

Recibido 14 de septiembre de 2024. Aceptado 29 de noviembre de 2024. Publicado 19 de diciembre de 2024.

ISSN: 2448-7775

Determinación de los parámetros que intervienen en el análisis de estabilidad de pequeña señal de un sistema máquina-bus infinito

L. NARCISO RUEDA CAN, F. CISNEROS TORRES, V. TORRES GARCÍA.

¹TecNM/Instituto Tecnológico de Morelia (PGIIE), Morelia, Michoacán, México.

RESUMEN Se modela un sistema eléctrico de potencia con fines de análisis de estabilidad de pequeña señal, para determinar los parámetros que intervienen en la obtención de las constantes **K**. Constantes que representan la dinámica del sistema. Se describe el proceso de obtención de estas con la finalidad de obtener resultados más precisos de acuerdo a la información proporcionada por la literatura. Se modela en el espacio de estado las ecuaciones diferenciales del sistema para obtener sus eigen-valores y así obtener, a través, de la herramienta de Matlab la gráfica las diferentes respuestas oscilatorias con las siguientes consideraciones: el efecto de la dinámica del circuito de campo, el efecto del regulador automático de voltaje AVR y el efecto del estabilizador de sistema de potencia PSS.

PALABRAS CLAVE — Estabilidad, Pequeña señal, Máquina síncrona.

I. INTRODUCCIÓN

Una característica importante del Sistema Eléctrico de Potencia (SEP), es la confiabilidad de una operación continua que garantice el suministro de energía. Sin embargo, es común contar con la presencia de oscilaciones electromecánicas, producidas por los constantes cambios en la demanda. Cambios que pudieran en algún momento interrumpir la operación de la máquina síncrona. Es por lo anterior, que los SEP constantemente se encuentran sujetos a estudios de estabilidad [1]-[4].

Una de las bases para el estudio de Estabilidad de Pequeña Señal (EPS), es la metodología planteada por Prabha Kundur [5]. Por medio de la cual, se modela el sistema de potencia para analizar su comportamiento dinámico ante diferentes escenarios. En el modelado matemático que representa a las ecuaciones diferenciales para el análisis de las oscilaciones electromecánicas de la máquina síncrona intervienen las constantes K_1 – K_6 , las cuales representan las propiedades dinámicas del sistema en estudio. Dichas constantes surgen a partir de considerar el efecto de la dinámica del circuito de campo. Este tipo de análisis es común encontrarlo en diferentes escenarios, cómo los presentados en [6]-[11].

La literatura nos describe el proceso para determinar dichas constantes, sin embargo; hemos detectado, que dentro del análisis de ciertos elementos que intervienen en las ecuaciones, hay ciertas características no explicitas. Lo cual, tiende a arrojar valores distintos a los planteados por el autor [5]. Tal es el caso de [12], el cual desarrolla una guía para el modelado y análisis de EPS, basado en la metodología de [13] en este trabajo se pudo observar una desviación en sus resultados. Por otro lado, algunos artículos que presentan el estudio de EPS y que abordan este tipo de metodología, no suelen hacer énfasis en el desarrollo de dichas ecuaciones, cómo son los casos de [14], [6]. Por otra parte, en algunas fuentes de consulta, no se encontraron datos que nos permitan comparar resultados, dado que sus modelos de análisis varían entre cada autor por ejemplo: "Power System Control and Stability" [15] y "Power System Oscillation" [16].

Las ecuaciones que definen a las primeras constantes $\mathbf{K_1}$ y $\mathbf{K_2}$, proporcionan una gran ventaja para el desarrollo del análisis completo, y es que dichas ecuaciones están compuestas por un amplio conjunto de elementos que contienen la información suficiente y necesaria, para abordar y determinar los parámetros de las ecuaciones que describen además de las constantes $\mathbf{K_3}$ - $\mathbf{K_6}$, los efectos que tienen en la respuesta de la máquina síncrona, el Regulador Automático de Voltaje (AVR), y el Estabilizador de Sistema de Potencia (PSS).

Es por lo anterior que se pretende desarrollar las ecuaciones que describen cada elemento, parámetro, o variable involucrada necesaria para la obtención de las constantes, así mismo identificar y denotar las variables que suelen describirse igual en la literatura, pero que utilizan un valor diferente, cómo es el caso de algunas inductancias que

^{*}Autor de Correspondencia: narciso rueda 357@outlook.com



utilizan valores de saturación incrementados y que no suelen especificarse en el planteamiento de las ecuaciones. Esto con la finalidad de no causar confusión a la hora de sustituir parámetros y presentar discrepancias en los resultados. Adicionalmente, con los parámetros obtenidos se representa, de manera gráfica las respuestas del sistema, utilizando el modelado en el espacio de estados con la herramienta de Matlab.

II. DESARROLLO

Las ecuaciones diferenciales que definen el comportamiento de la máquina síncrona para estudios de EPS, se expresan en términos de ecuaciones de estado. Las expresiones Ec. (1) y Ec. (2), son la forma linealizada de las ecuaciones de estado [17].

$$\Delta \dot{x} = A \Delta x + B \Delta u \tag{1}$$

$$\Delta y = C\Delta x + D\Delta u \tag{2}$$

Donde:

A = Matriz de estado.

B = Matriz de control o de entrada.

C = Matriz de salida.

D = Matriz de feedforward.

 $\Delta x = Vector de estado.$

 $\Delta y = Vector de salida.$

 $\Delta u = Vector de entrada$

La Fig. 1, es la representación de un sistema de una sola máquina conectada a un bus infinito (SMIB) por sus siglas en inglés, sobre el cual nos basaremos para realizar el análisis de EPS. Consideraremos que el sistema es no amortiguado con un valor del coeficiente de amortiguamiento $K_D = 0$. El análisis comienza a partir de lo siguiente: supondremos que se presenta una falla de cortocircuito que provoca la apertura de la línea de j0.93. La salida de la línea se reflejará cómo un cambio en la carga, causando variaciones en la operación de la máquina síncrona.

Los datos del sistema de la Fig. 1 son:

Los valores posteriores a la perturbación se indican en la Tabla I. El proceso de análisis post-falla se puede consultar en [5].

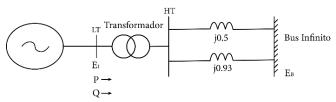


Fig. 1. Representación de un SMIB.

L. N. Rueda Can et al.: Determinación de los parámetros que intervienen en el análisis de estabilidad de pequeña señal de un sistema máquina-bus infinito

TABLA I. VALORES POSTERIORES A LA PERTURBACIÓN.

P	Q	$\boldsymbol{E_T}$	E_B	Н	X'_d	\tilde{I}_t	$\widetilde{m{E}}'$
0.9	0.3	1∠36°	0.995∠0'	3.5	0.3	0.9-0.3i	1.09+0.27i

El modelo matemático de la máquina síncrona está dado por la ecuación de oscilación [18]. Las Ec. (3) y Ec. (4) representan la forma linealizada de dicha ecuación.

$$\Delta \dot{\omega}_r = \frac{1}{2H} [\Delta T_m - \Delta T_e - K_D \Delta \omega_r]$$
 (3)

$$\Delta \dot{\delta} = \omega_0 \omega_{\pi} \tag{4}$$

Para fines de análisis, la desviación del Par eléctrico ΔT_e tomará la forma de:

$$\Delta T_{o} = K_{s} \Delta \delta \tag{5}$$

Sustituyendo la Ec. (5) en Ec. (3), se obtiene:

$$\Delta \dot{\omega}_r = \frac{1}{2H} [\Delta T_m - K_s \Delta \delta - K_D \Delta \omega_r]$$
 (6)

Seguidamente se expresan las Ec. (4) y Ec. (6) en la forma de matriz vectorial, de manera que se tiene:

$$\begin{bmatrix} \Delta \dot{\omega}_r \\ \Delta \dot{\delta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{K_D}{2H} & -\frac{K_S}{2H} \\ \omega_0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \omega_r \\ \Delta \delta \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{2H} \\ 0 \end{bmatrix} \Delta T_m \tag{7}$$

A. DETERMINACIÓN DE K₁- K₄

La ecuación diferencial que representa la dinámica del circuito de campo, se expresa en su forma de matricial (8):

$$\begin{bmatrix} \Delta \dot{\omega}_{r} \\ \Delta \dot{\delta} \\ \Delta \dot{\psi}_{fd} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \omega_{r} \\ \Delta \delta \\ \Delta \psi_{fd} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{2H} & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & \frac{\omega_{0} R_{fd}}{L_{adu}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta T_{m} \\ \Delta E_{fd} \end{bmatrix}$$
(8)

Donde, la matriz de estado A1 es:

$$\begin{bmatrix} -\frac{K_{D}}{2H} & -\frac{K_{1}}{2H} & -\frac{K_{2}}{2H} \\ \omega_{0} & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{\omega_{0}R_{fd}}{L_{fd}}m_{1}L'_{ads} & -\frac{\omega_{0}R_{fd}}{L_{fd}}[1-\frac{L'_{ads}}{L_{fd}}+m_{2}L'_{ads}] \end{bmatrix}$$
(7)

Como se puede apreciar en la matriz de estado A1, dada por la Ec. (7), la Ec. (6) ahora contiene dos nuevos elementos que sustituyen a la Ec. (5). Estos elementos son $\mathbf{K_1}$ y $\mathbf{K_2}$. Las ecuaciones que definen a estas constantes están dadas por:



 $K_1 = n_1(\psi_{ad0} + L_{aqs(Incr)}i_{d0}) - m_1(\psi_{aq0} + L'_{ads}i_{q0})$ (8)

$$K_{2} = n_{2}(\psi_{ad0} + L_{aqs(Incr)}i_{d0}) - m_{2}(\psi_{aq0} + L'_{ads}i_{q0}) + \frac{L'_{ads}}{L_{fd}}i_{q0}$$
(9)

Lo primero es determinar cada uno de los elementos que conforman a las Ec. (8) y Ec. (9). Para ello, debemos de abordar dos puntos importantes en este análisis, por un lado, se requerirá calcular las características iniciales del sistema, considerando un valor de saturación total, y, por otro lado, los parámetros que asocian a los valores perturbados con un valor de saturación incrementado.

1. Cálculo del factor de saturación total

La Ecuación que define al factor de saturación total en el eje *d* está dada por:

$$K_{sd(total)} = \frac{\Psi_{at}}{\Psi_{at} + \Psi_{I}} \tag{10}$$

Donde:

$$\Psi_{at} = E_a \tag{11}$$

$$\Psi_I = A_{sat} e^{B_{sat}(\Psi_{at} - \Psi_{T1})} \tag{12}$$

Para determinar la Ec. (11) se tiene:

$$\tilde{E}_a = \tilde{E}_t + (R_a + jX_t)\tilde{I}_t$$

$$E_a = \sqrt{(\text{Re}(\tilde{E}_a))^2 + (\text{Im}(\tilde{E}_a))^2}$$
(13)

Sustituyendo los datos de la Sección II en la Ec. (13) y resolviendo se obtiene: $\Psi_{at} = 1.0604$; seguidamente se sustituye este valor en la Ec. (12) y de igual forma sustituyendo los valores correspondientes se procede a resolver para obtener: $\Psi_l = 0.1879$. Sustituyendo ambos valores obtenidos en la Ec. (10), el valor de saturación total es: $K_{sd(total)} = 0.8494$. Para el caso en el eje q, se tiene que: $K_{sd(total)} = K_{sq(total)}$. La Tabla II contiene los valores iniciales calculados con este factor de saturación, donde, se puede observar que tenemos las corrientes iniciales de los ejes d y q, dados por i_{d0} e i_{q0} , que se requieren para las resolver las Ec. (8) y Ec. (9).

Para calcular los enlaces de flujo mutuos en los ejes Ψ_{ad0} y Ψ_{aq0} , se tiene:

$$\psi_{ad0} = L_{ads}(-i_{d0} + i_{fd0}) \tag{14}$$

$$\psi_{aa0} = -L_{aas}i_{a0} \tag{15}$$

L. N. Rueda Can et al.: Determinación de los parámetros que intervienen en el análisis de estabilidad de pequeña señal de un sistema máquina-bus infinito

TABLA III. VALORES INICIALES CON FACTOR DE SATURACIÓN TOTAL

e_{do}	e_{qo}	i_{do}	i_{qo}	i_{fdo}	E_{fdo}	δ_o
0.6837	0.7298	0.8342	0.4517	1.4511	2.3944	79.13°

Donde:

$$L_{ads} = K_{sd(total)} L_{adu} \tag{16}$$

$$L_{aas} = K_{sa(total)} L_{aau} \tag{17}$$

Sustituyendo la Ec. (10) en las Ec. (16) y Ec. (17), se obtiene: $L_{ads} = 1.4016$ y $L_{aqs} = 1.3591$ respectivamente; con los valores obtenidos y con la información de la Tabla II se sustituye en las Ec. (14) y Ec. (15), para obtener: $\Psi_{ad0} = 0.8646$ y $\Psi_{aq0} = -0.6139$.

2. Cálculo del factor de saturación incrementado

La ecuación que define al factor de saturación incrementado en el eje d está dada por:

$$K_{sd(incr)} = \frac{1}{1 + B_{sat} A_{sat} e^{B_{sat}(\psi_{at0} - \psi_{T1})}}$$
(18)

En la Ec. (18) el parámetro con valor inicial del enlace de flujo mutuo en el entre-hierro Ψ_{at0} será sustituido por Ψ_{at} . Resolviendo la Ec. (18) obtenemos: $K_{sd(incr)} = 0.4344$, donde: $K_{sq(incr)} = K_{sd(incr)}$. De forma similar al apartado anterior, ahora utilizando $K_{sd(incr)}$, se calculan las inductancias mutuas del entre-hierro en los ejes d y q de la siguiente manera:

$$L_{ads(incr)} = K_{sd(incr)} L_{adu}$$
 (19)

$$L_{ags(incr)} = K_{sg(incr)} L_{agu}$$
 (20)

De esta forma, obtenemos: $L_{ads} = 0.7168 \text{ y } L_{aqs} = 0.6951$. De las Ec. (8) y Ec. (9) se tiene que:

$$L'_{ads} = \frac{1}{\frac{1}{L_{ads(incr)}} + \frac{1}{L_{fd}}}$$
 (21)

Sustituyendo los valores de $L_{ads(incr)}$ y L_{fd} , en la Ec. (21), se obtiene: $L'_{ads} = 0.1261$. Entre los parámetros que involucran los valores de saturación incrementados, se encuentran las reactancias totales de los ejes d y q dados por las Ec. (22) y Ec. (23).

$$X_{Td} = X_E + X'_{ds} \tag{22}$$

$$X_{Tq} = X_E + X_{qs} (23)$$



Donde:

$$X_{qs} = (L_{aqs(incr)} + L_l)$$

$$X'_{ds} = (L'_{ads} + L_l)$$
(24)

Resolviendo la Ec. (24), y sustituyendo en las Ec. (22) y Ec. (23), se obtiene: $X_{Td} = 0.9361$ y $X_{Tq} = 1.5051$. La Tabla III contiene los datos restantes para resolver las Ec. (8) y Ec. (9).

Con la información obtenida, sustituimos los datos correspondientes en las Ec. (8) y Ec. (9) para obtener las primeras constantes. Las constantes K_3 y K_4 , están dadas por las Ec. (25) y Ec. (26).

$$K_{3} = -\frac{\frac{\omega_{o} R_{fd}}{L_{adu}}}{\frac{\omega_{o} R_{fd}}{L_{Gd}} \left[1 - \frac{L'_{ads}}{L_{Gd}} + m_{2} L'_{ads}\right]}$$
(25)

$$K_{4} = -\frac{\frac{\omega_{o} R_{fd}}{L_{fd}} [m_{1} L' a ds]}{\frac{\omega_{o} R_{fd}}{L}}$$
(26)

B. DETERMINACIÓN DE $K_5 Y K_6$

El modelo matricial dado por la Ec. (27) adiciona las ecuaciones diferenciales que describen al sistema de excitación AVR, donde se aprecia la presencia de las constantes K_5 y K_6 , además de la constante de excitación K_A proporcionada por el AVR.

$$\begin{bmatrix} \Delta \dot{\omega}_{r} \\ \Delta \dot{\delta} \\ \Delta \dot{\psi}_{fd} \\ \Delta \dot{v}_{1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \omega_{r} \\ \Delta \delta \\ \Delta \psi_{fd} \\ \Delta v_{1} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{2H} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \Delta T_{m}$$
 (27)

Donde, la matriz de estado A2 es:

$$\begin{bmatrix} -\frac{K_{D}}{2H} & -\frac{K_{1}}{2H} & -\frac{K_{2}}{2H} & 0\\ \omega_{0} & 0 & 0 & 0\\ 0 & -\frac{\omega_{0}R_{fd}}{L_{fd}}m_{1}L'_{ads} & a_{33} & a_{34}\\ 0 & \frac{K_{5}}{T_{R}} & \frac{K_{6}}{T_{R}} & -\frac{1}{T_{R}} \end{bmatrix}$$
(28)

TABLA IIIII. VALORES PARA EL CÁLCULO DE K₁ Y K₂.

R_T	D	m_1	m_2	n_1	n_2
0.003	1.4089	1.0435	0.8804	0.1267	0.0018

L. N. Rueda Can et al.: Determinación de los parámetros que intervienen en el análisis de estabilidad de pequeña señal de un sistema máquina-bus infinito

De la cual:

$$a_{33} = -\frac{\omega_0 R_{fd}}{L_{fd}} \left[1 - \frac{L'_{ads}}{L_{fd}} + m_2 L'_{ads} \right]$$

$$a_{34} = -\frac{\omega_0 R_{fd}}{L_{ads}} K_A$$
(29)

Las ecuaciones que describen a las constantes K_5 y K_6 , están dadas por:

$$\begin{split} K_{5} &= \frac{e_{d0}}{E_{t0}} \left[-R_{a} m_{1} + L_{l} n_{1} + L_{aqs(incr)} n_{1} \right] \\ &+ \frac{e_{q0}}{E_{t0}} \left[-R_{a} n_{1} - L_{l} m_{1} - L'_{ads} m_{1} \right] \end{split} \tag{30}$$

$$K_{6} = \frac{e_{d0}}{E_{t0}} \left[-R_{a}m_{2} + L_{l}n_{2} + L_{aqs(incr)}n_{2} \right]$$

$$+ \frac{e_{q0}}{E_{t0}} \left[-R_{a}n_{2} - L_{l}m_{2} + L'_{ads} \left(\frac{1}{L_{Gl}} - m_{2} \right) \right]$$
(31)

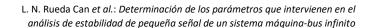
C. MODELADO DEL SISTEMA INCLUYENDO AL PSS

En esta subsección se adicionan en Ec. (32), las ecuaciones que describen al PSS. De esta forma, se estarán considerando los efectos de la dinámica del circuito de campo, del AVR y del PSS, que tienen sobre el sistema presentado en la Fig. 1.

$$\begin{bmatrix} \Delta \dot{\omega}_{r} \\ \Delta \dot{\delta} \\ \Delta \dot{\psi}_{fd} \\ \Delta \dot{v}_{1} \\ \Delta \dot{v}_{2} \\ \Delta \dot{v}_{s} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{3} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \omega_{r} \\ \Delta \delta \\ \Delta \psi_{fd} \\ \Delta v_{1} \\ \Delta v_{2} \\ \Delta v_{s} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{2H} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ \frac{K_{ssub}}{2H} \\ \frac{T_{1}}{T} \frac{K_{ssub}}{2H} \end{bmatrix} \Delta T_{m}$$
(32)

Donde, la matriz de estado A3, está dada por:

$$\begin{bmatrix} -\frac{K_{o}}{2H} & -\frac{K_{1}}{2H} & -\frac{K_{2}}{2H} & 0 & 0 & 0 \\ \omega_{o} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & a_{32} & a_{33} & a_{34} & 0 & a_{36} \\ 0 & \frac{K_{s}}{T_{g}} & \frac{K_{s}}{T_{g}} & -\frac{1}{T_{g}} & 0 & 0 \\ -\frac{K_{sr}K_{o}}{2H} & -\frac{K_{sr}K_{1}}{2H} & -\frac{K_{sr}K2}{2H} & 0 & -\frac{1}{T_{w}} & 0 \\ -\frac{T_{1}}{T_{2}}\frac{K_{sr}K_{o}}{2H} & -\frac{T_{1}}{T_{2}}\frac{K_{sr}K_{1}}{2H} & \frac{K_{sr}K_{2}}{2H} & 0 & a_{s6} & -\frac{1}{T_{2}} \end{bmatrix}$$





De la cual:

$$a_{34} = -\frac{\omega_0 R_{fd}}{L_{adu}} K_A$$

$$a_{36} = \frac{\omega_0 R_{fd}}{L_{adu}} K_A$$

$$a_{65} = -\frac{T_1}{T_2} \frac{1}{T_W} + \frac{1}{T_2}$$
(33)

Los componentes de la matriz de estado A3: a_{32} , a_{33} , son iguales a los expresados en Ec. (29). La Tabla IV contiene los datos de las constantes de tiempo de operación del PSS y el coeficiente de estabilidad.

Adicionalmente, a través de las funciones de Matlab, se modelan las ecuaciones en el espacio de estados para obtener los eigen-valores de las matrices de estado, así como las gráficas de las diferentes respuestas ante las condiciones dadas anteriormente.

III. RESULTADOS

El sistema de prueba y sus parámetros corresponden a los indicados en la Sección II. Sin embargo; la variable que define, al enlace de flujo inicial del entre-hierro Ψ_{at0} , fue sustituida por su valor perturbado de Ψ_{at} , la razón de este cambio, se destacó de las distintas pruebas realizadas. En donde, los resultados obtenidos utilizando Ψ_{at0} para el cálculo de las constantes K, no se encontraban dentro de lo descrito por [5]. El planteamiento propuesto en este trabajo permitió obtener resultados con mayor exactitud, comparado con lo descrito por [12], tal y como puede observarse en la Tabla V. Donde, los datos de la segunda columna de izquierda a derecha son los valores obtenidos en este trabajo, la columna siguiente son los valores proporcionados por [5] y la siguiente por [12]. Obsérvese que los valores de la columna 4, tienden a ser significativamente distintos en las constantes K_2 , K_4 y K_6 .

De los eigen-valores obtenidos obsérvese, que la parte real de las raíces complejas de λ , descritas en la Tabla VI, expresan los cambios en el índice de amortiguamiento conforme se van considerando los distintos elementos de control de la máquina síncrona y, cómo cada uno de estos elementos contribuyen en la respuesta dando diferentes modos oscilatorios (sostenidos, incrementados y amortiguados).

TABLA IVV. CONSTANTES DE TIEMPO Y GANANCIA DEL PSS.

<i>T</i> ₁	T_2	T_w	K_{ST}
0.1540 s	0.0330 s	1.40 s	9.5

TABLA V. TABLA COMPARATIVA DE LOS VALORES DE K.

	Rueda	P. Kundur	P. Cabrera
K_1	0.7642	0.7643	0.74
K_2	0.8651	0.8649	0.93
K_3	0.3231	0.3230	0.363
K_4	1.4189	1.4187	0.929
K_5	-0.14619	-0.1463	-0.14
K_6	0.4168	0.4168	0.709

TABLA VI. EIGEN-VALORES DE LOS MODELOS CALCULADOS.

Modelo	λ	Re	Img
Clásico	λ1	0.00	+6.3867i
	λ2	0.00	-6.3867i
	λ1	-0.11	+6.411i
Campo	λ2	-0.11	-6.411i
	λ3	-0.2042	0.000i
AVR	λ1	0.5034	+7.2329i
	λ2	0.5034	-7.2329i
	λ3	-31.0346	-0.000i
	λ4	-20.3964	+0.000i
PSS	λ1	-39.0696	+0.000i
	λ2	-1.0061	+6.6043i
	λ3	-1.0061	-6.6043i
	λ4	-0.7388	+0.000i
	λ5	-19.8104	+12.9092i
	λ6	-19.8104	-12.9092i

La Fig. 2, es la representación gráfica de las oscilaciones electromagnéticas dadas por estos valores. Valores que fueron obtenidos de las matrices de estado de Ec. (6), Ec. (7), Ec. (27) y Ec. (32). La respuesta en azul dada por la gráfica de la Fig. 2; muestra la representación del modo oscilatorio del modelo clásico. Su forma oscilatoria y sostenida, se debe principalmente a la falta de amortiguamiento, tal como lo expresa la parte real de λ_1 y λ_2 . La respuesta morada, representa el efecto que tiene el circuito de campo de la máquina síncrona, en presencia de esta falta de amortiguamiento. Donde, se observa, cómo tiende ligeramente a disminuir la amplitud de la oscilación. Obsérvese en la misma tabla, cómo sus raíces complejas muestran, que la aportación de amortiguamiento es muy pequeña para recuperar el estado estacionario. Por otra parte, la gráfica en rojo representa un aumento significativo en la amplitud de la oscilación, asociado por la influencia que tiene el sistema de excitación AVR sobre la máquina.

Este tipo de respuesta puede provocar la salida de una unidad o de un conjunto de unidades de generación, dado que, la parte real de las raíces complejas no solo disminuyeron en la contribución aportada por el circuito de campo, si no que, a su vez, aumento la inestabilidad en un valor positivo. Finalmente, la respuesta representada en color negro, nos indica, que la presencia del PSS tiene una contribución favorable debido a su alta ganancia. Los eigenvalores calculados para este caso, comprueban el efecto del PSS sobre el sistema en comparación con los anteriores, y demuestra su capacidad para mejorar la respuesta amortiguada de la máquina con el resto del sistema.



GRAFICA DE LAS RESPUESTAS CON KD =0

CLASIC EDCC YAVR
EDCC EDCC, AVR y PSS

6

6

0

2

4

6

8

0

0.5

1

1.5

2

2.5

3

3.5

4

4.5

5

Fig. 2. Gráfica de las respuestas oscilatorias.

IV. CONCLUSIONES

En este trabajo, se definieron, cuáles son los elementos, de las ecuaciones diferenciales, que se requieren de calcular con un valor de saturación incrementado, especificando todas estas variables con el subíndice (Inc). La denotación de dichos elementos permite realizar los cálculos de forma adecuada, de manera que; los parámetros que intervienen en la obtención de las constantes K sean los más preciso posibles, para obtener dichas constantes. Siendo de gran utilidad para el análisis a futuro de un sistema con parámetros diferentes. Adicionalmente, el análisis nos permitió representar de forma gráfica las respuestas que expresan los diferentes modos oscilatorios del sistema máquina-bus infinito, proporcionando una forma adicional de concebir los resultados del planteamiento matemático, dado que los autores con los cuales se basó este trabajo, para realizar las comparaciones necesarias, no proporcionan este tipo de gráficas. Sin embargo, las comparaciones matemáticas nos permiten visualizar que existe la posibilidad de obtener resultados imprecisos si no se toman en cuenta todas las características planteadas en la Sección II.

APENDICE

Desarrollo de las ecuaciones para determinar las constantes **K** con los parámetros de la sección II.

Para la saturación total:

$$\tilde{E}_a = 1 + (0.003 + j0.16)(0.9 - j0.3) = 1.0507 + j0.1431$$

Obteniendo $|E_a|$:

$$E_a = \sqrt{(1.0507)^2 + (0.1431)^2} = 1.06$$

Donde: $E_a = \Psi_{at}$

L. N. Rueda Can et al.: Determinación de los parámetros que intervienen en el análisis de estabilidad de pequeña señal de un sistema máquina-bus infinito

Para Ψ_l :

$$\Psi_I = 0.031e^{6.93(1.06-0.8)} = 0.1879$$

Sustituyendo ambos valores en la Ec. (10):

$$K_{sd(total)} = \frac{1.06}{1.06 + 0.1879} = 0.8494$$

Para las inductancias mutuas en los ejes d y q:

$$L_{ads} = 0.8494 * 1.65 = 1.4016$$

$$L_{aqs} = 0.8494 * 1.6 = 1.3591$$

Entonces, los enlaces de flujo iniciales de los ejes d y q:

$$\Psi_{ad0} = 1.4016(-0.8342 + 1.4511) = 0.8646$$

$$\Psi_{ag0} = -1.3591(0.4517) = -0.6139$$

Para la saturación incrementada:

$$K_{sd(inc)} = \frac{1}{1 + 6.93 * 0.031e^{6.93(1.06 - 0.8)}} = 0.4344$$

Para las inductancias mutuas con valor de saturación incrementado en los ejes d y q:

$$L_{ads(inc)} = 0.4344 * 1.65 = 0.7168$$

$$L_{aas(inc)} = 0.4344 * 1.60 = 0.6951$$

Para L'_{ads}:

$$L'_{ads} = \frac{1}{\frac{1}{0.7168} + \frac{1}{0.153}} = 0.1261$$

Sustituyendo los valores en las Ec. (8) y Ec. (9):

$$K_1 = 0.1267(0.8646 + 0.6951 * 0.8342) - 1.0435(-0.6139 + 0.1261 * 0.4517) = 0.7642$$

$$K_2 = 0.0018(0.8646 + 0.6951 * 0.8342) - 0.8804(-0.6139 + 0.1261 * 0.4517) + \frac{0.1261}{0.153} * 0.4517 = 0.8651$$

Para las Ec. (25) y Ec. (26):

$$K_{3} = -\frac{\frac{376.9911 * 0.00006}{1.65}}{\frac{376.9911 * 0.00006}{0.153} \left[1 - \frac{0.1261}{0.153} + 0.1261 * 0.8804\right]}{= 0.32319}$$

$$K_{4} = -\frac{\frac{376.9911 * 0.00006}{0.153} [1.0435 * 0.1261]}{\frac{376.9911 * 0.00006}{1.65}} = 1.4189$$



Para las Ec. (30) y Ec. (31):

$$\begin{aligned} \pmb{K_5} &= \frac{0.6837}{1} \big[-0.003*1.0435 + 0.16*0.1267 + 0.6951* \\ &0.1267 \big] + \frac{0.7298}{1} \big[-0.003*0.1267 - 0.16*1.0435 - \\ &0.1261*1.0435 \big] = -\textbf{0.14619} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \textit{K}_6 &= \frac{0.6837}{1} \big[-0.003*0.8804 + 0.16*0.0018 + 0.6951* \\ &0.0018 \big] + \frac{0.7298}{1} \bigg[-0.003*0.0018 - 0.16*0.8804 + \\ &0.1261 \bigg(\frac{1}{0.153} - 0.8804 \bigg) \bigg] = \textit{0.41682} \end{aligned}$$

AGRADECIMIENTOS

Al Consejo Nacional de Humanidades Ciencias y Tecnologías (CONAHCYT), por brindar la oportunidad de cursar los estudios de posgrado.

REFERENCIAS

- [1] J. M. Lozada López, "Sintonización de estabilizadores de sistemas de potencia (PSS) del S.N.I. ecuatoriano utilizando la metodología Mean-Variance Mapping Optimization (MVMO)", jun. 2016, Consultado: el 5 de septiembre de 2024. [En línea]. Disponible en: http://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/17193
- [2] S. Ghorai y S. Ray, "Revisiting small signal stability analysis techniques in the context of stability study of a two-area multimachine power system", en 2020 IEEE Calcutta Conference (CALCON), feb. 2020, pp. 493–496. doi: 10.1109/CALCON49167.2020.9106547.
- [3] J. A. Gándara-Capistrán y D. Olguín-Salinas, "Flujos óptimos de potencia con restricciones de estabilidad ante pequeños disturbios", *Científica*, vol. 26, núm. 1, pp. 1–12, jun. 2022, doi: 10.46842/ipn.cien.v26n1a10.
- [4] Z. Sun, Y. Cao, Z. Wen, Y. Song, y Z. Sun, "A Grey Wolf Optimizer algorithm based fuzzy logic power system stabilizer for single machine infinite bus system", *Energy Rep.*, vol. 9, pp. 847–853, sep. 2023, doi: 10.1016/j.egyr.2023.04.365.
- [5] P. S. Kundur y O. P. Malik, Power System Stability and Control, 2nd Edition. McGraw-Hill Education, 2022. Consultado: el 23 de agosto de 2024. [En línea]. Disponible en: https://www.accessengineeringlibrary.com/content/book/97812604735 44
- [6] A. Hammoudeh, M. I. Al Saaideh, E. A. Feilat, y H. Mubarak, "Estimation of Synchronizing and Damping Torque Coefficients Using Deep Learning", en 2019 IEEE Jordan International Joint Conference on Electrical Engineering and Information Technology (JEEIT), abr. 2019, pp. 488–493. doi: 10.1109/JEEIT.2019.8717432.
- [7] D. Mondal, A. Chakrabarti, y A. Sengupta, "Chapter 4 Small-Signal Stability Analysis in SMIB Power System", en *Power System Small Signal Stability Analysis and Control*, D. Mondal, A. Chakrabarti, y A. Sengupta, Eds., Boston: Academic Press, 2014, pp. 85–118. doi: 10.1016/B978-0-12-800572-9.00004-4.
- [8] H. Saadat, Power System Analysis. PSA Pub., 2010.
- [9] N. A. M. Kamari, I. Musirin, Z. A. Hamid, y M. H. M. Zaman, "Oscillatory Stability Prediction Using PSO Based Synchronizing and Damping Torque Coefficients", *Bull. Electr. Eng. Inform.*, vol. 7, núm. 3, Art. núm. 3, sep. 2018, doi: 10.11591/eei.v7i3.961.

- L. N. Rueda Can et al.: Determinación de los parámetros que intervienen en el análisis de estabilidad de pequeña señal de un sistema máquina-bus infinito
- [10] K. Sebaa, Y. Zhou, Y. Li, A. Gelen, y H. Nouri, "Low-frequency Oscillation Damping Control for Large-scale Power System with Simplified Virtual Synchronous Machine", J. Mod. Power Syst. Clean Energy, vol. 9, núm. 6, pp. 1424–1435, nov. 2021, doi: 10.35833/MPCE.2020.000340.
- [11] A. A. Sallam y O. P. Malik, "Power System Stability: Modelling, Analysis and Control", Art. núm. 10848, 2015, Consultado: el 5 de septiembre de 2024. [En línea]. Disponible en: https://digital.library.tu.ac.th/tu dc/frontend/Info/item/dc:10848
- [12] G. Palacios Cabrera, "Guía para modelado de estabilidad en sistemas de potencia", *Ing. Eléctrica*, ene. 2017, [En línea]. Disponible en: https://ciencia.lasalle.edu.co/ing_electrica/111
- [13]K. PRHABA, POWER SYSTEM STABILITY AND CONTROL. McGraw-Hill, 1994.
- [14] A. Kumar, "Damping Enhancement for SMIB Power System Equipped with Partial Feedback Linearization AVR", en 2018 20th National Power Systems Conference (NPSC), dic. 2018, pp. 1–6. doi: 10.1109/NPSC.2018.8771812.
- [15] A. Paul M. y F. A. A., "Control y estabilidad de sistemas de potencia | Libros electrónicos IEEE | Exploración de IEEE". Consultado: el 30 de junio de 2024. [En línea]. Disponible en: https://ieeexplore.ieee.org/book/5264012?bknumber=5264012
- [16] R. GRAHAM, POWER SYSTEM OSCILLATION. SPRINGER, 1999.
- [17]K. Ogata, Ingeniería de control moderna 5 ed. Pearson Educación, 2010.
- [18]P. Ledesma, "Análisis dinámico y control de sistemas eléctricos".

BIOGRAFÍAS



L. NARCISO RUEDA CAN. Nació en Chetumal, Quinta Roo, México. Se recibió de Ingeniero eléctrico en el Instituto Tecnológico de Chetumal en 2021, Actualmente, a través, del Consejo Nacional de Humanidades Ciencias y tecnologías (CONAHCYT), se encuentra cursando el 4° semestre de la maestría en ciencias en ingeniería eléctrica en el estado de Michoacán. Sus áreas de

interés son: estabilidad y protecciones de sistemas eléctricos de potencia, y la protección contra riesgos por descarga eléctrica.

- **F. CISNEROS TORRES.** Nació en Morelia, Michoacán, México. Se recibió cómo MSc. IPN-ESIME, México D.F, sus áreas de interés son, la estabilidad de sistemas eléctricos de potencia, coordinación de protecciones eléctricas.
- V. TORRES GARCIA. Nació en Morelia, Michoacán, México. Recibió los grados de maestría y doctorado en ingeniería eléctrica del Instituto Tecnológico de Morelia, en 2009 y 2015, respectivamente. Actualmente es profesor del Tecnológico de Morelia. Sus intereses de investigación incluyen sistemas de energía eléctrica, redes de distribución, armónicos, transitorios electromagnéticos y sistemas de energía.