

An Output-Feedback Controller For a Single Machine Infinite Bus Power System

Natanael Vieyra* Emmanuel Rodríguez-Monzón*,
Paul Maya-Ortiz**, César Angeles-Camacho*

* *Instituto de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), 04510 Ciudad de México, México (e-mail: nvieygrav, erodriguezmo, cangelesc@iingen.unam.mx).*

** *Departamento de Control y Robótica, Universidad Nacional Autónoma de México, 04510 Ciudad de México, México (e-mail: paulm@unam.mx).*

Abstract: The stability of a Single Machine Infinite Bus (SMIB) is enhanced through a nonlinear (NL) observer-based controller driven by load angle measurement with a constructive framework: (i) based on input-output feedback linearising control strategy, (ii) with assignable pole closed-loop (CL) linear dynamics, (iii) with a linear geometric (G) (Luenberger with integral action to eliminate the output estimation mismatch) observer, and (iv) rejection of model parameter errors and unmeasured input disturbances coupled with a simple tuning scheme. As a result, the proposed observer-based controller has a more systematic design and priority assurance of robust functioning with a suitable trade-off between transient response, robustness concerning model exogenous disturbances, control effort, and a relatively simple conventional tuning scheme in comparison with the traditional industrial controllers as the Power System Stabilizer and Automatic Voltage Regulator (PSS/AVR). The proposed controller is tested with a representative example through numerical simulation and compared with the traditional control scheme PSS/AVR.

Keywords: Synchronous Generator, Observer-based controller, Rotor stability, Power System Stabilizer, Automatic Voltage Regulator.

1. INTRODUCCIÓN

Los Sistemas eléctricos de potencia (SEP) son sistemas complejos que usualmente son afectados por diferentes fenómenos, por ejemplo, variaciones de carga, fallas trifásicas, incertidumbre paramétrica, etc Sauer et al. [2017]. Uno de los principales temas de interés en la operación diaria de los SEP, es el problema de estabilidad de ángulo de rotor (corto y largo plazo), el cual, se define como la capacidad del sistema de recuperar el sincronismo después de haber sido afectado por una falla Kundur and Malik [2022].

Usualmente, el problema de estabilidad de ángulo de rotor de un SEP es resuelto por medio de los estabilizadores de sistemas de potencia (PSS, por sus siglas en inglés), que junto con los reguladores automáticos de voltaje (AVR, por sus siglas en inglés), permiten que el generador opere dentro los límites permisibles de voltaje. De esta manera, la estabilidad del SEP es mejorada mediante la modificación del voltaje de campo de las máquinas generadoras Kundur and Malik [2022], Sauer et al. [2017]. Estos controladores convencionales son diseñados por separado y son del tipo lineal para trabajar adecuadamente

en un punto de equilibrio y bajo un determinado tipo de condiciones, delimitando en gran manera su rango de operación. Además, su sintonización es compleja, usualmente basada en métodos matemáticos fundamentados en la teoría de control y en la experiencia del personal operativo. Ante la presencia de diferentes perturbaciones, tales como cambios repentinos de carga, fluctuaciones en la potencia eléctrica, fallas trifásicas y variación paramétrica. Surge la necesidad de diseñar esquemas de control robustos que permitan identificar y compensar perturbaciones desconocidas y errores paramétricos.

Para estudios de estabilidad es posible reducir un SEP a un solo generador conectado a un bus infinito (SMIB, por sus siglas en inglés), con parámetros que tienen variaciones en torno a su valor nominal Pavella [1998]. De esta manera, adoptando el sistema SMIB se han propuesto diferentes esquemas de control por excitador con el fin de mejorar la estabilidad del SEP Gao et al. [1992], Wang et al. [1993], Guo et al. [2001], Galaz et al. [2003], Sauer et al. [1988], Machowski et al. [1998]. Cabe mencionar que para su funcionamiento e implementación, los esquemas de control anteriormente reportados requieren de la medición completa de las variables de estado involu-

cradas, como: el voltaje interno de cuadratura, la potencia eléctrica, la velocidad relativa, etc. Muchas veces esto no es posible por diferentes aspectos físicos y económicos.

Dentro de la literatura científica, es posible encontrar controladores basados en observador enfocados en regular el comportamiento transitorio en generadores síncronos Maya-Ortiz and Espinosa-Pérez [2004], Rigatos et al. [2014], Mi et al. [2016], Jain and Hote [2019]. En Maya-Ortiz and Espinosa-Pérez [2004], se propone un control no lineal pasivo basado en observador utilizando como mediciones el ángulo de carga y la velocidad angular. En Rigatos et al. [2014], se propone un controlador basado en linealización por retroalimentación de estados. El controlador presentado es implementado por medio de un Filtro de Kalman lineal. Cabe mencionar que esta técnica de estimación carece de pruebas formales de convergencia y de una sintonización práctica. En Mi et al. [2016], utilizando una representación lineal del SMIB, se presenta un esquema controlador-observador basado en la teoría de Modos Deslizantes. A pesar de mejorar la robustez y la estabilidad transitoria de la máquina síncrona, el controlador reportado está restringido solo a ciertos fenómenos. Finalmente, en Jain and Hote [2019], se reporta un controlador para la regulación de frecuencia del generador ante pequeños cambios de carga.

En este artículo, empleando el ángulo de carga del sistema SMIB como única salida medida. Un controlador por linealización entrada-salida basado en observador es propuesto para mejorar la estabilidad de ángulo de rotor del sistema SMIB. Del mismo modo, el esquema de control presentado permite que el generador síncrono opere dentro de los límites permisibles de voltaje. Por lo tanto, cumple con las funciones efectuadas por los controladores industriales convencionales (PSS/AVR), con un esfuerzo de control eficiente, con un diseño más sistemático y una garantía prioritaria de funcionamiento robusto, con una compensación adecuada entre respuesta transitoria, robustez con respecto al modelo de perturbaciones exógenas, y en una sintonía convencional simple.

2. GENERADOR SÍNCRONO CONECTADO A UN BUS INFINITO

2.1 Modelo Matemático y Condiciones de Operación

El comportamiento dinámico de una máquina síncrona conectada a un bus infinito puede ser representado por medio del modelo clásico de decaimiento de flujo Kundur and Malik [2022], Sauer et al. [2017]:

$$\dot{\delta} = \omega \quad (1a)$$

$$2H\dot{\omega} = P_m - P_e - D\omega \quad (1b)$$

$$T'_{d0}\dot{E}'_q = \frac{(X_d - X'_d)}{(X'_d + X_E)}E_B \cos \delta - \frac{(X_d - X_E)}{(X'_d + X_E)}E'_q + E_{fd} \quad (1c)$$

con la potencia eléctrica P_e dada por

$$P_e = \frac{1}{(X'_d + X_E)}E_B E'_q \sin \delta \quad (2)$$

donde, δ es el ángulo de carga, ω es la velocidad angular relativa, E'_q es el voltaje interno de cuadratura, E_B es voltaje de bus infinito, X_d es la reactancia de eje directo, X'_d es la reactancia transitoria de eje directo, X_E es la reactancia de la línea, D es el coeficiente de amortiguamiento, H es la constante de inercia, T'_{d0} y E_{fd} es la constante de tiempo transitoria de eje directo y el voltaje de campo, respectivamente. Adicionalmente, la potencia mecánica P_m se asume constante.

El modelo de la máquina síncrona (1a) - (1c) es reescrito en forma compacta, como Galaz et al. [2003]:

$$\dot{\delta} = \omega, \quad \delta(0) = \delta_0, \quad y = \delta \quad (3a)$$

$$\dot{\omega} = -b_1 E'_q \sin \delta - b_2 \omega + p_m, \quad \omega(0) = \omega_0 \quad (3b)$$

$$\dot{E}'_q = b_3 \cos \delta - b_4 E'_q + e_f, \quad E'_q(0) = E'_{q0} \quad (3c)$$

donde

$$p_m = \frac{P_m}{2H}, \quad e_f = \frac{E_{fd}}{T'_{d0}}$$

b_1, b_2, b_3 y b_4 son constantes y son determinados con base a los parámetros de la máquina.

El sistema SMIB tiene una región de operación dada por el conjunto cerrado:

$$D_\delta = \{[\delta, \omega, E'_q]^\top \in \mathbb{R}^3 : 0 \leq \delta \leq \frac{\pi}{2} - \epsilon, \epsilon \leq E'_q\} \quad (4)$$

donde $\epsilon > 0$ y es arbitrariamente pequeño.

Los puntos de equilibrio del sistema SMIB (3a) - (3c) son determinados a partir de la igualdad a cero de las expresiones involucradas

$$0 = \bar{\omega} \quad (5a)$$

$$0 = -b_1 \bar{E}'_q \sin \bar{\delta} - b_2 \bar{\omega} + p_m \quad (5b)$$

$$0 = b_3 \cos \bar{\delta} - b_4 \bar{E}'_q + e_f \quad (5c)$$

De (5b), el término p_m es expresado en términos de $\bar{\delta}$ y $\bar{\omega}$

$$p_m = b_1 \bar{E}'_q \sin \bar{\delta} + b_2 \bar{\omega} \quad (6)$$

y de (5c) se despeja \bar{E}'_q y sustituye en (6), para obtener:

$$p_m = \frac{b_1}{b_4} [b_3 \cos \bar{\delta} + e_f] \sin \bar{\delta} \quad (7)$$

por lo tanto, al considerar $|\sin \bar{\delta}| \leq 1$ y $|\cos \bar{\delta}| \leq 1$, se obtiene la siguiente condición para la existencia de los puntos de equilibrio:

$$\frac{p_m b_4}{b_1} - b_3 < e_f \quad (8)$$

Al cumplirse con las condiciones (4) y (8), se garantiza que el punto de equilibrio ($\bar{x} = [\bar{\delta}, \bar{\omega}, \bar{E}'_q]^\top$) tenga propiedades asintóticas Machowski et al. [2020].

2.2 Controladores Industriales Convencionales

Las oscilaciones mecánicas asociadas a la operación de un SEP son amortiguadas por medio de controladores

por excitación cuya principal función consiste en modificar los voltajes de campo de cada máquina con el fin de recuperar el sincronismo de los generadores en un lapso corto de tiempo Kundur and Malik [2022]. Entre estos controladores, también conocidos como controles suplementarios, se encuentra el PSS, que junto con el AVR, mejoran el comportamiento transitorio del generador síncrono. Asegurando que éste opere dentro de los límites permisibles de voltaje.

Estabilizador de sistemas de potencia (PSS): El estabilizador es un dispositivo responsable de proporcionar un amortiguamiento extra a la máquina síncrona con el objetivo de reducir las oscilaciones mecánicas a causa de perturbaciones pequeñas Kundur and Malik [2022]. En el presente trabajo se utilizó el modelo tradicional de un PSS tomado de Sauer et al. [2017].

Regulador automático de voltaje (AVR): El regulador de voltaje ejecuta la regulación de voltaje en terminales ante variaciones de carga, a través de la modificación del voltaje de campo. Un diseño simple para un AVR consta de cinco partes, un comparador, amplificador, excitador, generador y sensor. (Shayeghi and Dadashpour [2012], Gozde et al. [2010]).

2.3 Planteamiento del Problema

A pesar de la comprobada funcionalidad del esquema de control industrial (PSS/AVR), son controladores lineales que poseen una sintonización compleja y carecen de robustez ante perturbaciones e incertidumbre paramétrica. Lo anterior, motiva el enfoque del presente artículo: el diseño y validación de un esquema de control basado en observador conducido por la medición del ángulo de carga del generador, que iguale y mejore el desempeño de los controladores industriales tradicionales (PSS/AVR). El controlador propuesto deberá mejorar la estabilidad de la máquina síncrona. De la misma manera, debe ser de fácil construcción, capaz de identificar y compensar perturbaciones desconocidas, robusto ante incertidumbres paramétricas y ruido en las mediciones, junto con un esquema de sintonización sencillo con sentido práctico.

3. DISEÑO DEL CONTROLADOR

3.1 Modelo Alternativo del SMIB

El modelo clásico de tercer orden del sistema SMIB (3a) - (3c) es reescrito adoptando la potencia eléctrica inyectada por la máquina P_e como variable de estado, para ello, a partir de

$$P_e = b_1 E'_q \sin \delta \quad (9)$$

se obtiene su derivada con respecto al tiempo

$$\dot{P}_e = b_1 \dot{E}'_q \sin \delta + b_1 E'_q \cos \delta \dot{\delta} \quad (10)$$

considerando las expresiones (3c) y (9), la derivada temporal de la potencia eléctrica queda expresada como:

$$\dot{P}_e = b_1 b_3 \cos \delta \sin \delta - b_4 P_e + b_1 \sin \delta e_f + E'_q \cot(\delta) \omega \quad (11)$$

Para simplificar la notación, el modelo alternativo del sistema SMIB es reescrito en forma compacta, definiendo, $\mathbf{x} = [x_1, x_2, x_3]^\top = [\delta, \omega, P_e]^\top$, como:

$$\dot{x}_1 = x_2, \quad x_1(0) = x_{10} \quad y = x_1 \quad (12a)$$

$$\dot{x}_2 = -x_3 - b_2 x_2 + p_m, \quad x_2(0) = x_{20} \quad (12b)$$

$$\dot{x}_3 = b_1 b_3 \cos x_1 \sin x_1 - b_4 x_3 + b_1 \sin x_1 e_f + x_3 \cot x_1 x_2, \quad x_3(0) = x_{30} \quad (12c)$$

3.2 Modelo de Control

El controlador propuesto está diseñado bajo la metodología de linealización entrada-salida conducida por la medición del ángulo de carga del generador. De esta manera, el modelo alternativo del SMIB (12a) - (12c) es reescrito en forma de iota-paramétrica, como:

$$\dot{x}_1 = x_2, \quad x_1(0) = x_{10} \quad y = x_1 \quad (13a)$$

$$\dot{x}_2 = -x_3 - b_2 x_2 + p_m, \quad x_2(0) = x_{20} \quad (13b)$$

$$\dot{x}_3 = -b_4 x_3 + b_1 \sin x_1 e_f + \iota, \quad x_3(0) = x_{30} \quad (13c)$$

donde

$$\iota = b_1 b_3 \cos x_1 \sin x_1 + x_2 x_3 \cot x_1 = f(x_1) \quad (14)$$

El término ι dado por (14), que describe la no linealidad del sistema, así mismo, también puede representar las dinámicas no modeladas, errores de modelado, incertidumbre perimétrica y dinámicas parásitas.

A partir de (13a) - (13c) y considerando a ι como una nueva variable de estado se obtiene:

$$\dot{x}_1 = x_2, \quad x_1(0) = x_{10} \quad y = x_1 \quad (15a)$$

$$\dot{x}_2 = -x_3 - b_2 x_2 + p_m, \quad x_2(0) = x_{20} \quad (15b)$$

$$\dot{x}_3 = -b_4 x_3 + b_1 e_f \sin x_1 + \iota, \quad x_3(0) = x_{30} \quad (15c)$$

$$\dot{\iota} = \dot{f}(x_1), \quad \iota(0) = \iota_0 \quad |\dot{f}(x_1)| \leq \epsilon_{x_1} \quad (15d)$$

Asumiendo que la señal ι se encuentra en un régimen de variación lenta con respecto a la tasa de convergencia del observador (para ser diseñado), siendo esto:

$$\dot{\iota} = \dot{f}(x_1) \approx 0 : \quad |\dot{\iota}/\iota| := \lambda_\iota \ll \lambda_o \quad (16)$$

Por lo tanto, el modelo del SMIB para fines de control, es:

$$\dot{x}_1 = x_2, \quad x_1(0) = x_{10} \quad y = x_1 \quad (17a)$$

$$\dot{x}_2 = -x_3 - b_2 x_2 + p_m, \quad x_2(0) = x_{20} \quad (17b)$$

$$\dot{x}_3 = -b_4 x_3 + b_1 \sin x_1 e_f + \iota, \quad x_3(0) = x_{30} \quad (17c)$$

$$\dot{\iota} \approx 0, \quad \iota(0) = \iota_0 \quad (17d)$$

3.3 Control por Retroalimentación de Estados

Utilizando el ángulo de carga como única salida medida, el modelo de control (17a) - (17d) tiene un grado relativo uniforme. En consecuencia, éste puede ser transformado a una representación normal a través de un cambio no lineal de coordenadas.

$$y = x_1 \quad (18a)$$

$$\dot{y} = x_2 \quad (18b)$$

$$\ddot{y} = -x_3 - b_2x_2 + p_m \quad (18c)$$

$$\ddot{y} = (b_4 + b_2)x_3 - b_1 \sin x_1 e_f - \iota + b_2^2x_2 - b_2p_m + \dot{p}_m \quad (18d)$$

Las ecuaciones de estado en términos de z , son expresadas como:

$$\dot{z}_1 = z_2, \quad z_1(0) = z_{1_0}, \quad y = z_1 \quad (19a)$$

$$\dot{z}_2 = z_3, \quad z_2(0) = z_{2_0} \quad (19b)$$

$$\dot{z}_3 = -(b_4 + b_2)z_3 - b_4b_2z_2 - \iota + b_4p_m + \dot{p}_m - b_1 \sin z_1 e_f, \quad z_3(0) = z_{3_0} \quad (19c)$$

En forma compacta:

$$\begin{bmatrix} \dot{z}_1 \\ \dot{z}_2 \\ \dot{z}_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} z_1 \\ z_2 \\ z_3 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} v \quad (20)$$

donde

$$v = -(b_4 + b_2)z_3 - b_4b_2z_2 - \iota + b_4p_m + \dot{p}_m - b_1 \sin z_1 e_f \quad (21)$$

Asumiendo que todas las no linealidades del sistema son conocidas (máquina instrumentada completamente) e incluyendo ι , la entrada de control e_f que permite la linealización exacta de (20), es expresada como:

$$e_f = \frac{1}{b_1 \sin z_1} (b_4p_m + \dot{p}_m - (b_4 + b_2)z_3 - b_4b_2z_2 - \iota - v) \quad (22)$$

considerando una entrada de control lineal auxiliar

$$v = -\kappa_1(z_1 - \bar{z}_1) - \kappa_2(z_2 - \bar{z}_2) - \kappa_3(z_3 - \bar{z}_3) \quad (23)$$

donde κ_1, κ_2 , y κ_3 son parámetros de diseño. El controlador propuesto deberá garantizar la estabilidad del SMIB bajo un rango amplio de condiciones de operación, como: fluctuaciones de potencia eléctrica, fallas trifásicas y variaciones paramétricas.

3.4 Control Basado en Observador

El mapa de observabilidad del sistema (17a)-(17d) con base al par $(\Psi, \rho)(t)$, es expresado como:

$$\Psi(t) = \mathbf{O}_\delta \chi(t) + \mathbf{T} \rho(t) \quad (24)$$

donde

$$\mathbf{O}_\delta = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & -b_2 & -1 & 0 \\ 0 & b_2^2 & (b_2 + b_4) & -1 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{T} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ -b_2 & 1 & -b_1 \sin x_1 \end{bmatrix} \quad (25a)$$

$$\Psi = \begin{bmatrix} y \\ \dot{y} \\ \ddot{y} \\ \ddot{y} \end{bmatrix}, \quad \chi = [x_1, x_2, x_3, \iota]^\top, \quad \rho(t) = [p_m, \dot{p}_m, e_f]^\top \quad (25b)$$

La matriz de observabilidad \mathbf{O}_δ al ser de rango completo garantiza la reconstrucción del estado aumentado $\chi(t)$ por medio de un observador dinámico adecuado, siendo esto:

$$\chi(t) = \mathbf{O}_\delta^{-1} [\Psi(t) - \mathbf{T} \rho(t)] \quad (26)$$

Dado el sistema en coordenadas (\mathbf{x}, ι) y considerando como salida $y = x_1$, se propone un estimador geométrico (Luenberger con acción integral) Alvarez and Lopez [1999], Álvarez and Fernández [2009]:

$$\dot{\hat{x}}_1 = \hat{x}_2 + k_o^\delta (x_1 - \hat{x}_1), \quad \hat{x}_1(0) = \hat{x}_{1_0} \quad (27a)$$

$$\dot{\hat{x}}_2 = -\hat{x}_3 - b_2\hat{x}_2 + p_m + k_o^\omega (x_1 - \hat{x}_1), \quad \hat{x}_2(0) = \hat{x}_{2_0} \quad (27b)$$

$$\dot{\hat{x}}_3 = -b_4\hat{x}_3 + b_1 \sin \hat{x}_1 e_f + \hat{\iota} + k_o^P (x_1 - \hat{x}_1), \quad \hat{x}_3(0) = \hat{x}_{3_0} \quad (27c)$$

$$\dot{\hat{\iota}} = k_o^t (x_1 - \hat{x}_1), \quad \hat{\iota}(0) = \hat{\iota}_0 \quad (27d)$$

Donde el vector de ganancias del observador, es determinado como Alvarez and Lopez [1999], Álvarez and Fernández [2009], Vieyra et al. [2022, 2023]:

$$\begin{bmatrix} k_o^\delta \\ k_o^\omega \\ k_o^P \\ k_o^t \end{bmatrix} = \mathbf{O}_\delta^{-1} \mathbf{k}_o = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & -b_2 & -1 & 0 \\ 0 & -(b_2b_4) & -b_2 - b_4 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 4\zeta_o \varpi_o \\ (4\zeta_o^2 + 2)\varpi_o^2 \\ 4\zeta_o \varpi_o^3 \\ \varpi_o^4 \end{bmatrix} \quad (28a)$$

$$\mathbf{k}_o = [4\zeta_o \varpi_o, (4\zeta_o^2 + 2)\varpi_o^2, 4\zeta_o \varpi_o^3, \varpi_o^4]^\top \quad (28b)$$

El vector de ganancias predefinido (28b) es determinado con base al polinomio característico de la dinámica lineal de polo asignable asociado al error de estimación de la salida Alvarez and Lopez [1999], Álvarez and Fernández [2009].

El estimador geométrico propuesto (27a) - (27d), tiene una convergencia robusta y exponencial a la dinámica del sistema aumentado $\chi(t)$, de acuerdo a la siguiente desigualdad Alvarez and Lopez [1999], Álvarez and Fernández [2009], Vieyra et al. [2022]:

$$|\hat{\chi} - \chi| \leq a_\chi e^{-\lambda_o t} |\tilde{\chi}| + (a_\chi / \lambda_o) \epsilon_\theta, \quad \hat{\chi}, \chi \in X_\delta(t) \quad (29)$$

Por lo tanto, la ley de control (22) en coordenadas de z es expresada en términos de las variables de estado estimadas en su forma implementable, como:

$$e_f = \frac{1}{\sin \hat{\delta}} \left[(b_2 + b_4) \hat{P}_e + b_2^2 \hat{\omega} - b_2 p_m - \hat{\iota} - v_x \right] \quad (30)$$

donde

$$v_x = -\kappa_1 \hat{\delta} - \kappa_2 \hat{\omega} - \kappa_3 (-\hat{P}_e - b_2 \hat{\omega} + p_m) \quad (31)$$

Nota: La ley de control (30) es implementable dentro de la región de operación (4), ésta debe mejorar la respuesta transitoria de la máquina síncrona ante la presencia de perturbaciones, recuperando el sincronismo en un lapso corto de tiempo. La dinámica en lazo cerrado puede ser obtenida en coordenadas de z al sustituir la ley de control (30) en (13a)-(13c). Utilizando el teorema converso de Lyapunov, seguido de la desigualdad de Gronwall, las dinámicas de los errores de regulación y de estimación son reescritas como un conjunto de sistemas lineales interconectados Álvarez and Fernández [2009], Vieyra et al. [2022]. Bajo el teorema de pequeñas, la dinámica en lazo cerrado será robusta y exponencialmente estable si la frecuencia del observador ϖ_o es elegida de tal

forma, que, el término estabilizante λ_s domine al término desestabilizante λ_d Alvarez and Lopez [1999], Álvarez and Fernández [2009], Vieyra et al. [2022].

Proposición 1. Por consiguiente, el sistema (13a)-(13c) en lazo cerrado con la ley de control (30)-(31) es robustamente estable si la ganancia ϖ_o del estimador geométrico (27a)-(27d) es fijada dentro de un intervalo de ganancia Ω , siendo esto Álvarez and Fernández [2009]:

$$\varpi_o \in \Omega := [\varpi_o^-, \varpi_o^+] \quad (32)$$

donde ϖ_o^-, ϖ_o^+ son las raíces de la ecuación representada por la diferencia entre las dinámicas λ_s y λ_d .

De acuerdo con la guía de sintonización del estimador geométrico Álvarez and Fernández [2009], y con referencia a los criterios de estabilidad en lazo cerrado, las ganancias del estimador son establecidas mediante la siguiente guía:

$$\zeta_o \in [0.71, 1.5], \quad \varpi_o = n_\varpi \lambda_r, \quad n_\varpi \in [5, 30] \quad (33)$$

donde λ_r es la dinámica dominante del sistema (13a)-(13c). Los valores de ganancia del control lineal auxiliar (31) son elegidas, tal que el polinomio característico asociado, sea Hurwitz estable.

4. RESULTADOS

El desempeño del controlador presentado (30) es válido para diferentes tipos de falla, sin embargo, en este documento se considera un escenario de prueba en el que el sistema SMIB es afectado por una perturbación en el devanado de excitación desconocida. Se considera un caso extremo para fines de estudio y evaluación, en el que la falla es modelada como un escalón unitario, con un tiempo de acción de 5 [s] y una incidencia a los 30 [s].

Los parámetros del sistema SMIB son mostrados en la Tabla 1. Para las ganancias predefinidas del observador (28b), los siguientes valores son establecidos: $\zeta_o = 0.71$ y $\varpi_o = 40$. Con respecto a las ganancias del control lineal (31), éstas son definidas como: $\kappa_1 = 0$, $\kappa_2 = 150$, y $\kappa_3 = 8$.

| Parámetro | Valor [p.u.] |
|-----------|--------------|
| p_m | 0.815 |
| b_1 | 2 |
| b_2 | 0.0588 |
| b_3 | 1.7 |
| b_4 | 2.7 |
| e_f | 1.22 |

Table 1. Parámetros del sistema SMIB

Con los valores de la Tabla 1, el sistema SMIB es inicializado en el punto de equilibrio:

$$\bar{\delta} = 0.4067[\text{rad}], \quad \bar{\omega} = 0[\text{rad/s}], \quad \bar{E}'_q = 1.03[\text{p.u.}]$$

El estudio comparativo también incluye el desempeño del esquema de control convencional (PSS/AVR), cuyos parámetros de diseño son fijados con base al rango de valores establecidos en Shayeghi and Dadashpour [2012], Gozde et al. [2010]. Así mismo, se incluye la dinámica del sistema SMIB en lazo abierto. Las Figs. 1 - 4, muestran

el comportamiento dinámico del ángulo de carga, la velocidad angular relativa, el voltaje de cuadratura, y la potencia eléctrica.

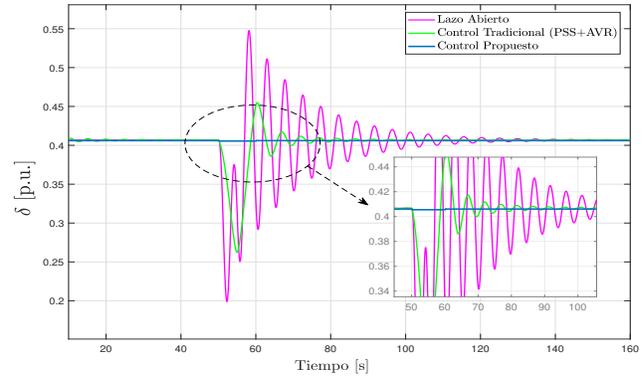


Fig. 1. Ángulo de carga.

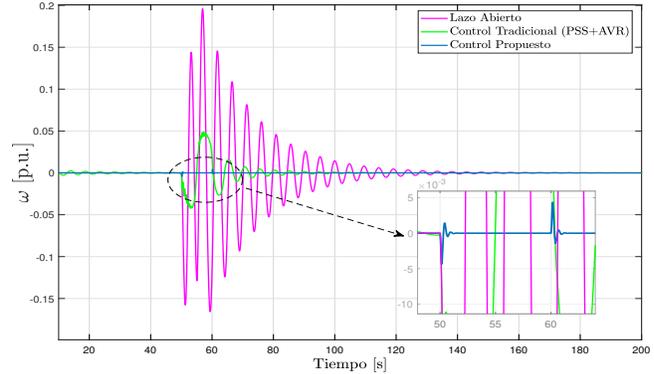


Fig. 2. Velocidad angular relativa.

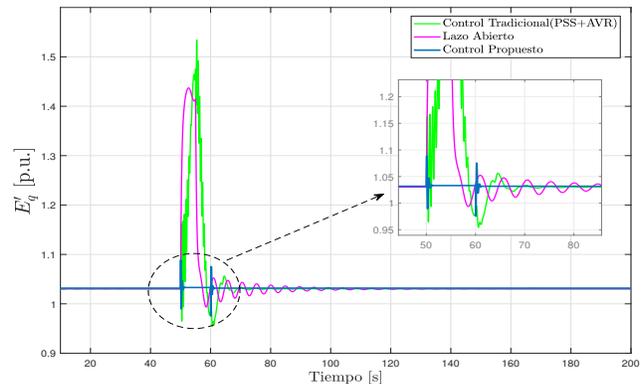


Fig. 3. Voltaje de cuadratura.

La inclusión del término ι permite identificar y compensar la perturbación desconocida que afecta al sistema. Por está razón, las oscilaciones mecánicas son amortiguadas, el comportamiento transitorio de la máquina síncrona mejora considerablemente. También, el controlador presentado (30) permite que el sistema SMIB opere dentro de los límites permisibles de voltaje como se muestra en

la Fig. 3. Además, la potencia eléctrica inyectada por la máquina también es regulada, como se puede observar en la Fig. 4.

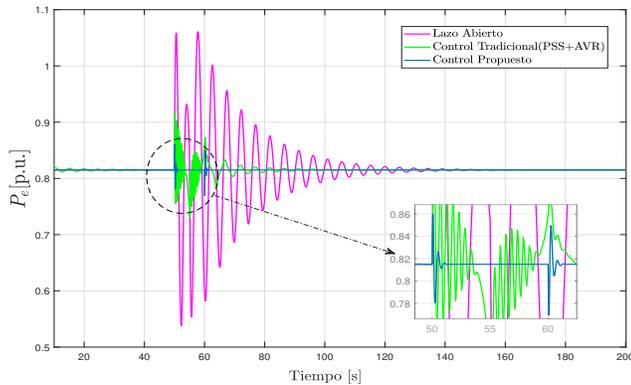


Fig. 4. Potencia eléctrica.

5. CONCLUSIONES

La estabilidad de un sistema SMIB es mejorada por medio de un controlador basado en observador impulsado por la medición del ángulo de carga del generador con un control linealizante de entrada-salida entrelazado con observador geométrico, que permite identificar y compensar perturbaciones desconocidas, errores de modelado, e incertidumbre paramétrica. De la misma forma, el generador opera dentro de los límites permisibles de voltaje. Las simulaciones numéricas demuestran que el desempeño del controlador basado en observador iguala y mejora el desempeño de los controladores industriales convencionales (PSS/AVR), con un esfuerzo de control eficiente, con un diseño más sistemático y una sintonía convencional simple.

REFERENCES

Álvarez, J. and Fernández, C. (2009). Geometric estimation of nonlinear process systems. *Journal of process control*, 19(2), 247–260.

Alvarez, J. and Lopez, T. (1999). Robust dynamic state estimation of nonlinear plants. *AIChE journal*, 45(1), 107–123.

Galaz, M., Ortega, R., Bazanella, A.S., and Stankovic, A.M. (2003). An energy-shaping approach to the design of excitation control of synchronous generators. *Automatica*, 39(1), 111–119.

Gao, L., Chen, L., Fan, Y., and Ma, H. (1992). A nonlinear control design for power systems. *Automatica*, 28(5), 975–979.

Gozde, H., Taplamacioglu, M., and Kocaarslan, I. (2010). Application of artificial bee colony algorithm in an automatic voltage regulator (avr) system. *International Journal on Technical and Physical Problems of Engineering*, 1(3), 88–92.

Guo, Y., Hill, D.J., and Wang, Y. (2001). Global transient stability and voltage regulation for power systems. *IEEE transactions on power systems*, 16(4), 678–688.

Jain, S. and Hote, Y.V. (2019). Generalized active disturbance rejection controller for load frequency control in power systems. In *2019 IEEE 58th Conference on Decision and Control (CDC)*, 6548–6553. IEEE.

Kundur, P.S. and Malik, O.P. (2022). *Power system stability and control*. McGraw-Hill Education.

Machowski, J., Bialek, J., Robak, S., and Bumby, J. (1998). Excitation control system for use with synchronous generators. *IEEE Proceedings-Generation, Transmission and Distribution*, 145(5), 537–546.

Machowski, J., Lubosny, Z., Bialek, J.W., and Bumby, J.R. (2020). *Power system dynamics: stability and control*. John Wiley & Sons.

Maya-Ortiz, P. and Espinosa-Pérez, G. (2004). Output feedback excitation control of synchronous generators. *International Journal of Robust and Nonlinear Control: IFAC-Affiliated Journal*, 14(9-10), 879–890.

Mi, Y., Fu, Y., Li, D., Wang, C., Loh, P.C., and Wang, P. (2016). The sliding mode load frequency control for hybrid power system based on disturbance observer. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 74, 446–452.

Pavella, M. (1998). Generalized one-machine equivalents in transient stability studies. *IEEE Power Engineering Review*, 18(1), 50–52.

Rigatos, G., Siano, P., and Zervos, N. (2014). Sensorless control of distributed power generators with the derivative-free nonlinear kalman filter. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 61(11), 6369–6382.

Sauer, P.W., Pai, M.A., and Chow, J.H. (2017). *Power system dynamics and stability: with synchrophasor measurement and power system toolbox*. John Wiley & Sons.

Sauer, P., Ahmed-Zaid, S., and Kokotovic, P. (1988). An integral manifold approach to reduced order dynamic modeling of synchronous machines. *IEEE transactions on Power Systems*, 3(1), 17–23.

Shayeghi, H. and Dadashpour, J. (2012). Anarchic society optimization based pid control of an automatic voltage regulator (avr) system. *Electrical and Electronic Engineering*, 2(4), 199–207.

Vieyra, N., Álvarez, J., and Maya-Ortiz, P. (2022). Decentralized robust state estimation of multimachine power systems. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 135, 107469.

Vieyra, N., Maya-Ortiz, P., Angeles-Camacho, C., et al. (2023). Two decentralized dynamic state estimation schemes for multimachine power systems with transmission losses. *International Transactions on Electrical Energy Systems*, 2023.

Wang, Y., Hill, D.J., Middleton, R.H., and Gao, L. (1993). Transient stability enhancement and voltage regulation of power systems. *IEEE Transactions on Power systems*, 8(2), 620–627.