

Recibido 12 de septiembre de 2024. Aceptado 29 de noviembre de 2024. Publicado 19 de diciembre de 2024.

ISSN: 2448-7775

Control Predictivo Basado en Modelo Aplicado al Generador Síncrono Utilizando Planitud Diferencial

MICHEL ROBERTO FERRER CEPERO^{1*}, FRANCISCO BELTRÁN CARBAJAL¹, IRVIN LÓPEZ GARCÍA¹, DAVID SOTELO², CARLOS SOTELO².

¹Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Azcapotzalco, Ciudad de México, México.

²Tecnológico de Monterrey, School of Engineering and Sciences, Monterrey, México.

*Autor de Correspondencia: al2232800450@azc.uam.mx; fbeltran@azc.uam.mx

RESUMEN Este trabajo presenta dos esquemas de control predictivo basado en modelo para regular la trayectoria del ángulo de potencia en un generador síncrono, un componente crítico en la generación de electricidad. Se abordan dos enfoques de modelado de la dinámica del generador para diseño del control predictivo: el modelo lineal convencional y el modelo lineal diferencialmente plano. Se expone cómo el esquema de control predictivo puede ser más efectivo cuando se emplea un modelo diferencialmente plano para seguimiento de perfiles de referencia para el ángulo de carga. Este enfoque mejora la capacidad de seguimiento de la referencia, reduciendo el valor máximo del error en un 42.6%. Además, se disminuye el esfuerzo de control, logrando una reducción del 7.7% en el valor máximo de la señal de mando.

PALABRAS CLAVE— Control predictivo basado en modelo, generador síncrono, planitud diferencial.

I. INTRODUCCIÓN

La energía eléctrica es esencial para el progreso de cualquier nación, impulsando una variedad de actividades vitales. Esta energía se obtiene de diversas fuentes naturales, como los combustibles fósiles (carbón, petróleo y gas natural), la energía solar, mareomotriz, geotérmica y nuclear. A pesar de que la energía no se encuentra almacenada en forma eléctrica en la naturaleza, la electricidad es destacable por su capacidad de ser transmitida eficientemente a largas distancias y adaptarse a las necesidades específicas de los consumidores mediante un control adecuado [1].

Un componente principal de la cadena de suministro eléctrico es el generador eléctrico, particularmente el Generador Síncrono (GS), que transforma la energía mecánica en energía eléctrica [2], [3]. En centrales eléctricas basadas en combustibles fósiles, como las termoeléctricas y de ciclo combinado, se emplean comúnmente generadores síncronos de polos lisos. La estabilidad y el control del generador síncrono son cruciales para mantener la calidad del servicio en el Sistema Eléctrico de Potencia (SEP).

Los generadores síncronos se modelan utilizando modelos matemáticos rigurosos y completos para describir su comportamiento dinámico. Sin embargo, para fines de control, a menudo se utilizan modelos simplificados que, aunque menos precisos, son cualitativamente equivalentes a los modelos más complejos. Estos modelos pueden ser

lineales o no lineales, dependiendo de los fenómenos bajo estudio y las escalas de tiempo consideradas [4].

Recientemente, la comunidad de teoría de control ha mostrado un interés creciente en el uso de estrategias de control modernas para estabilizar los generadores del sistema eléctrico. Entre estas estrategias se encuentran los esquemas adaptativos [5], control basado en pasividad [6] y técnicas de linealización por retroalimentación [7]. Una característica distintiva de estos enfoques es el uso de modelos no lineales de bajo orden, diseñados para preservar las principales características dinámicas del sistema de generación de energía.

En particular, el control predictivo Basado en modelo (MPC por sus siglas en inglés) ha demostrado ser un recurso eficaz para el control de generadores síncronos. El MPC permite seguir trayectorias de referencia y suprimir oscilaciones simultáneamente. Sin embargo, la efectividad del MPC depende en gran medida del modelo utilizado. En este contexto, se ha investigado el uso de un modelo diferencialmente plano del generador síncrono, el cual permite expresar todas las variables de estado y la entrada de control en función de una salida plana y un número finito de sus derivadas temporales [8].

El presente trabajo se enfoca en la comparación entre el uso de un modelo lineal convencional y un modelo lineal del sistema diferencialmente plano transformado en la estrategia de control MPC para un generador síncrono. Se demuestra

que el empleo del modelo diferencialmente plano proporciona mejores resultados en términos de seguimiento de referencia y disminución del esfuerzo de control, lo que resulta en una mejora en la eficiencia del sistema eléctrico.

II. DESARROLLO

A. MODELO NO LINEAL DEL GENERADOR SÍNCRONO

Basado en [4], [9] y [10] las Ecs. (1), (2) y (3) describen el modelo de tercer orden del generador síncrono de rotor cilíndrico. Este modelo, aunque de orden reducido, es capaz de capturar las dinámicas más importantes de la máquina, incluyendo su respuesta ante cambios en la carga y en la frecuencia de red. Esto lo hace especialmente útil en el diseño de estrategias de control para el generador síncrono.

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

$$\dot{\omega} = -\frac{\omega_s}{2H} P_e - \frac{\omega_s D}{2H} \omega + \frac{\omega_s}{2H} P_m \quad (2)$$

$$\dot{E}'_q = \frac{X_d - X'_d}{T'_{do}(X'_d + X_l)} \cos(\delta) - \frac{X_d + X_l}{T'_{do}(X'_d + X_l)} E'_q + \frac{1}{T'_{do}} v_f \quad (3)$$

Con la salida $y = \delta$. Donde P_e puede escribirse como se muestra en la Ec. (4), [4], [9], [10].

$$P_e = \frac{E'_q}{(X'_d + X_l)} \sin(\delta) \quad (4)$$

El ángulo δ representa la posición relativa del rotor respecto al eje de referencia síncrono definido por la tensión fasorial del bus infinito V_∞ . La velocidad síncrona está representada por ω_s , mientras que ω denota la desviación de la velocidad del rotor respecto a la velocidad síncrona. E'_q es la tensión interna en el eje de cuadratura. La entrada de energía mecánica P_m proviene de la turbina, supuesta constante y medida en la mayoría de los controles. Por otro lado, P_e es la potencia eléctrica activa y v_f es la tensión de campo suministrada por el sistema de excitación. Además, H representa la constante de inercia, D es el coeficiente de amortiguamiento, X_d y X'_d son las reactancias síncrona y transitoria del eje directo, respectivamente, X_l es la reactancia de la línea de transmisión, y T'_{do} es la constante de tiempo transitoria del eje directo en circuito abierto.

B. MODELO LINEAL DEL GENERADOR SÍNCRONO

La linealización es un proceso mediante el cual se aproximan los comportamientos no lineales de un sistema a un modelo lineal en torno a un punto de operación específico, comúnmente llamado punto de equilibrio o punto de funcionamiento. Esto se logra mediante el uso de técnicas como la expansión en series de Taylor, donde las funciones no lineales se aproximan por sus derivadas en el punto de operación.

Obtener un punto de equilibrio es esencial para linealizar un sistema debido a que este punto proporciona una referencia clave alrededor de la cual se realiza la aproximación lineal. Al elegir un punto de equilibrio adecuado, la linealización puede capturar de manera precisa las características dinámicas del sistema en una región cercana al estado de operación deseado. Esta aproximación local simplifica el análisis y diseño de sistemas de control facilitando la aplicación de herramientas y técnicas de control lineal para mejorar el comportamiento del sistema en lazo cerrado.

Para el modelo anterior, los puntos de equilibrio, la potencia eléctrica y la tensión de excitación se pueden expresar en función de un δ determinado [8], como se puede apreciar en las Ecs. (5), (6), (7) y (8).

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

$$\bar{E}'_q = \frac{(X'_d + X_l) \bar{P}_e}{\sin \bar{\delta}} \quad (6)$$

$$\bar{v}_f = \frac{(X_d + X_l) \bar{P}_e}{\sin \bar{\delta}} - \frac{(X_d - X'_d) \cos \bar{\delta}}{X'_d + X_l} \quad (7)$$

$$\bar{P}_m = \bar{P}_e \quad (8)$$

Seleccionándose: $\bar{\delta} = 1.12$ [rad] y $\bar{P}_e = 1$ [pu] para determinar el punto de equilibrio alrededor del cual se llevará a cabo la linealización del modelo no lineal del generador síncrono. El punto de equilibrio seleccionado se determinó en base a las condiciones típicas de operación del sistema. Este punto representa un estado operativo común en el cual el sistema puede ser analizado de manera efectiva, permitiendo que las respuestas obtenidas sean representativas del comportamiento del sistema en situaciones reales de funcionamiento.

Los parámetros del generador se muestran en la Tabla I [8]:

TABLA I. PARÁMETROS DEL GENERADOR SÍNCRONO

| Parámetros | Valores |
|--------------|------------|
| \bar{X}_d | 1.070 pu |
| \bar{X}_l | 0.415 pu |
| V_∞ | 1.0 pu |
| \bar{P}_m | 1.0 pu |
| ω_s | 120π rad/s |
| \bar{X}'_d | 0.408 pu |
| \bar{X}_q | 0.660 pu |
| T'_{do} | 5.4 s |
| H | 6.680 s |
| D | 0 |

Utilizando la expansión de Taylor de segundo orden, se obtiene el modelo linealizado como se muestra en las Ecs. (9), (10) y (11).

$$\Delta\dot{\delta} = \Delta\omega \quad (9)$$

$$\Delta\dot{\omega} = -13.65\Delta\delta - 30.86\Delta E'_q \quad (10)$$

$$\Delta\dot{E}'_q = -0.1341\Delta\delta - 0.3341\Delta E'_q + 0.1852\Delta v_f \quad (11)$$

El cual se puede escribir de la forma matricial de espacio de estados, Ec. (12) y Ec. (13).

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) \quad (12)$$

$$y(t) = Cx(t) \quad (13)$$

Donde el vector de estado $x(t)$ se define en la Ec. (14) y la entrada de control $u(t)$ en la Ec. (15).

$$x(t) = \begin{bmatrix} \Delta\delta \\ \Delta\omega \\ \Delta E'_q \end{bmatrix} \quad (14)$$

$$u(t) = [\Delta v_f] \quad (15)$$

Las matrices A , B y C se definen de la siguiente manera, Ec. (16), Ec. (17) y Ec. (18).

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ -13.65 & 0 & -30.86 \\ -0.1341 & 0 & -0.3341 \end{bmatrix} \quad (16)$$

$$B = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0.1852 \end{bmatrix} \quad (17)$$

$$C = [1 \ 0 \ 0] \quad (18)$$

C. MODELO LINEAL DIFERENCIALMENTE PLANO DEL GENERADOR SÍNCRONO

La planitud diferencial fue introducida originalmente en el marco del álgebra diferencial [11]. La propiedad importante de los sistemas planos es que se puede encontrar un conjunto de salidas (igual en número al número de entradas) de tal manera que es posible expresar todos los estados y entradas en términos de esas salidas y sus derivadas [12].

El modelo lineal del generador síncrono presentado en la sección anterior cumple con esta propiedad ya que es posible demostrar que $y = \Delta\delta$ es una salida plana, pues a partir de esta salida y de sus derivadas es posible parametrizar diferencialmente todos los estados y entradas del sistema, como se muestra en las Ecs. (19), (20), (21) y (22).

$$\Delta\delta = y \quad (19)$$

$$\Delta\omega = \dot{y} \quad (20)$$

$$\Delta E'_q = -0.4426y - 0.0324\dot{y} \quad (21)$$

$$\Delta v_f = -0.0138y - 0.4426\dot{y} - 0.0108\ddot{y} - 0.0324y^{(3)} \quad (22)$$

Por lo que podemos escribir el modelo diferencialmente plano del generador síncrono como se muestra en las Ecs. (23), (24) y (25).

$$\dot{y}_1 = y_2 \quad (23)$$

$$\dot{y}_2 = y_3 \quad (24)$$

$$\dot{y}_3 = -0.4248y_1 - 13.65y_2 - 0.3341y_3 - 30.86u \quad (25)$$

Donde $y_1 = y = \Delta\delta$, $y_2 = \dot{y}$, $y_3 = \ddot{y}$ y $u = \Delta v_f$. Para este modelo se obtiene su representación matricial en el espacio de estados, Ec. (12) y Ec. (13). Donde el vector de estado $x(t)$ se define en la Ec. (26) y la entrada de control $u(t)$ en la Ec. (27).

$$x(t) = \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ y_3 \end{bmatrix} \quad (26)$$

$$u(t) = [u] \quad (27)$$

Las matrices A , B y C se definen de la siguiente manera, Ec. (28), Ec. (29) y Ec. (30).

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ -0.4248 & -13.65 & -0.3341 \end{bmatrix} \quad (28)$$

$$B = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -30.86 \end{bmatrix} \quad (29)$$

$$C = [1 \ 0 \ 0] \quad (30)$$

D. ESQUEMA DE CONTROL MPC BASADO EN MODELO

El MPC es una técnica de control moderna que se basa en la optimización. Este enfoque consiste en resolver continuamente problemas de control óptimo a lo largo de un horizonte finito en línea. La retroalimentación se obtiene de manera implícita al aplicar únicamente la primera parte de la trayectoria de entrada optimizada, repitiendo el proceso de optimización en línea en cada nuevo intervalo de tiempo [13].

El MPC es ampliamente utilizado en la actualidad. En un estudio reciente [14], se implementa un esquema de control MPC basado en planitud diferencial, aprovechando las ventajas complementarias de ambas metodologías de control.

Es importante destacar que el MPC puede resolver los desafíos asociados con el lazo cerrado del controlador PI tradicional, como la sintonización de parámetros y la respuesta dinámica lenta [15]. Este estudio se basa en el MPC

desarrollado en [16], por lo que se mantiene la misma notación utilizada en dicha referencia.

La base del MPC es un modelo preciso del sistema, utilizando un modelo de espacio de estados en tiempo discreto, como se indica en las Ecs. (31) y (32).

$$\mathbf{x}(k+1) = \mathbf{A}\mathbf{x}(k) + \mathbf{B}\mathbf{u}(k) \quad (31)$$

$$\mathbf{y}_r(k) = \mathbf{C}_r\mathbf{x}(k) \quad (32)$$

Donde $\mathbf{x} \in R^n$ es el vector de estado, $\mathbf{u} \in R^{n_u}$ es el vector de la entrada de control, $\mathbf{y}_r \in R^{n_r}$ es el vector de salida, $\mathbf{A} \in R^{n \times n}$ es la matriz de estado, $\mathbf{B} \in R^{n \times n_u}$ representa la matriz de entrada, $\mathbf{C}_r \in R^{n_r \times n}$ es la matriz de salida.

Como se describe en [16] los estados futuros en cada instante de muestreo se pueden hallar como se indica en Ec. (33):

$$\mathbf{x}(k+i) = \mathbf{A}^i\mathbf{x}(k) + [\mathbf{A}^i\mathbf{B} \quad \dots \quad \mathbf{A}\mathbf{B} \quad \mathbf{B}] \begin{bmatrix} \Pi_1^{(n_u, N)} \\ \vdots \\ \Pi_{i-1}^{(n_u, N)} \\ \Pi_i^{(n_u, N)} \end{bmatrix} \tilde{\mathbf{u}}(k) \quad (33)$$

Donde $\tilde{\mathbf{u}}(k)$ es la secuencia de acciones futuras y $\Pi_i^{(n_u, N)}$ es la matriz de selección que se define como se expresa en Ec. (34).

$$\Pi_i^{(n_u, N)} := \begin{bmatrix} \mathbf{0}_{n \times n} \dots \mathbf{0}_{n \times n} & \mathbf{I}_{n \times n} & \mathbf{0}_{n \times n} \dots \mathbf{0}_{n \times n} \\ \text{(i-1) términos} & & \text{(N-i) términos} \end{bmatrix} \quad (34)$$

Donde n es la longitud del vector, N corresponde al horizonte de predicción e i representa el término deseado. A partir de lo descrito la Ec. (33) se puede expresar de manera compacta como se expresa en Ec. (35).

$$\mathbf{x}(k+i) = \Phi_i\mathbf{x}(k) + \Psi_i\tilde{\mathbf{u}}(k), \quad \forall i \in \{1, \dots, N\} \quad (35)$$

Donde $\Phi_i \in R^{n \times n}$ y $\Psi_i \in R^{n \times (N \cdot n_u)}$. Teniendo en cuenta lo anterior se propone la siguiente función de costo, Ec. (36):

$$J := \sum_{i=1}^N |\mathbf{y}_r(k+i) - \mathbf{y}_r^d(k+i)|_{\mathbf{Q}_y}^2 + \sum_{i=1}^N |\Pi_i^{(n_u, N)}\tilde{\mathbf{u}} - \mathbf{u}^d|_{\mathbf{Q}_u}^2 \quad (36)$$

Donde, a partir de la matriz de ponderación $\mathbf{Q}_y \in R^{n_r \times n_r}$ se penaliza la diferencia entre la trayectoria de salida y la referencia, a la vez que $\mathbf{Q}_u \in R^{n_u \times n_u}$ penaliza el error entre la señal de mando y la señal de mando deseada, \mathbf{y}_r^d y \mathbf{u}^d representan la salida y la señal de mando deseadas respectivamente.

En el presente trabajo no se consideran restricciones para la salida ni para la señal de mando. Además $\mathbf{y}_r^d = 0$ y $\mathbf{u}^d = 0$. Esto permite reescribir Ec. (36) de manera compacta como se indica en Ec. (37):

$$J := \frac{1}{2} \tilde{\mathbf{u}}^T \mathbf{H} \tilde{\mathbf{u}} + \mathbf{F} \mathbf{x}(k) \tilde{\mathbf{u}} \quad (37)$$

Donde las expresiones para \mathbf{H} y \mathbf{F} se presentan en Ec. (38) y Ec. (39).

$$\mathbf{H} := 2 \sum_{i=1}^N \left[\Psi_i^T \mathbf{C}_r^T \mathbf{Q}_y \mathbf{C}_r \Psi_i + \left(\Pi_i^{(n_u, N)} \right)^T \mathbf{Q}_u \left(\Pi_i^{(n_u, N)} \right) \right] \quad (38)$$

$$\mathbf{F} := 2 \sum_{i=1}^N \left[\Psi_i^T \mathbf{C}_r^T \mathbf{Q}_y \mathbf{C}_r \Phi_i \right] \quad (39)$$

Por lo que la mejor secuencia de acciones futuras $\tilde{\mathbf{u}}^{opt}(\mathbf{x}(k))$ que minimiza Ec. (37) se puede escribir como, Ec. (40):

$$\tilde{\mathbf{u}}^{opt}(\mathbf{x}(k)) := -[\mathbf{H}^{-1}\mathbf{F}]\mathbf{x}(k) \quad (40)$$

Por lo tanto, la acción de mando a aplicar es la primera en la secuencia de control óptima, Ec. (41).

$$\mathbf{K}_{MPC} := \tilde{\mathbf{u}}^{opt}(\mathbf{x}(k)) \Pi_1^{(n_u, N)} \quad (41)$$

Las matrices $\mathbf{Q}_y \in R^{n_r \times n_r}$ y $\mathbf{Q}_u \in R^{n_u \times n_u}$ se definen en las Ecs. (42) y (43).

$$\mathbf{Q}_y = \alpha \begin{bmatrix} 1 & \dots & 0 \\ \vdots & \ddots & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (42)$$

$$\mathbf{Q}_u = \beta \begin{bmatrix} 1 & \dots & 0 \\ \vdots & \ddots & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (43)$$

Donde α y β son parámetros de sintonización.

E. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En esta subsección, se presentan y discuten los resultados de aplicar el esquema de control MPC presentado en la sección anterior al modelo lineal del generador síncrono, Ec. (9), Ec. (10) y Ec. (11) y al modelo lineal diferencialmente plano del generador síncrono, Ec. (23), Ec. (24) y Ec. (25).

Discretizando con un período de muestreo $\tau = 0.1$ s y utilizando un horizonte de predicción de $N = 20$ con los parámetros de sintonización $\alpha = 10^5$ y $\beta = 1$, se obtuvieron los resultados que se muestran en las Fig. 1 y Fig. 2.

Donde δ^* es la trayectoria de referencia para el ángulo de potencia δ .

Los resultados obtenidos al aplicar el esquema de control MPC al modelo lineal del generador síncrono se muestran en la Fig. 1. En la figura Fig. 1 (a), se observa un seguimiento adecuado de la trayectoria deseada para el ángulo de

potencia. La Fig. 1 (b), muestra el comportamiento de la señal de mando, que en este caso corresponde a la tensión de campo aplicada. Se puede observar cómo varía esta señal en respuesta a los cambios en la trayectoria de referencia especificada y cómo contribuye a la regulación del ángulo de potencia del generador. Finalmente, en la Fig. 1 (c), se muestra la evolución del error entre la trayectoria de referencia y la salida del sistema, donde se aprecian valores bajos, lo que evidencia un desempeño satisfactorio del esquema de control.

En la Fig. 2 (a), se observa un seguimiento satisfactorio de la trayectoria deseada para el ángulo de potencia con el modelo diferencialmente plano. El comportamiento de la señal de mando, mostrado en la figura Fig. 2 (b) alcanza valores menores que cuando se utiliza el modelo lineal, logrando una reducción del 7.7% en el valor máximo de la señal de mando, indicando un menor esfuerzo de control en este caso. La precisión del seguimiento es evidente, con un error del orden de 10^{-3} , menor al obtenido al utilizar el modelo lineal, como se muestra en la Fig. 2 (c). Este bajo nivel de error indica la minimización de las desviaciones entre la trayectoria de salida y la trayectoria objetivo, reduciendo el valor máximo del error en un 42.6%, garantizando un rendimiento óptimo.

Es evidente que ambos modelos proporcionan resultados muy satisfactorios, destacando el excelente desempeño de la estrategia de control MPC utilizada. Sin embargo, el uso del modelo diferencialmente plano ofrece beneficios significativos. Este modelo no solo reduce el error, logrando un seguimiento más preciso de la trayectoria de referencia, sino que también requiere un menor esfuerzo de control. Por lo tanto, la utilización del modelo diferencialmente plano no solo mejora la precisión, sino que también optimiza la eficiencia del esquema de control.

III. CONCLUSIONES

Este trabajo ha presentado una comparación exhaustiva entre dos esquemas de control predictivo basado en modelo aplicados a un generador síncrono, uno que utiliza un modelo lineal convencional y otro que emplea un modelo lineal diferencialmente plano. Los resultados obtenidos evidencian que el uso del modelo diferencialmente plano proporciona mejoras significativas. Los aportes más importantes de este estudio se pueden resumir de la siguiente manera:

A. RENDIMIENTO SUPERIOR EN EL SEGUIMIENTO DE TRAYECTORIAS

La utilización del modelo diferencialmente plano permite representar tanto las variables de estado como la entrada de control en función de una salida plana y un número finito de sus derivadas temporales. Esta metodología facilita un control más preciso y efectivo del generador síncrono. Además, el esquema de control MPC que se basa en el

modelo diferencialmente plano, demuestra un rendimiento superior en el seguimiento de referencias, reduciendo el valor máximo del error entre la salida del sistema y la trayectoria de referencia en un 42.6%.

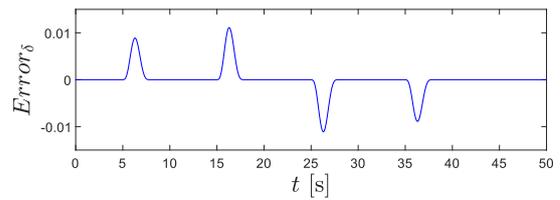
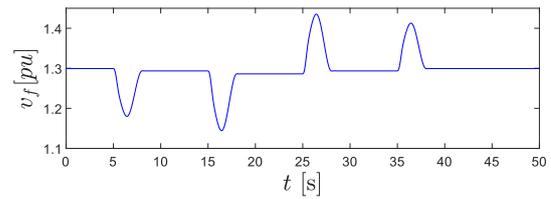
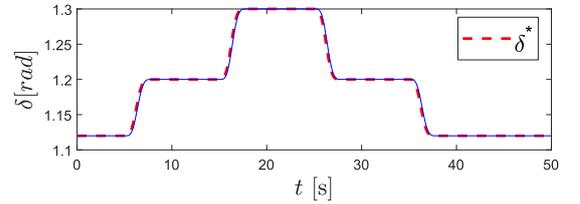
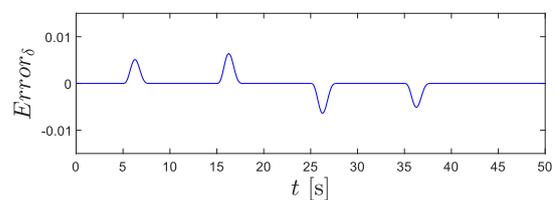
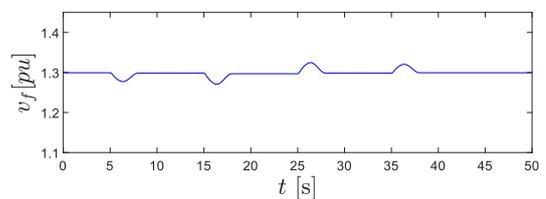
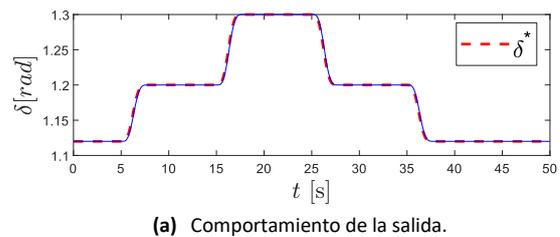


Fig. 1. Resultados en simulación para el GS lineal.



(c) Comportamiento del error entre la salida y la referencia.

Fig. 2. Resultados en simulación para el GS lineal diferencialmente plano.

B. REDUCCIÓN DEL ESFUERZO DE CONTROL

El uso del modelo diferencialmente plano permite una disminución del esfuerzo de control necesario, logrando una reducción del 7.7% en el valor máximo de la señal de mando, lo que se traduce en una mayor eficiencia y menor desgaste de los componentes del sistema de control.

C. TRABAJOS FUTUROS

En este trabajo, los puntos de equilibrio del sistema se determinaron utilizando las Ec. (5), Ec. (6), Ec. (7) y Ec. (8), las cuales proveen una base sólida para analizar la dinámica en condiciones nominales. Sin embargo, en situaciones donde el sistema está sujeto a perturbaciones externas o incertidumbre paramétrica, estas condiciones de equilibrio pueden verse alteradas, afectando el desempeño del sistema.

Para abordar este desafío, una línea de investigación futura consiste en implementar técnicas de estimación de perturbaciones y parámetros en tiempo real. Dichas técnicas permitirían identificar y modelar dinámicamente las perturbaciones que afectan al sistema, lo cual facilitaría su compensación oportuna mediante estrategias de control en línea. Este enfoque busca mejorar la robustez y adaptabilidad del sistema frente a condiciones cambiantes, asegurando su estabilidad y desempeño en escenarios prácticos.

IV. AGRADECIMIENTOS

Los autores expresan su gratitud al Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías (CONAHCYT) por el apoyo brindado en la realización de este trabajo.

REFERENCIAS

- [1] W. Strielkowski, L. Cívín, E. Tarkhanova, M. Tvaronavičienė, and Y. Petrenko, "Renewable energy in the sustainable development of electrical power sector: A review," *Energies*, vol. 14, no. 24, 2021.
- [2] J. Fernández Silva et al., "Evaluación de técnicas de estimación de parámetros en línea para un generador síncrono," 2022.
- [3] S. K. and T. R. Chelliah, "Capability of synchronous and asynchronous hydropower generating systems: A comprehensive study," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 188, p. 113863, 2023.
- [4] A. S. Bazanella, "Métodos analíticos para a síntese de controladores em sistemas de potência," 1997.
- [5] Y. Wang, D. J. Hill, R. H. Middleton, and L. Gao, "Transient stabilization of power systems with an adaptive control law," *Automatica*, vol. 30, no. 9, pp. 1409–1413, 1994. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0005109894900051>
- [6] M. Galaz, R. Ortega, A. S. Bazanella, and A. M. Stankovic, "An energy-shaping approach to the design of excitation control os synchronous generators," *Automatica*, vol. 39, no. 1, pp. 111–119, 2003. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0005109802001772>
- [7] Chapman, M. Ilic, C. King, L. Eng, and H. Kaufman, "Stabilizing a multimachine power system via decentralized feedback linearizing excitation control," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 8, no. 3, pp. 830–839, 1993.
- [8] F. Beltran-Carbajal, A. Favela-Contreras, I. Lopez-Garcia, A. Valderrabano-Gonzalez, J. C. Rosas-Caro,

and V. M. Sanchez-Huerta, "Output feedback dynamic tracking excitation control of synchronous generators," *IET Generation, Transmission & Distribution*, vol. 10, no. 12, pp. 3041–3049, 2016.

- [9] M. Rojas, J. G. Rueda-Escobedo, G. Espinosa-Pérez, and J. Schiffer, "Observer-based excitation control for transient stabilization of the single machine infinite bus system," in 2020 59th IEEE Conference on Decision and Control (CDC), pp. 3377–3382, 2020.
- [10] N. V. Valencia, *Dynamic State Estimation in Electric Power Systems*. PhD thesis, UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MÉXICO, 2021.
- [11] M. Fliess, J. Lévine, P. Martin, and P. Rouchon, "Sur lessystèmesnon linéaires différentiellement plats," *CR Acad. Sci. Paris*, p. 619, 1992.
- [12] M. J. Van Nieuwstadt and R. M. Murray, "Real-time trajectory generation for differentially flat systems," *International Journal of Robust and Nonlinear Control*, vol. 8, no. 11, pp. 995–1020, 1998.
- [13] J. Köhler, M. A. Müller, and F. Allgöwer, "Analysis and design of model predictive control frameworks for dynamic operation—an overview," *Annual Reviews in Control*, vol. 57, p. 100929, 2024.
- [14] D. Rodriguez-Guevara, A. Favela-Contreras, F. Beltran-Carbajal, C. Sotelo, and D. Sotelo, "A differential flatness-based model predictive control strategy for a nonlinear quarter-car active suspension system," *Mathematics*, vol. 11, no. 4, p. 1067, 2023.
- [15] M. Schwenzer, M. Ay, T. Bergs, and D. Abel, "Review on model predictive control: An engineering perspective," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 117, no. 5, pp. 1327–1349, 2021.
- [16] D. Sotelo, A. Favela-Contreras, V. V. Kalashnikov, and C. Sotelo, "Model predictive control with a relaxed cost function for constrained linear systems," *Mathematical Problems in Engineering*, vol. 2020, no. 1, p. 7485865, 2020.

BIOGRAFÍAS



MICHEL ROBERTO FERRER CEPERO Ingeniero en Telecomunicaciones y Electrónica por la Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas (Cuba). Actualmente es alumno de la Maestría en Ciencias en Ingeniería Electromagnética de la Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Azcapotzalco. Sus áreas de interés son el modelado, identificación y control de sistemas dinámicos, especialmente sistemas de conversión de energía.



FRANCISCO BELTRÁN CARBAJAL Ingeniero Electromecánico por el Instituto Tecnológico de Zacatepec (1993) y Doctor en Ciencias en Ingeniería Eléctrica en la especialidad de Mecatrónica por el CINVESTAV-IPN (2004). Actualmente es Profesor-Investigador Titular C por Tiempo Indeterminado en el Departamento de Energía de la Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Azcapotzalco. Sus principales áreas de interés en investigación, innovación y desarrollo tecnológico son: Control de Vibraciones, Identificación de Sistemas, Maquinaria Rotatoria, Mecatrónica y Control de Sistemas de Conversión de Energía.



IRVIN LÓPEZ GARCÍA Nació en Asunción Ixtaltepec Oaxaca, México, en 1978. En 2001 obtuvo el título de Ingeniero Electricista con especialidad en Máquinas Eléctricas de la Universidad Autónoma Metropolitana – Azcapotzalco. Obtuvo el grado de Maestro en Ciencia, con especialidad en Ingeniería Eléctrica con Mención Honorífica en 2005 en el Instituto Politécnico Nacional y el grado de Doctor en Ingeniería, con especialidad en control, en 2012 en el Programa de Estudios de Maestría y de Doctorado en Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México. Se incorporó a la Universidad Autónoma Metropolitana en 2006 y actualmente es Profesor Titular "C" de

tiempo completo, adscrito al Departamento de Energía y con tipo de contratación indeterminada desde mayo de 2009. Su línea de investigación es el análisis, diseño y control de máquinas eléctricas aplicadas a fuentes alternativas en la generación de energía eléctrica.



DAVID SOTELO Es profesor investigador asistente en el Tecnológico de Monterrey. Recibió su título de Ingeniería en Mecatrónica y Maestría en Ciencias de Ingeniería en Automatización y Control por el Tecnológico de Monterrey, Campus Monterrey, México en 2010 y 2015 respectivamente. Además, en 2014 recibió su título de Maestría en Ciencias en Sistemas, Control y Tecnologías de la Información por la Université Joseph Fourier de Grenoble, Francia. En 2019 obtuvo su Doctorado con varias publicaciones en revistas indizadas. Es miembro del Sistema Nacional de Investigadores de México, SNI-I. Sus principales intereses de investigación son control óptimo y robusto, identificación de procesos y diseño de estructuras de control.



CARLOS SOTELO Es profesor investigador asistente en el Tecnológico de Monterrey. Recibió su título de Ingeniería en Mecatrónica y Maestría en Ciencias de Ingeniería en Automatización y Control, en el Tecnológico de Monterrey, Campus Monterrey, México en 2010 y 2015 respectivamente. Además, ha recibido su título de Maestría en Ciencias en Sistemas, Control y Tecnologías de la Información por la Université Joseph Fourier de Grenoble, Francia en 2014. Finalmente, en 2019 recibió su título de Doctorado luego de varias publicaciones en revistas indizadas. Es miembro del Sistema Nacional de Investigación de México, SNI-I. Sus principales intereses de investigación son control no lineal, mecatrónica, identificación paramétrica y control predictivo de procesos.