



Análisis de estabilidad transitoria y de pequeña señal en un sistema multimáquina: caso de estudio

Transient and small signal stability analysis in a multimachine system: case of study

María Camila Reyes Caro¹ Paula Alejandra Córdoba Narváez² Edwin Rivas Trujillo³

Para citar este artículo: M. C. Reyes, P. A. Córdoba y E. Rivas, "Análisis de estabilidad transitoria y de pequeña señal en un sistema multimáquina: caso de estudio". *Revista Vínculos: Ciencia, Tecnología y Sociedad*, vol 15, n° 2, julio-diciembre 2018, 66-75. DOI: <https://doi.org/10.14483/2322939X.13685>.

Recibido: 20-07-2018 / Aprobado: 16-09-2018

Resumen

En este artículo se presenta el análisis de estabilidad transitoria y de pequeña señal para un sistema multimáquina. Se parte de los datos de la red propuesta por El-Abiad y Nagappan y los resultados del estudio de estabilidad transitoria obtenidos mediante el segundo método de Lyapunov, los cuales se comparan con la respuesta del sistema en DigSILENT PowerFactory 15.1; se ejecuta la función RMS/EMS *simulation* que permite definir las curvas $t-\delta$, perfiles de velocidad, tensión y frecuencia. Adicionalmente, se incluye el estudio de pequeña señal con la función *modal analysis* que tiene el fin de conocer el comportamiento del sistema ante pequeñas perturbaciones por medio del lugar geométrico de la raíz (LGR); este análisis permite una visión más amplia a los problemas de estabilidad para sistemas robustos que deben soportar fallas durante su operación o implementarse nuevas técnicas para la coordinación de protecciones.

Palabras clave: ángulo, estabilidad de pequeña señal, estabilidad transitoria, sistema multimáquina, tiempo crítico, valores propios.

Abstract

This document develops a transient stability and a small-signal analysis of a multi-machine system. Hence, the analysis uses the data proposed by El-Abiad and K. Nagappan, and the results from the transient stability study obtained by Lyapunov's second method; these studies were compared to the answers obtained from the DigSILENT PowerFactory 15.1 system. Therefore, the "RMS/EMS Simulation" function is implemented, allowing to define the $t-\delta$ curves, the speed profiles, the voltage and the frequency. In addition, the small-signal study is included with the "Modal Analysis" function that allows the visualization of the system responses to the smallest disruptions throughout the root locus analysis. Finally, this analysis allows to get a wider view to the stability problems established for robust systems that must support failures during the operation. Likewise, new techniques could be implemented to coordinate protections.

Keywords: angle of rotor, critical time, eigenvalues, multimachine system, small signal stability, transient stability.

1. Estudiante de Ingeniería Eléctrica, Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Bogotá. Correo electrónico: mcamilareyes@gmail.com
2. Estudiante de Ingeniería Eléctrica, Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Bogotá. Correo electrónico: paulacordoban@gmail.com
3. Doctorado en Ingeniería Eléctrica, Electrónica y Automática, Universidad Carlos III de Madrid. Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Colombia. Correo electrónico: edwinrivast@gmail.com

1. Introducción

Este documento centra su análisis en la estabilidad de ángulo, lo cual se entiende como la capacidad de las máquinas síncronas en un sistema interconectado de conservar el sincronismo después de estar sometidas a una perturbación; esto depende de la capacidad de cada máquina para restaurar y mantener el equilibrio entre el par electromagnético y el par mecánico [1], [2].

Para observar y determinar la estabilidad de un sistema interconectado se dispone de simuladores que cuentan con modelos y funciones robustas, los cuales ayudan a dar una visión bastante real del comportamiento de los sistemas actuales. El *software* DlgSILENT PowerFactory es una herramienta especializada en el análisis de sistemas eléctricos de potencia y está provista de varios módulos que permiten realizar estudios de flujos de carga, cortocircuito, estabilidad, despacho económico, entre otros [3].

Se presenta como caso de estudio el análisis de estabilidad transitoria mediante el segundo método de Lyapunov de un sistema multimáquina planteado por [4]. Este método determina la región de estabilidad asintótica del sistema en posfalla, implementando un algoritmo que determina las condiciones iniciales

del sistema, las asíntotas estables o inestables y el tiempo de conmutación crítico, siendo este método poco exacto dado que predice el comportamiento del sistema de forma parcial pero no arroja curvas de oscilación completas para cada una de las máquinas. De acuerdo con lo anterior, utilizando el *software* DlgSILENT PowerFactory 15.1 se busca obtener el comportamiento real durante un periodo de tiempo determinado del sistema; los resultados obtenidos se comparan con los propuestos en [4] para observar similitudes y diferencias entre un algoritmo y un *software* con modelos y funciones aproximadas al comportamiento real de un sistema eléctrico de potencia.

1.1. Estabilidad en sistemas de potencia

Los sistemas eléctricos de potencia son estables cuando las variables eléctricas se encuentran dentro de un rango establecido en el transcurso del tiempo, también si al presentar una contingencia el sistema es capaz de volver a un estado de equilibrio que garantice su continuidad; lo anterior implica que todas las máquinas permanezcan en sincronismo unas con otras [5], [6]. De forma general, la estabilidad de un sistema eléctrico de potencia (SEP) se puede clasificar de acuerdo con lo planteado en la

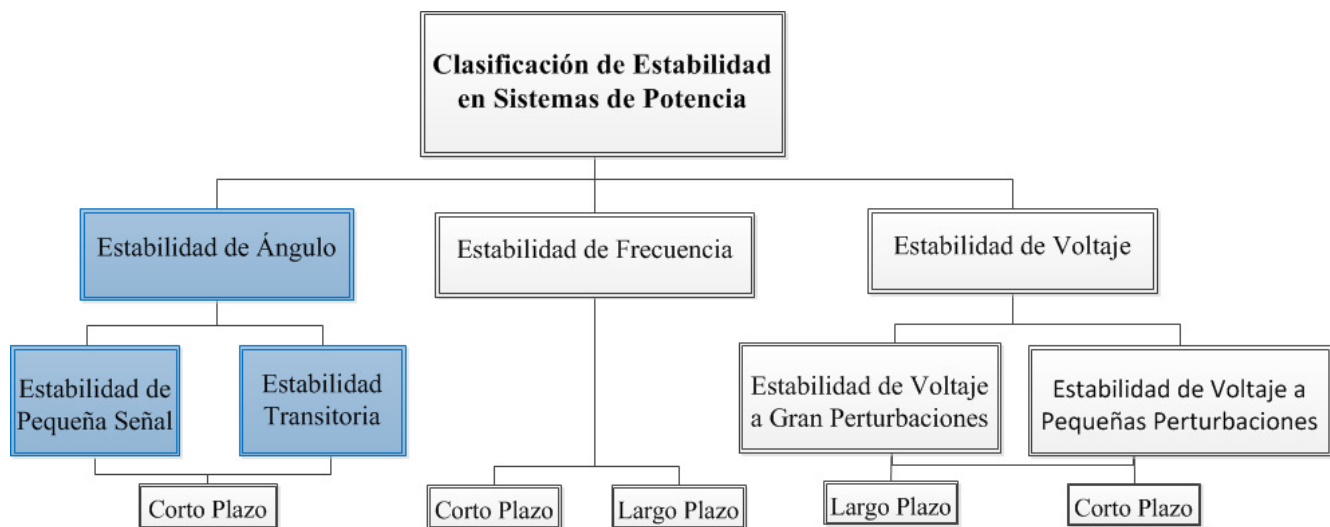


Figura 1. Clasificación de estabilidad de sistemas de potencia.

Fuente: [5].

Figura 1, donde la estabilidad de ángulo relaciona el sincronismo en las máquinas, la estabilidad de tensión, el colapso de voltaje y la estabilidad de frecuencia, las variaciones en magnitud y forma de onda de esta [7], [8].

Para determinar el tipo de fallos que implican directamente en este tema, se clasifica la estabilidad angular en dos categorías: en primer lugar, la estabilidad transitoria que involucra perturbaciones transitorias severas del sistema como fallas en líneas, salidas de circuitos, etc., las cuales se analizan durante un tiempo amplio, es decir, desde los tres segundos hasta los diez o veinte segundos, dependiendo de las condiciones iniciales del sistema [9], [10]; en segundo lugar, la estabilidad de pequeña señal, la cual involucra pequeñas variaciones de carga y de generación en el sistema, estas perturbaciones son lo suficientemente pequeñas como para linealizar las ecuaciones del sistema y poder analizar la respuesta de este ante pequeños fallos [5], [11], [12].

2. Metodología

La Figura 2 muestra el diagrama unifilar del caso de estudio conformado por seis buses, cuatro generadores, tres cargas y las líneas de transmisión asociadas. La topología del sistema de potencia y los datos de referencia se toman del artículo de investigación “Transient Stability Regions of Multi-machine Power Systems” desarrollado en febrero de 1966 por El-Abiad y Nagappan [4].

La Tabla 1 muestra los valores de la constante de inercia H para cada una de las máquinas.

Tabla 1. Constantes de inercia máquinas síncronas.

Máquina	Bus	H(s)
10	1	9,9936
7	2	1,498
8	3	2,997
9	4	2

Fuente: elaboración propia.

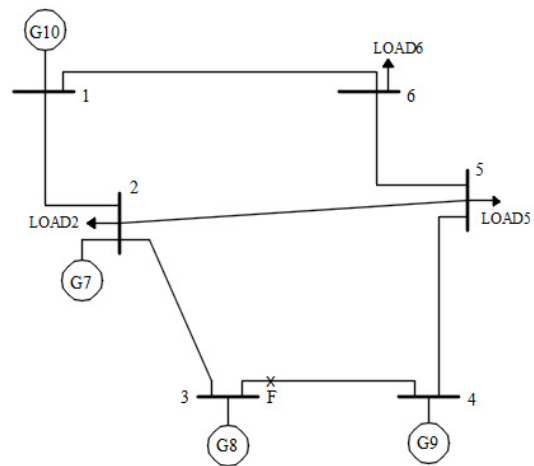


Figura 2. Diagrama unifilar del caso de estudio [4].

2.1. Consideraciones de simulación

Para el desarrollo de la simulación del caso de estudio, se tienen en cuenta las siguientes consideraciones:

- La tensión base, potencia e impedancia base del sistema serán 100kV 100MVA, 100Ω respectivamente.
- Se dispone la máquina diez del nodo uno como referencia o slack.
- La potencia de entrada para todas las máquinas del sistema permanece constante durante todo el periodo transitorio, por tal razón, las curvas de demanda diaria son despreciadas.
- Para la ejecución de las funciones RMS simulation y modal analysis se evalúa un sistema balaceado o equilibrado y supone $X_d < X_q$.
- Se considera la constante de amortiguamiento planteada en [4].
- Para el análisis de estabilidad se debe evaluar una perturbación donde se den las corrientes de falla más elevadas.
- Se asume 1 km de longitud para cada línea del sistema. El punto de falla F se sitúa a 0,15km del generador ocho.
- Las reactancias de fuga del estator y rotor, x_l y x_{rl} respectivamente no se tienen en cuenta, es decir, su valor se asume como cero.

- Se desprecia el ruido evitando la distorsión en la calidad de las señales, lo cual facilitando su interpretación.

2.2. Modelo de máquina síncrona

Una máquina síncrona puede ser modelada por una fuente de voltaje equivalente detrás de la reactancia síncrona. En la Figura 3 se muestra el concepto básico de una máquina síncrona modelada para el análisis del flujo de carga en el software DigSILENT Power Factory versión 15.1.

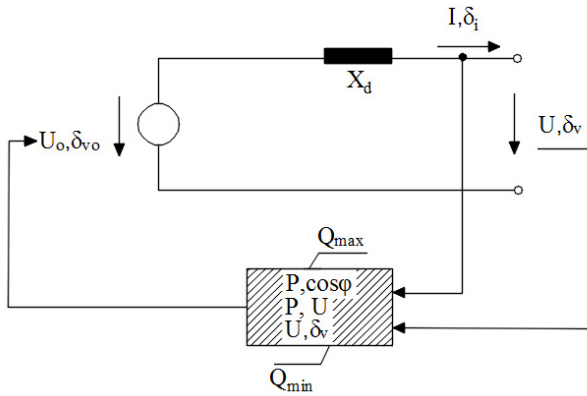


Figura 3. Modelo máquina síncrona en el Software DigSILENT Power Factory [13].

Es importante realizar el flujo de carga para el caso de estudio, dado que la función *RMS/EMS simulation* modela un flujo inercial que depende de las constantes eléctricas y mecánicas previamente definidas en cada una de las máquinas.

Con base en el modelo de la máquina síncrona y considerando la ecuación de oscilación (1) para sistemas eléctricos de potencia se tiene:

$$\frac{H}{\pi f_0} \frac{d^2 \delta}{dt^2} = P_m - P_e - P_D \quad (1)$$

La Figura 4 muestra el diagrama de bloques según la ecuación (1), donde se evidencia que el comportamiento general del sistema está asociado principalmente a la constante de inercia de cada una de las máquinas [14].

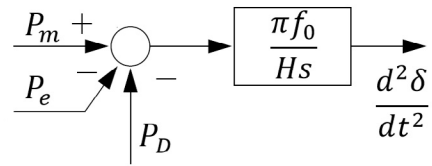


Figura 4. Diagrama de bloques para la ecuación de oscilación.

Fuente: elaboración propia.

2.3. Función *RMS/EMS simulation*

La Figura 5 muestra el modelo equivalente de una máquina síncrona de rotor bobinado para el estudio de estabilidad transitoria, cada una de las resistencias y reactancias se relacionan en la Tabla 2 y deben ser consideradas para efecto de simulación y cálculo de condiciones iniciales del sistema.

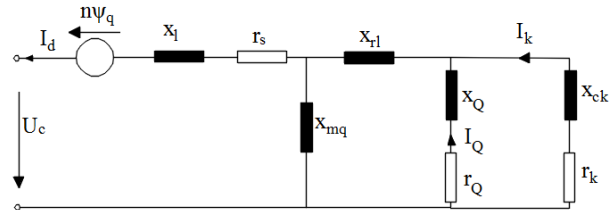


Figura 5. Modelo equivalente máquina síncrona para función *RMS/EMS simulation* [13].

Tabla 2. Parámetros máquina síncrona de rotor bobinado [13].

Parámetro	Parámetro Power factory	Descripción
R _s	Rstr	Resistencia del estator en pu
X _l	Xl	Reactancia de fuga del estator en pu
X _{r1}	Xr1	Reactancia de fuga del rotor en pu
x _d , x _q	x _d , x _q	Reactancia síncrona (eje d y q) en pu
x _d ' , x _q '	x _{ds} , X _{QS}	Reactancia transitoria (eje d y q) pu
x _d "x _q "	XDSS, x _{qss}	Reactancia subtransitoria (eje d y q)
T _d ' , T _q '	T _{ds} , T _{qs}	Constante de tiempo transitorio (cortocircuito) seg.
T _d "T _q "	TDSS, T _{qss}	Constante de tiempo de subtransitorio (cortocircuito) seg.

2.4. Funciones de simulación

2.4.1. RMS/EMS simulation

Esta función cuenta con tres modos de simulación [15]:

- Utiliza un modelo de red simétrica de estado estacionario (RMS, por sus siglas en inglés) para mediano plazo y transitorios a largo plazo bajo condiciones de red balanceadas.
- Un modelo de red trifásico de estado estacionario (RMS) para transitorios de mediano y largo plazo en condiciones de red equilibrada y desequilibrada, es decir, para analizar el comportamiento dinámico ante fallas asimétricas.
- Un modelo de red dinámica para transitorios electromecánicos en condiciones de red equilibrada y desequilibrada para el análisis de corto plazo.

2.4.2. Modal analysis

El cálculo de auto valores es una de las herramientas más poderosas para los estudios de estabilidad de pequeña señal. Se recomienda calcular primero los modos de oscilación del sistema (natural) cuando todos los modelos de controlador y planta de energía están desactivados, por lo que cada máquina síncrona tendrá potencia de turbina constante y excitación constante; en segunda instancia, se determina la ganancia, constantes de tiempo, etc., para los controladores. Una vez las condiciones iniciales hayan sido calculadas, todas las derivadas temporales del estado de las variables deben ser cero (el sistema está en estado estable). El modelo de simulación para las funciones *RMS simulation* y *modal analysis* es el mismo, excepto para el modelo de carga general [15].

3. Resultados y análisis de estabilidad transitoria

Los resultados obtenidos para estabilidad transitoria consideran una distancia de falla de 0,15 km en la

línea 3-4 (punto *F*, Figura 2). Es importante resaltar que el método de Lyapunov utilizado por El-Abiad y Nagappan para el análisis de estabilidad transitoria desprecia la ubicación de falla, siendo esta una de las razones por las cuales el método determina regiones asintóticas de estabilidad.

Para el estudio de estabilidad transitoria se utiliza la función *RMS/EMS simulation* de DlgSILENT Power Factory 15.1, es necesario determinar el flujo de carga del sistema para su correcta ejecución. Los resultados se muestran en la Tabla 3.

Tabla 3. Resultados flujo de carga en condiciones de prefalla

Bus	V	δ	Carga		Generación	
			MW	MVAR	MW	MVAR
No.	Mag	Grados				
1	1,000	0,00	0,0	0,0	33,20	9,2
2	1,002	-0,1	20,0	10,0	10,00	4,7
3	1,084	4,6	0,0	0,0	30,00	20,3
4	1,025	1,4	10,0	0,0	20,00	9,9
5	0,955	-2,8	40,0	15,0	0,00	0,0
6	0,953	-2,30	30,0	10,0	0,00	0,0

Fuente: elaboración propia.

3.1. Análisis de gráficas

3.1.1. Caso estable según tiempo de despeje de falla

Para un tiempo de 0,4244 s se muestra el comportamiento del sistema tras ocurrir la perturbación (Figuras 6, Figura 7, Figura 8 y Figura 9). En la Figura 6 se observan las curvas de oscilación de ángulo de rotor de los generadores; la máquina ocho presenta un ángulo máximo de 94,71°, lo cual representa que la potencia acelerante es igual a la potencia desacelerante, evitando la pérdida de sincronismo. Al superarse la falla, la velocidad oscila tendiendo a recuperar su valor de referencia (Figura 7), confirmando la estabilidad del sistema con los perfiles de tensión y frecuencia que se muestran en la Figuras 8 y la Figura 9. Si el tiempo de despeje de falla disminuye la recuperación de sincronismo en los generadores es más rápido.

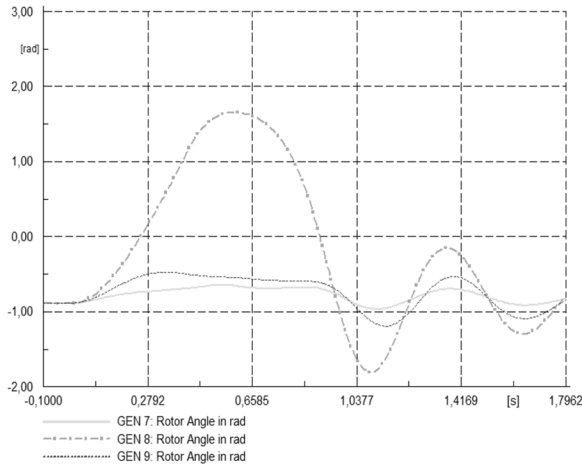


Figura 6. Ángulo de rotor en $t=0,4244s$.

Fuente: elaboración propia.

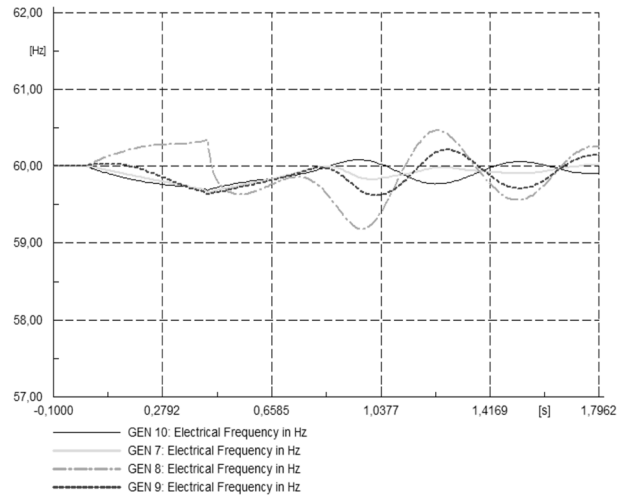


Figura 9. Perfil de frecuencia en $t=0,4244s$.

Fuente: elaboración propia.

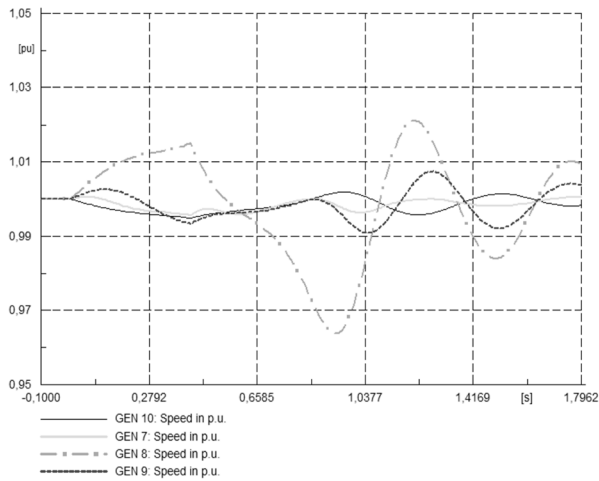


Figura 7. Velocidad en $t=0,4244s$.

Fuente: elaboración propia.

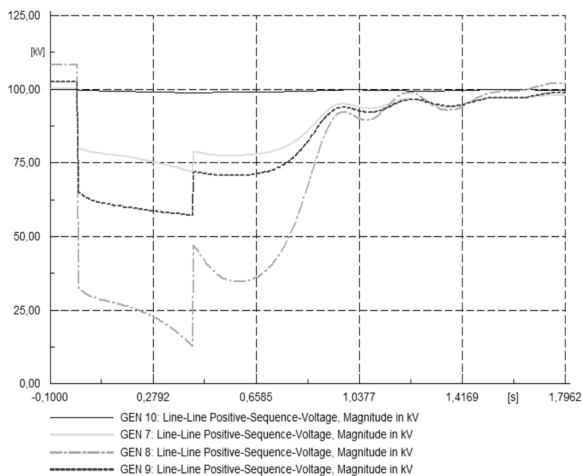


Figura 8. Perfil de tensión en $t=0,4244s$.

Fuente: elaboración propia.

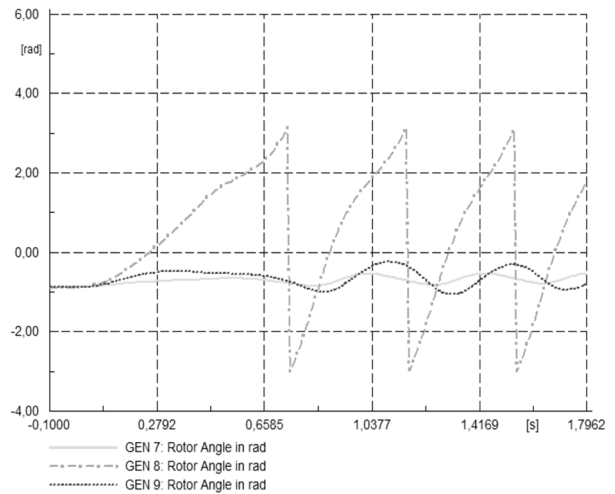


Figura 10. Ángulo rotor en $t=0,4377s$.

Fuente: elaboración propia.

3.1.2. Caso inestable para un tiempo de 0,4377

Para un tiempo de 0,4377 s se muestra el comportamiento del sistema tras ocurrir la perturbación (Figura 10, Figura 11, Figura 12 y Figura 13). La máquina ocho pierde sincronismo superando los tres radianes ($171,887^\circ$). El generador no puede contrarrestar el efecto de la falla dado que la potencia acelerante es mayor que la potencia desacelerante (Figura 10); se presenta un aumento sucesivo de velocidad (Figura 11) y una distorsión en el perfil de tensión y frecuencia (Figura 12 y Figura 13).

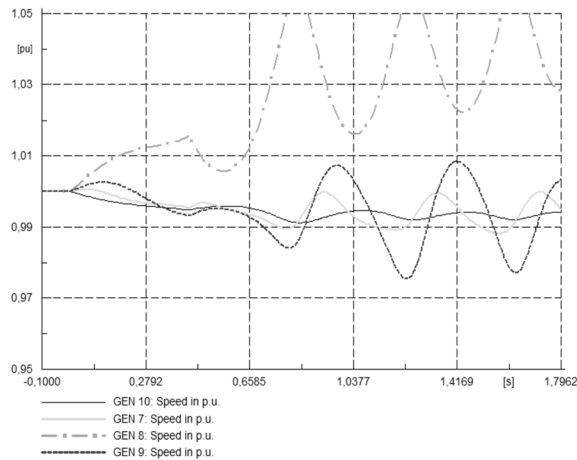


Figura 11. Velocidad en $t=0,4377s$.

Fuente: elaboración propia.

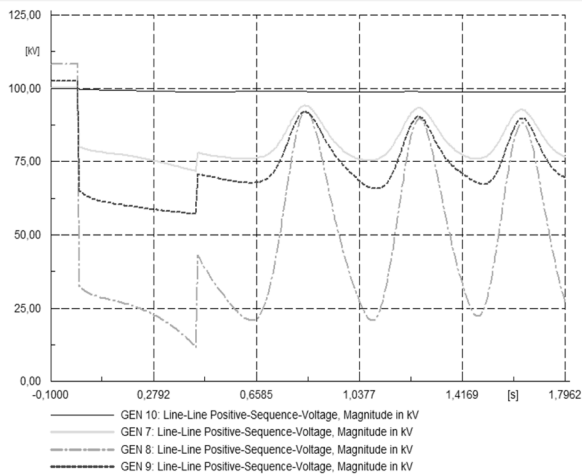


Figura 12. Perfil de tensión en $t=0,4377s$.

Fuente: elaboración propia.

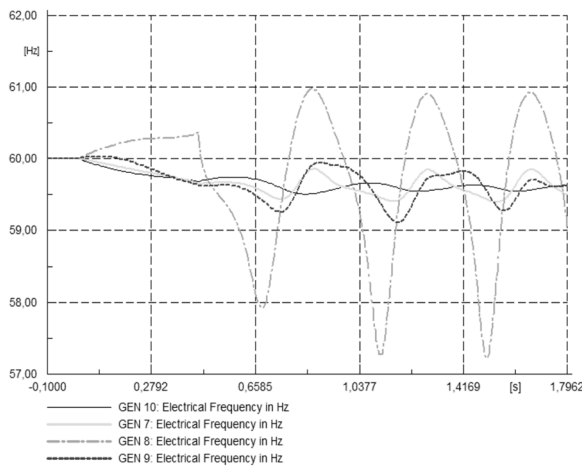


Figura 13. Perfil de frecuencia en $t=0,4377s$.

Fuente: elaboración propia.

3.2. Discusión de resultados

En la Figura 14 y la Figura 15 se presenta el caso estable e inestable planteado por El-Abiad y Nagappan [4] y en la Figuras 6 y la Figura 10 las desarrolladas por los autores en DlgSILENT Power Factory 15.1. Para el caso estable (Figura 14 y Figura 6) el ángulo máximo del rotor del generador ocho es de 2,4097 rad y 2,493 rad respectivamente, con un porcentaje de error de 0,3244%. Para las máquinas siete y nueve el comportamiento general de la onda es similar, cabe anotar que en el segundo método de Lyapunov se grafica desde cero y en PowerFactory a partir de menos uno, esto no afectan la estabilidad del sistema. Para el caso inestable (Figura 15 y Figura 10), se sobrepasa el ángulo máximo de oscilación o tiempo máximo de despeje de la falla. El ángulo máximo es de 3,06 rad y 3,0641 rad, respectivamente, con un porcentaje de error de 0,41%.

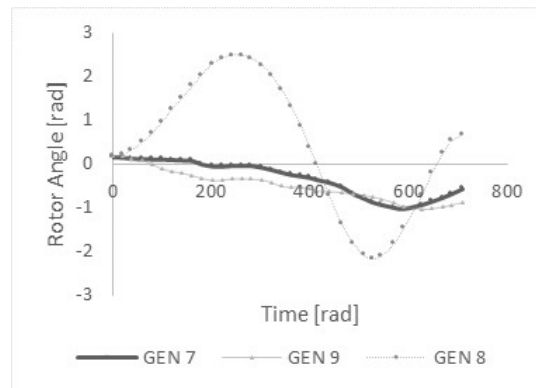


Figura 14. Ángulo rotor at $t = 0,4244 s$ [4].

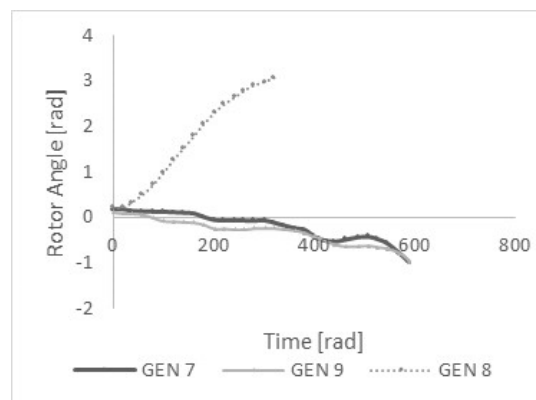


Figura 15. Ángulo rotor at $t = 0,4377s$ [4].

3.3. Variaciones de inercia y el tiempo crítico de despeje de falla

La constante de inercia H es una propiedad mecánica de las máquinas que representa su rigidez al incrementar su potencia y se define en un intervalo de uno a diez segundos. En el caso de estudio, el nodo *slack* tiene una constante de inercia de 9,9 s, valor que permite tener un tiempo de despeje de falla alto (0,4244 s), por lo cual se propone realizar variaciones en la inercia del nodo *slack* para determinar el comportamiento del tiempo de despeje de falla cuando el sistema es estable e inestable. La Tabla 4 presenta los valores de la constante de inercia utilizados y sus respectivos tiempos de despeje; los resultados confirman que al disminuir el valor de la constante de inercia el tiempo de despeje de falla será menor comparado con lo propuesto en [4] de acuerdo con la ecuación (1).

Tabla 4. Tiempo de despeje estable e inestable según su variación de inercia.

Constante de inercia H [s]	Tiempo de despeje de falla caso Estable	Tiempo de despeje de falla caso Inestable
1	0,306 s	0,311 s
3	0,358 s	0,3599 s
5	0,386 s	0,396 s
7	0,399 s	0,409 s

Fuente: elaboración propia.

4. Resultados y análisis de estabilidad de pequeña señal

4.1. Análisis de gráficas

Para el estudio de estabilidad de pequeña señal con la función *modal analysis*, se obtienen los valores propios a través de la función de transferencia planteada en el diagrama de bloques de la Figura 4, la cual depende directamente de la constante de inercia, potencia mecánica, potencia eléctrica, potencia de amortiguamiento, de acuerdo con los parámetros establecidos en cada máquina.

La Figura 15 muestra los resultados de los valores del sistema en prefalla, estos se encuentran en el semiplano izquierdo y la parte imaginaria tiende a cero, son polos de primer orden que corresponden a un sistema sobreamortiguado. La Tabla 5 relaciona los resultados de la Figura 16.

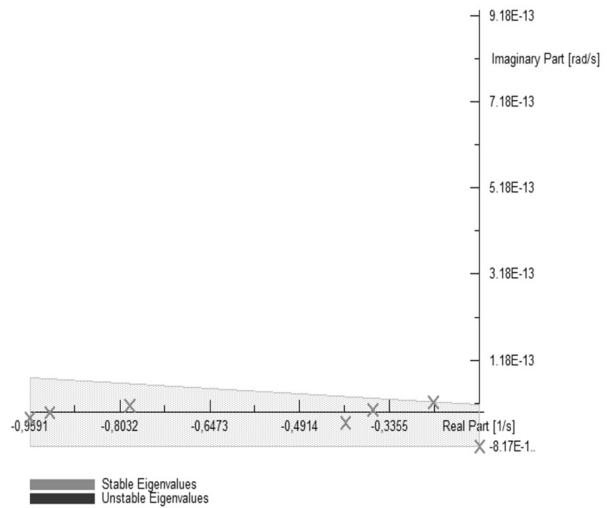


Figura 16. Valores propios del sistema en prefalla.

Fuente: elaboración propia.

Tabla 5. Valores propios del sistema en prefalla.

Valores propios	Parte Real [1/s]
1	-0,78570
2	-0,95914
3	-0,92457
4	-0,17960
5	-0,25917
6	-0,41104
7	-0,36430

Fuente: elaboración propia.

La Figura 17 muestra los resultados de los valores propios en post falla. A pesar de la perturbación el sistema sigue teniendo valores reales negativos, esto indica que el comportamiento del ángulo del rotor corresponde a un sistema sobre amortiguado, evidenciando la estabilidad en el sistema bajo pequeñas perturbaciones. La Tabla 6 consigna el resultado de los valores propios en posfalla.

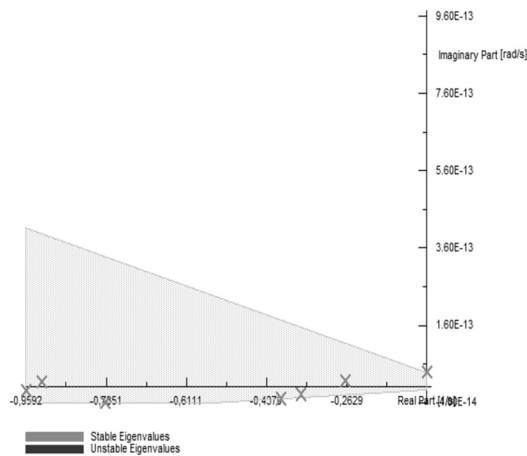


Figura 17. Valores propios del sistema en posfalla.

Fuente: elaboración propia.

Tabla 6. Valores propios del sistema en posfalla.

Valores propios	Parte Real [1/s]
1	-0,08886
2	-0,26538
3	-0,36275
4	-0,40591
5	-0,78644
6	-0,92465
7	-0,95919

Fuente: elaboración propia.

4.2. Valores propios de acuerdo a las variaciones de inercia

Dadas las variaciones de la constante de inercia realizadas en el apartado anterior, se realiza el análisis de pequeña señal para cada variación de inercia. Los resultados de la Tabla 7 muestran que el sistema tiene un comportamiento estable dado que los valores propios se encuentran en el semiplano izquierdo.

Tabla 7. Valores propios del sistema según su variación de inercia.

Valores Propios	$H = 1s$	$H = 3s$	$H = 5s$	$H = 7s$
1	-1,248	-1,265+0,099i	-0,275	-0,959
2	-0,789	-0,7899	-0,356	-0,923
3	-0,959	-0,9598	-0,390	-0,768+0,024i
4	-0,925	-0,924	-0,794	-0,768-0,024i
5	-0,274	-0,392	-0,952+0,0155i	-0,387
6	-0,394	-0,357	-0,952-0,0155i	-0,353
7	-0,358	-0,274	-0,939	-0,276

Fuente: elaboración propia.

5. Conclusiones

Los resultados permiten establecer que el modelo utilizado por el segundo método de Lyapunov no tiene en cuenta la distancia a la cual ocurre la falla, dado que si la falla se encuentra a una distancia mayor a la establecida en las consideraciones, el comportamiento transitorio del sistema es más lento y el tiempo de despeje de falla aumenta considerablemente. El análisis propuesto se lleva a cabo teniendo en cuenta las condiciones de simulación específicas para el caso de estudio.

El análisis de estabilidad transitoria logra corroborar lo establecido por El-Abiad y Nagappan, pues para un tiempo de despeje de falla de 0,4244 s el caso de estudio tiene un comportamiento estable, es decir, las máquinas recuperan sincronismo al igualar su potencia acelerante con la potencia desacelerante, teniendo una discrepancia de 0,3244%. Sin embargo, para un tiempo de 0,4377 s el sistema no logra estabilizarse, la potencia desacelerante no es suficiente para contrarrestar la energía acelerante de la máquina, ocasionando la pérdida de sincronismo en el generador ocho, por lo cual se obtiene un error de 0,41% comparado con el método de Lyapunov usado por los autores de referencia. Es importante resaltar que la diferencia en los resultados se debe a que el modelo de la máquina síncrona de DIGSI-LENT PowerFactory 15.1 tiene en cuenta parámetros mecánicos, eléctricos y características de la falla que no son considerados por el segundo método de Lyapunov, debido a que es asintótico y determina la estabilidad del sistema evaluando condiciones iniciales en posfalla.

Para un estudio de estabilidad de ángulo completo se recomienda realizar un análisis de pequeña señal, dado que tiene en cuenta condiciones que en estabilidad transitoria no se consideran como los modos de oscilación y el lugar geométrico de la raíz. Para el estudio de caso, realizar este análisis no es significativo dado que la red no se ve afectada por pequeñas perturbaciones.

Los resultados permitieron verificar que al disminuir la constante de inercia en el nodo compensador el tiempo crítico de despeje de falla es menor, ocasionado que la perturbación afecte en mayor magnitud al sistema y se reduzca la robustez de la red.

Referencias

- [1] Universidad de Sevilla, “Estabilidad Transitoria en el SIN”. [En línea] Disponible en: <http://bibling.us.es/proyectos/abreproy/70611/hero/08+-C5+Estabilidad+transitoria+en+el+SIN.pdf>
- [2] P. Kundur et al., “Definition and classification of power system stability”, *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 19, n° 2, pp. 1387-1401, 2004.
- [3] C. Wladimir y A. Cárdenas, “Estudios Eléctricos De Sistemas De Potencia para la carrera de Ingeniería Eléctrica utilizando el Software Power Factory 13.1 de Digsilent”, Tesis de grado, Escuela Politécnica Nacional, Quito, 2008.
- [4] A. El-abiad y K. Nagappan, “Transient Stability Regions of Multimachine Power Systems”, *IEEE Transactions Power Appar Systems*, vol. 85, n° 2, pp. 169–179, 1966, <https://doi.org/10.1109/TPAS.1966.291554>
- [5] O. Díaz, “Análisis del amortiguamiento de oscilaciones de baja frecuencia para un sistema de potencia multimáquina”, Tesis de maestría, Facultad de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y Computación, Universidad Nacional de Colombia, Manizales, 2006.
- [6] F. D. Rinaudo y L. M. Aromataris, “Impacto de la generación eólica en estabilidad transitoria de sistemas eléctricos de potencia,” in IEEE Biennial Congress of Argentina (ARGENCON), Bariloche, junio, 2014.
- [7] H. B. Flores, “Desarrollo de una metodología multimáquina para la ubicación y sintonización de estabilizadores de sistemas de potencia de forma automática”, Tesis maestría, Escuela Politécnica Nacional, Quito, 2016.
- [8] E. Vittal, M. O’Malley y A. Keane, “Rotor angle stability with high penetrations of wind generation”, *IEEE Transactions Power Appar Systems*, vol. 27, n° 1, 2012, <https://doi.org/10.1109/PESGM.2012.6345466>
- [9] N. Kakimoto y M. Hayashi, “Transient stability analysis of multimachine power system by Lyapunov’s direct method,” in IEEE Conference on Decision and Control including the Symposium on Adaptive Processes, San Diego, december, 1981, <https://doi.org/10.1109/CDC.1981.269567>
- [10] J. R. Weiss, “Transient asymptotic stability of power systems as established with Lyapunov functions,” *IEEE Transactions Power Appar Systems*, vol. 95, n° 4, pp. 1480–1486, 1976, <https://doi.org/10.1109/T-PAS.1976.32244>
- [11] D. Lastomo et al., “The effects of energy storages on small signal stability of a power system”, in International Seminar on Intelligent Technology and Its Applications (ISITIA), Surabaya, august, 2017, <https://doi.org/10.1109/ISITIA.2017.8124054>
- [12] A. Gabriel, I. Flores, I. Escuela, y P. Nacional, “Estudio de Estabilidad de Pequeña Señal en el Sistema Nacional Interconectado aplicando el Método de Análisis Modal”, *XIX Jornadas en Ingeniería Eléctrica y Electrónica*, vol. 192, n° 19, 2005.
- [13] D. Powerfactory, “DigSILENT PowerFactory technical reference documentation synchronous machine”, Germany: DigSILENT GmbH, 2015.
- [14] P. Ledesma, “Regulación de frecuencia y potencia”. [En línea] Disponible en: http://ocw.uc3m.es/ingenieria-electrica/operacion-y-control-de-sistemas-electricos/II_OCSE_RFP.pdf
- [15] U. Manual, “PowerFactory 15. tutorial”. Germany: DigSILENT GmbH Heinrich-Hertz-Straße 9, Gomaringen, 2013.

