en (2):

$$T_{wt} = \frac{\pi \rho R a^3}{2} C_p(\lambda) v^2 \quad (2)$$

Donde C_p es el coeficiente de potencia en función de la velocidad de punta, y su aproximación se describe en (3):

$$C_p(\lambda) = 0,22 \left(\frac{116}{\lambda} - 5 \right) e^{-\frac{12,5}{\lambda}} \quad (3)$$

La velocidad de punta se muestra en (4):

$$\lambda = \frac{\omega_t R a}{v} \quad (4)$$

La velocidad en el lado del generador se muestra en (5), donde G es el coeficiente multiplicador de la caja de cambios:

$$\omega_H = \omega_L G \quad (5)$$

Una aproximación de segundo orden es calculada a través de la técnica de mínimos cuadrados (6):

$$C_p = a_0 + a_1 \lambda + a_2 \lambda^2 \quad (6)$$

El torque producido por el viento en el lado del generador es (7):

$$T_m = \frac{T_{wt}}{G} \quad (7)$$

Al reemplazar las ecuaciones (4) y (6) en (2), el torque en el lado del generador está representado por la aproximación (8):

$$T_m = \frac{d_1 v^2}{G} + \frac{d_2 v \omega_H}{G^2} + \frac{d_3 \omega_H^2}{G^3} \quad (8)$$

Tren de transmisión

El tren de transmisión del PMSG consiste de cinco partes: rotor, eje de baja velocidad, caja de cambios, eje de alta velocidad y generador. Cuando el estudio se centra en la interacción entre los parques eólicos y las redes de corriente alterna (AC) del tren de transmisión, puede ser tratado como un modelo de masa despreciable en aras de la eficiencia del tiempo y la precisión adecuada. Por tanto, el tren de transmisión adopta la forma del modelo de masa despreciable, como se muestra en la ecuación (9), con los parámetros referidos al lado del generador (Yin *et al.*, 2007):

$$\begin{cases} \frac{d\omega}{dt} = (T_e - T_m - B_m \omega_H) \frac{1}{J_H} \\ \frac{d\theta}{dt} = \omega_H \end{cases} \quad (9)$$

Donde ω_H es la velocidad angular, T_e es el torque eléctrico, T_m es el torque mecánico, B_m es la constante de amortiguación igual a cero, J_H es el coeficiente de inercia y θ representa ángulo de posición angular.

Modelo del generador síncrono de imanes permanentes (PMSG)

El PMSG se ha considerado como un sistema que hace posible la producción de electricidad a partir de la energía mecánica obtenida del viento. El modelo matemático del PMSG utiliza las coordenadas estacionarias y las coordenadas del rotor, como se muestra en las ecuaciones (10) a (12):

$$\frac{d\theta}{dt} = \omega_H \quad (10)$$

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{T_e}{J} - \frac{T_m}{J} \quad (11)$$

$$\mu_{sab} = Ri_{sab} + L_s \frac{di_{sab}}{dt} + \omega_H \varphi_m e^{j\mu_{pe}} \quad (12)$$

En coordenadas estacionarias, las tensiones y corrientes están desfasadas en 90° , n_p es el número de pares de polos, R es la resistencia del estator en ohmios, L_s es la inductancia del estator en Henrios, θ es el ángulo de posición angular en rad , ω es la velocidad angular en rad/s , i_{sab} y u_{sab} representan las tensiones y corrientes del estator en los ejes a y b , respectivamente, T_m es el torque mecánico en Newton-metro (Nm), T_e es el torque eléctrico en Newton-metro (Nm), φ_m es el flujo magnético en el rotor en Weber y ϵ representa el ángulo de rotación en rad (Sánchez *et al.*, 2009). El torque de la máquina eléctrica está expresado por el flujo y las corrientes del estator, como se muestra en la ecuación (13):

$$T_e = \varphi_a i_b - \varphi_b i_a \quad (13)$$

Por la aplicación de la transformación de Park, el modelo se presenta como un generador con corrientes negativas. El sistema es expresado en las coordenadas del rotor, lo cual hace que el diseño del motor sea simple porque sus señales son tratadas como corriente directa y se reducen a trabajar en dos ejes. El sistema es modelado con el conjunto de ecuaciones (14)-(17), donde i_{dq} y i_{dq} representan las corrientes y las tensiones del estator en los ejes d y q , respectivamente:

$$\frac{d\theta}{dt} = \omega_H \quad (14)$$

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{n_p}{J} \varphi_m i_q - \frac{T_m}{J} \quad (15)$$

$$u_d = -Ri_d + n_p L_s \omega_H i_q - L_s \frac{di_d}{dt} \quad (16)$$

$$u_q = -Ri_q - n_p L_s \omega_H i_d - L_s \frac{di_q}{dt} + \omega_H \varphi_m \quad (17)$$

El sistema en espacio de estado es representado en (18)-(21). Para alimentar una carga $R_L - L$, L es la inductancia de la carga, R_L es la resistencia de la carga, J_H representa el coeficiente de inercia en el lado del generador y η es el coeficiente de rendimiento de transmisión. El vector de estado es $x = [x_1, x_2, x_3]^T = [i_d, i_q, \omega_H]^T$, las entradas del sistema son $u = [u_1, u_2]^T = [R_L, v]^T$ y la velocidad del rotor ω es la salida:

$$\frac{dx_1}{dt} = \frac{1}{L+L_s}(-Rx_1 + n_p(L+L_s)x_2x_3 - x_1u_1) \quad (18)$$

$$\frac{dx_2}{dt} = \frac{1}{L+L_s}(-Rx_2 + n_p(L+L_s)x_1x_3 + n_p\phi_m x_3 - x_2u_1) \quad (19)$$

$$\frac{dx_3}{dt} = \frac{1}{J_H} \left(\eta \left(\frac{d_1}{G} u_2^2 + \frac{d_2}{G^2} u_2 x_3 + \frac{d_3}{G^3} x_3^2 \right) - n_p \phi_m x_2 \right) \quad (20)$$

$$y = [001]x \quad (21)$$

Esquema de identificación de sistemas multivariables

El modelo general lineal se considera invariante en el tiempo y discreto en el espacio de estados (Jamaludin *et al.*, 2013):

$$x_{k+1} = Ax_k + Bu_k + w_k \quad (22)$$

$$y_k = Cx_k + Du_k + v_k \quad (23)$$

Donde $x_k \in \mathfrak{R}^n$, $y_k \in \mathfrak{R}^m$ y $u_k \in \mathfrak{R}^m$ son los estados del sistema, las salidas y las entradas, respectivamente; mientras que $w_k \in \mathfrak{R}^n$ y $v_k \in \mathfrak{R}^m$ son secuencias de ruido desconocidas adicionales. El ruido desconocido del conjunto de ecuaciones (22) y (23) se omite por un tiempo para la determinación de las matrices del sistema. Por tanto, se considera el siguiente sistema lineal invariante en el tiempo discreto:

$$x_{k+1} = Ax_k + Bu_k \quad (24)$$

$$y_k = Cx_k + Du_k \quad (25)$$

El objetivo es estimar las matrices del sistema A , B , C y D con dimensiones apropiadas. Una ecuación importante en la derivación de los algoritmos de identificación del subespacio de sistemas de espacio de estado es aquella relativa a los datos relativos (*block*); matrices Hankel construidas a partir de las muestras de datos de entrada-salida. Los bloques de matrices de Hankel de salida se definen como:

$$Y = \begin{bmatrix} y_1 & y_2 & y_3 & \dots & y_j \\ y_2 & y_3 & y_4 & \dots & y_{j+1} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ y_i & y_{i+1} & y_{i+2} & \dots & y_{i+j-1} \\ \hline y_{i+1} & y_{i+2} & y_{i+3} & \dots & y_{i+j} \\ y_{i+2} & y_{i+3} & y_{i+4} & \dots & y_{i+j+1} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ y_{2i} & y_{2i+1} & y_{2i+2} & \dots & y_{2i+j+1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_p \\ Y_f \end{bmatrix} \quad (26)$$

Donde los subíndices p y f representan pasado y futuro, i son filas y j representan las columnas del bloque. El bloque de entrada de las matrices de Hankel U_p y U_f también se pueden definir de la misma manera. La matriz de entrada-salida desempeña un papel importante en el problema tratado de la identificación del subespacio lineal y se puede obtener por sustitución recursiva de (27) y (28):

$$Y_p = \Gamma_i X + H_i U_p \quad (27)$$

$$Y_f = \Gamma_i X + H_i U_f \quad (28)$$

La matriz de observabilidad extendida se define como:

$$\Gamma = \begin{bmatrix} C \\ CA \\ CA^2 \\ \vdots \\ CA^{i-1} \end{bmatrix} \quad (29)$$

Las secuencias del vector de estado X se dan de la siguiente manera:

$$X = (x_k \ x_{k+1} \ x_{k+2} \ \dots \ x_{k+j-1}) \quad (30)$$

El bloque inferior de la matriz de Toeplitz (H) se define como:

$$H = \begin{bmatrix} D & \vdots & \dots & \vdots \\ CB & D & \dots & \vdots \\ CAB & CB & \dots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ CA^{i-2}B & CA^{i-2}B & \dots & B \end{bmatrix} \quad (31)$$

El bloque de la matriz de Toeplitz (H) es la concatenación de H_p y H_f definida por (32) y (33):

$$H_p = \begin{bmatrix} u_k & u_{k+1} & \dots & u_{k+j-1} \\ y_k & y_{k+1} & \dots & y_{k+j-1} \\ u_{k+1} & u_{k+2} & \dots & u_{k+j} \\ y_{k+1} & y_{k+2} & \dots & y_{k+j} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ u_{k+i-1} & u_{k+i} & \dots & u_{k+j+i-2} \\ y_{k+i-1} & y_{k+i} & \dots & y_{k+j+i-2} \end{bmatrix} \quad (32)$$

$$H_f = \begin{bmatrix} u_{k+i} & u_{k+i+1} & \dots & u_{k+j-1} \\ y_{k+i} & y_{k+i+1} & \dots & y_{k+j-1} \\ u_{k+i+1} & u_{k+i+2} & \dots & u_{k+j} \\ y_{k+i+1} & y_{k+i+2} & \dots & y_{k+j} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ u_{k+2i-1} & u_{k+2i} & \dots & u_{k+j+i-2} \\ y_{k+2i-1} & y_{k+2i} & \dots & y_{k+j+i-2} \end{bmatrix} \quad (33)$$

Un algoritmo de identificación típica del subespacio de sistemas de espacio de estado consta de dos pasos:

- 1) Identificación de la matriz de observabilidad extendida y de un bloque triangular de la matriz de Toeplitz.
- 2) Estimación de las matrices del sistema A , B , C y D a partir de la identificación de la matriz de observabilidad y la matriz Toeplitz.

La identificación de un modelo no lineal en tiempo continuo se hace a partir de los datos muestreados. El modelo lineal obtenido es la aproximación alrededor del punto de operación del sistema no lineal en tiempo discreto. En otras palabras, el modelo en tiempo continuo del generador eólico de imanes permanentes descrito en las ecuaciones (18) a (21) es identificado como un sistema lineal en tiempo discreto, descrito en las ecuaciones (24) y (25).

Control por realimentación de estado

La realimentación de variables de estado es una de las técnicas de control más utilizadas de control digital. Se obtiene a partir de la estimación de parámetros según los valores de entrada y salida de la planta (Giraldo *et al.*, 2007):

$$\begin{aligned}x_{k+1} &= Ax_k + Bu_k \\ y_k &= Cx_k + Du_k\end{aligned}\quad (34)$$

Una vez esté hecho el modelo en variables de estado, la ley de control por realimentación de estado puede ser aplicada. Sin embargo, a menudo x no es fácil de conocer o medir (González *et al.*, 2002); por tanto, una solución es utilizar un observador, como se muestra en la figura 2:

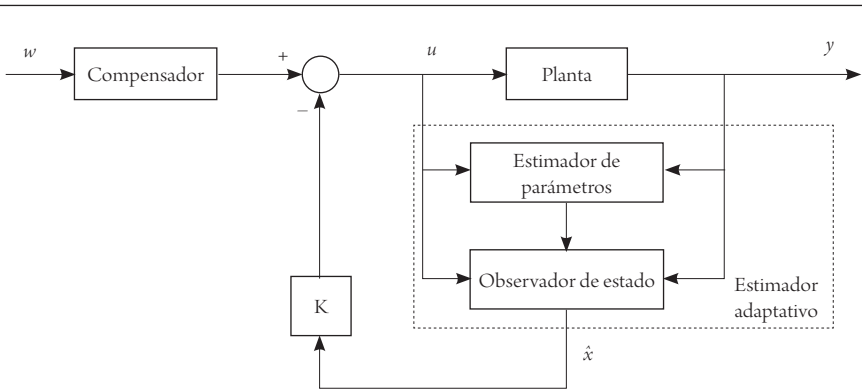


Figura 2. Esquema general de realimentación de variables de estado usando un observador de estado adaptativo

Fuente: Giraldo y Giraldo (2007).

El observador de estados es un subsistema de control que realiza la estimación de las variables de estado con base en los valores medidos (observados) de las salidas y de la señal de control. Las ecuaciones de estado, incluyendo el observador, están dadas en (35):

$$\begin{aligned}\hat{x}_{k+1} &= A\hat{x}_k + Bu_k + L(y_k - \hat{y}_k) \\ \hat{y}_k &= C\hat{x}_k + Du_k\end{aligned}\quad (35)$$

La ganancia del observador L se obtiene aplicando el método de reubicación de polos, multiplicado por el error entre la señal de salida y la señal de salida estimada del sistema.

Sea el sistema observable (24)-(25) con una ley de control por realimentación del vector de estados:

$$u_k = -Kx_k + W_k \quad (36)$$

En (36) el estado del sistema x_k no es accesible pero sí observable. Por tanto, se puede sustituir el valor del estado por una aproximación, de manera que:

$$u_k = -K\hat{x}_k + W_k \quad (37)$$

La señal de control se obtiene de la realimentación negativa del vector de estados estimados $\hat{x} \in \mathfrak{R}^n$, multiplicado por la matriz de ganancias de realimentación K , que se obtiene aplicando el método de reubicación de polos, sumado con $W \in \mathfrak{R}^n$, que representa la señal de referencia con el compensador (ganancia en lazo cerrado del sistema). A partir de estos valores, se implementa la identificación adaptativa para conocer los parámetros de la planta, pero no se conocen todas las variables de estado del sistema.

Control por realimentación de estado con acción integral

El controlador con acción integral utiliza el mismo principio del observador, pero se introduce el acumulado del error en la señal de control, como se muestra en la figura 3:

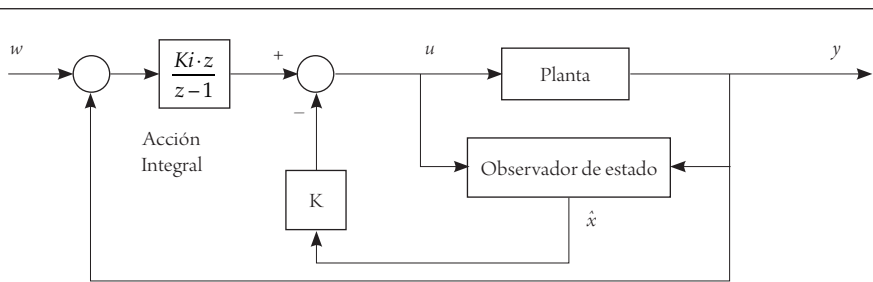


Figura 3. Esquema general de realimentación de variables de estado usando un observador de estado adaptativo con acción integral

Fuente: Giraldo y Giraldo (2012).

La ecuación del acumulado del error en la señal de control está dada en (38):

$$u_k = -Kx_k + K_I v_k \quad (38)$$

Con:

$$\hat{x}_{k+1} = A\hat{x}_k + Bu_k \quad (39)$$

$$v_{k+1} = v_k + e_k \quad (40)$$

Donde $e_k = w_k - y_k$ y $v_{(0)} = 0$. De esta forma, se puede reescribir el sistema de la siguiente forma (41)-(42):

$$x_{k+1} = Ax_k + Bu_k \quad (41)$$

$$v_{k+1} = v_k + w_k - Cx_k - Du_k \quad (42)$$

Se puede escribir el sistema en forma matricial definiendo un vector de estados aumentados (43)-(44):

$$\begin{bmatrix} x_{k+1} \\ v_{k+1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & 0 \\ -C & I \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_k \\ v_k \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B \\ -D \end{bmatrix} u_k + \begin{bmatrix} 0 \\ I \end{bmatrix} w_k \quad (43)$$

$$y_k = \begin{bmatrix} C & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_k \\ v_k \end{bmatrix} + Du_k \quad (44)$$

Donde I es la matriz *identidad*.

El vector de ganancia aumentado es $K_A = [K - K_I]$, por lo que la señal de control se puede escribir de forma matricial (45):

$$u_k = -[K \quad -K_I] \begin{bmatrix} x_k \\ v_k \end{bmatrix} \quad (45)$$

Resultados

Con el fin de probar el modelo del PMSG propuesto en este artículo, se ha realizado un caso de simulación en MATLAB/Simulink, utilizando los parámetros y ganancias de los controladores especificados en el apéndice. En este caso, la velocidad del viento varía de 5m/s a 12m/s, y la resistencia de la carga se mantiene constante en todo instante de tiempo.

El modelo lineal de tercer orden en espacios de estados, invariante en el tiempo discreto e identificado del PMSG, se muestra en las ecuaciones (46) y (47) (Jamaludin *et al.*, 2013), cuya respuesta en lazo abierto se muestra en la figura 4. Allí se representa la inestabilidad del sistema ante cualquier señal de entrada:

$$x_{k+1} = \begin{bmatrix} 0,4676 & 0,0954 & -0,0046 \\ -0,0746 & 0,2728 & 0,4549 \\ -0,0014 & 0,0765 & 0,8915 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{bmatrix}_k + \begin{bmatrix} 1,2848 \times 10^{39} & 0,0131 \times 10^{11} \\ 1,4287 \times 10^{39} & 0,3799 \times 10^{11} \\ 3,4507 \times 10^{39} & 1,4662 \times 10^{10} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \end{bmatrix}_k \quad (46)$$

$$y_k = [-0,4903 \ 0,0273 \ -0,0027] \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{bmatrix}_k + [1,0438 \times 10^{39} \ 0,0024] \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \end{bmatrix}_k \quad (47)$$

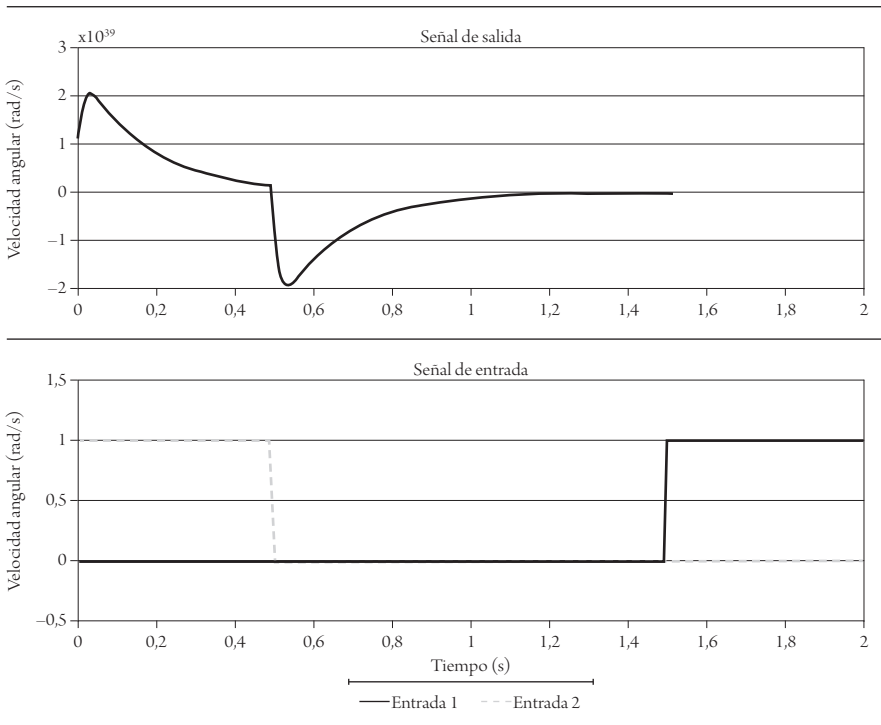


Figura 4. Respuesta del sistema en lazo abierto

Fuente: elaboración propia, como respuesta del sistema identificado en cada caso.

La señal de salida del sistema alcanza un valor desmedido de $\pm 2 \times 10^{39}$ rad/s, cuando la señal de entrada solo tiene un valor máximo de 1 rad/s en sus dos componentes. Por esta razón, se requiere el uso de controladores en el PMSG. La figura 5

muestra la respuesta del sistema al realizar control por realimentación de variables de estado, por reubicación de polos, usando un observador. En este caso, la planta tiene un tiempo de asentamiento de 0,2 s, sobrepaso de 0,3 rad/s:

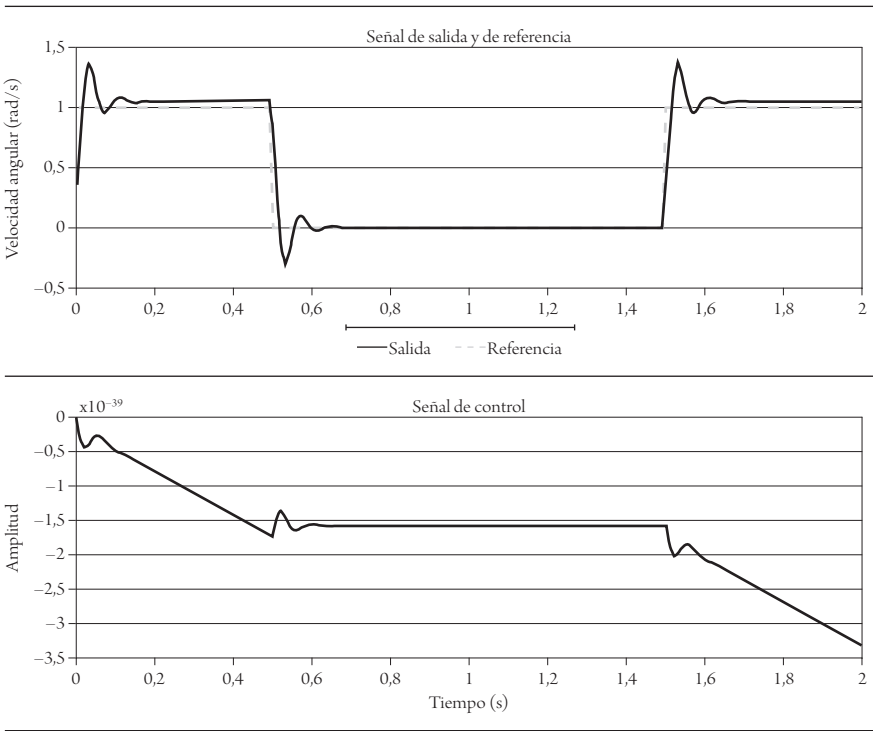


Figura 5. Señal de salida de la planta y de control para el controlador por realimentación de variables de estado con observador

Fuente: elaboración propia, como respuesta del sistema identificado en cada caso.

Al implementar el controlador por realimentación de variables de estado con observador, se puede apreciar que la señal de salida no alcanza la señal de referencia, es decir, se evidencia el error de estado estacionario de la señal de salida ante cualquier variación de valor de la referencia en todo instante de tiempo.

Incluyendo el observador en el controlador, se obtiene la corrección de estimación de variables de estado, a partir de la ganancia L , donde se disminuye el efecto de las incertidumbres que se tengan sobre la dinámica real de la planta. Por ello, la señal de salida no posee un valor acotado con respecto al valor de la señal de referencia.

En la figura 6 se muestra la respuesta de la planta utilizando un controlador por realimentación de variables de estado con observador, pero incluyendo acción integral. Con la incorporación de la acción integral, la planta tiene un tiempo de asentamiento de 0,5 s, sobrepaso de 0,7 rad/s:

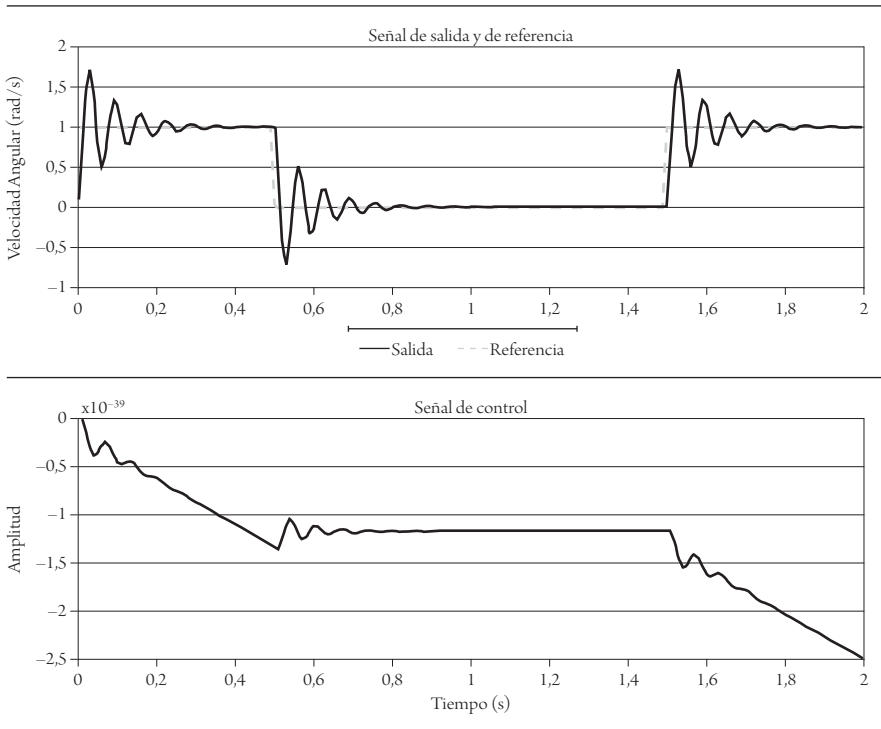


Figura 6. Señal de salida de la planta y de control para el controlador por realimentación de variables de estado con observador implementando acción integral

Fuente: elaboración propia, como respuesta del sistema identificado en cada caso.

Al introducir la acción integral al controlador por realimentación de variables de estado con observador, la salida del sistema no posee error de estado estacionario en su señal. Por ello, la señal de salida alcanza la señal de referencia ante cualquier variación de valor en todo instante de tiempo.

Conclusiones

Una adecuada identificación de las variables de estado en un sistema de múltiple entrada múltiple salida (MIMO, por sus siglas en inglés) afecta de forma evidente

la respuesta de la planta ante cualquier cambio de referencia, ya que el controlador se adapta a la modificación de las variables de estado y a los cambios de la respuesta ante una posible alteración de la referencia, en cualquier instante de tiempo. Por tal motivo, un controlador por realimentación de variables de estado puede ser implementado en sistemas en los que se realice identificación de parámetros.

La inclusión de la acción integral en un controlador por realimentación de estados con observador reduce el error estacionario de la respuesta en sistemas multivariantes, como se muestra en la figura 6 en comparación con la figura 5. No obstante, el tiempo de asentamiento (transitorio) y el sobrepaso de la señal son mayores que el controlador con observador, aunque los transitorios dependen de la ubicación de los polos en cada sistema.

Como trabajo futuro cabe mencionar la implementación de algoritmos de identificación en sistemas MIMO acoplados, donde se consideran los acoples entre las entradas y salidas como las posibles perturbaciones presentes en cada subsistema, que permitan modelar el sistema completo y plantear una estrategia de control del sistema.

Agradecimientos

Este artículo se desarrolla en el marco del proyecto de investigación “Identificación de sistemas multivariantes aplicada a generadores eólicos”, financiado por la Universidad Tecnológica de Pereira con código 6-14-1. Se inscribe en el proyecto de grado “Control óptimo de un sistema multivariable aplicado a un generador eólico conectado a un sistema de potencia”, aprobado en la convocatoria para financiar proyectos de grado de estudiantes de pregrado y posgrado, 2013, financiado por la Universidad Tecnológica de Pereira, con código E6-14-6.

Referencias

Ancheng, X., Jian, Z., Jinmei, C. y Tianshu, B (2012, julio). A new method to coordinate the PI controllers' parameters of doubly-fed induction generator. En *Chinese Control Conference* (pp. 6776-6780). Hefei, China: IEEE.

- Baggu, M. y Chowdhury, B. (2006, septiembre). Performance of doubly-fed induction machine wind generators during grid and wind disturbances. En *38.th North American Power Symposium* (pp. 49-56). Carbondale, Illinois: IEEE.
- Chakravarty, P. y Venayagaorathy, G. (2011, mayo). Development of optimal controllers for a DFIG based wind farm in a smart grid under variable wind speed conditions. En *International Electric Machines & Drives Conference (IEMDC)* (pp. 723-728). Niagara Falls: IEEE.
- Enjuy, T., Ochi, A. y Yona, A. (2007, octubre). Parameter identification of wind turbine for maximum power point tracking control. En *Proceeding of International Conference on Electrical Machines and System* (pp. 248-252). Seoul, Korea: IEEE.
- Ernst, B., Oakleaf, B., Ahlstrom, M., Lange, M., Moehrlen, C., Lange, B., Focken, U. y Rohing, K. (2007). Predicting the wind. *Power and Energy Magazine*, 5(6), 78-89.
- Giraldo, D. y Giraldo, E. (2007). Control por realimentación de variables de estado usando un observador adaptativo de estados. *Scientia et Technica*, 35(13), 13-17.
- Giraldo, D. y Giraldo, E. (2012). *Teoría de control digital*. Bogotá: Productos Editoriales y Audiovisuales.
- González, G. y Galindo, R. (2002, septiembre). Direct control in bond graph by state estimated feedback for MIMO LTI systems. En *International Conference on Control Applications* (vol. 2; pp. 1183-1188). Glasgow, Reino Unido: IEEE.
- Jamaludin, I., Wahab, N., Khalid, N., Sahlan, S., Ibrahim, Z. y Rahmat, M. (2013, marzo). N4SID and MOESP subspace identification methods. En *9th International Colloquium on Signal Processing and its Applications* (pp. 140-145). Kuala Lumpur, Malasia: IEEE.
- Kodama, N., Matsuzaka, T. e Inomata, N. (2002, agosto). Power variations of a wind turbine generator connecting to power system. *Proceedings of the 41.st SICE Annual Conference SICE* (vol. 2; pp. 3177-3188). Osaka, Japón: IEEE.
- Mejía, D., Bolaños, R. y Correa, C. (2007). Técnicas de control adaptativas aplicadas a sistemas multivariables (MIMO). *Scientia Et Technica*, 13(35), 37-42.
- Nakamura, T., Morimoto, S., Sanada, M. y Takeda, Y. (2002, abril). Optimum control of PMSG for wind generation system. En *Proceedings of the Power Conversion Conference*. Osaka, Japón: IEEE.
- Pao, K. y Johnson, K. (2011). Control of wind turbines. *Control Systems Magazine*, 31(2), 44-62.
- Qiao, W., Venayagamoorthy, G. y Harley, R. (2006, julio). Design of optimal PI controllers for doubly-fed induction generators driven by wind turbines using particle swarm optimization. *International Joint Conference on Neural Networks Sheraton Vancouver Wall Centre Hotel* (pp. 1982-1987). Vancouver, Canadá: IEEE.

- Sánchez, S., Bueno, M., Delgado, E. y Giraldo E. (2009, septiembre). Optimal PI control of a wind energy conversion system using Particles Swarm. *Robotics and Automotive Mechanics Conference* (pp. 332-337). Cuernavaca, México: IEEE.
- Verma, V. y Tanton, S. (2013, febrero). Disturbance immune DFIG based wind energy conversion system. *International Conference on Power, Energy and Control (ICPEC)* (pp. 642-647). Sri Rangalatchum Dindigul, India: IEEE.
- Weihua, L., Songqi, F., Weichum, G. y Zhiming, W. (2012, mayo). Research on the control strategy of large-scale wind power energy storage system. En *Innovative smart grid technologies* (pp. 1-4). Tianjin, China: IEEE.
- Wu, F., Zhang, X., Godfrey, K. y Ju, P. (2006, noviembre). Modeling and control of wind turbine with doubly-fed induction generator. En *Power Systems Conference and Exposition (PSCE)* (pp. 1404-1409). Atlanta, Estados Unidos: IEEE.
- Yin, M., Li, G., Zhou, M. y Zhao, C. (2007, junio). Modeling of the wind turbine with a permanent magnet synchronous generator for integration. En *Power Engineering Society General Meeting* (pp. 1-6). Tampa, Florida: IEEE.

Apéndice

Los parámetros usados en este documento se muestran a continuación:

Tabla 1. Parámetros de la turbina

Ra	2,5 m
G	1
J _H	0,5042 kgm ²
η	1
ρ	1,2259

Fuente: elaboración propia.

Tabla 2. Parámetros del PMSG

R	3,3 Ω
L _s	0,04156 H
Φ _m	0,48 Wb
n _p	3

Fuente: elaboración propia.

Tabla 3. Parámetros de la carga

R_L	80Ω
L	0.08 H

Fuente: elaboración propia.

Las ganancias del controlador por realimentación de variables de estado usando un observador por reubicación de polos se muestran a continuación:

$$L = \begin{bmatrix} -0,2606 \\ 0,0433 \\ -1,0787 \end{bmatrix} \quad (48)$$

$$k = \begin{bmatrix} -0,0366x10^{-38} & 0,1101x10^{-38} & 0,0711x10^{-38} \\ -0,1312x10^{-67} & 0,3942x10^{-67} & -0,2544x10^{-67} \end{bmatrix} \quad (49)$$

$$K_g = [3,7549x10^{39} \quad 2,8989x10^{11}] \quad (50)$$

Las ganancias del controlador por realimentación de variables de estado con observador, pero incluyendo acción integral, son las siguientes:

$$K_i = \begin{bmatrix} 0,6712x10^{-39} \\ 2,2465x10^{-68} \end{bmatrix} \quad (51)$$

$$K = \begin{bmatrix} 0,1524x10^{-39} & -0,1239x10^{-39} & 0,0536x10^{-39} \\ 0,5101x10^{-68} & -0,4147x10^{-68} & 0,1793x10^{-68} \end{bmatrix} \quad (52)$$