

ANÁLISIS DEL EJEMPLO DE REGIONES DE ESTABILIDAD TRANSITORIA DE SISTEMAS DE POTENCIA MULTIMAQUINAS

ANALYSIS OF THE EXAMPLE OF TRANSIENT STABILITY REGIONS OF MULTI-MACHINES

EDWIN RIVAS TRUJILLO
NELSON ENRIQUE VERA PARRA
LUIS ALEJANDRO ARIAS BARRAGÁN

Resumen

En el presente artículo se simula mediante el software Matlab un caso de estudio de estabilidad transitoria planteado por H. A. El-Abiad, et al en 1996. Se realizan simulaciones del comportamiento del sistema antes, durante y después de falla, obteniéndose las curvas de oscilación. Se describe el método de Liapanuv con el cual se puede establecer la región de estabilidad asintótica.

Palabras clave: Curvas de oscilación, Falla, Estabilidad.

Abstract

In the present paper, a case of a transient stability study proposed by El-Abiad in 1996 is simulated using the Matlab software. Simulations of the system behavior are performed before, during and after failure, obtaining the oscillation curves. The Liapanuv method with which the region of asymptotic stability can be established is described.

Key words: Oscillation Curves, Fault, Stability.

Introducción

La estabilidad de un sistema de potencia es la condición que permite mantenerse en un estado de operación equilibrado en condiciones normales o cuando se presenta un disturbio o falla. La estabilidad es principalmente influenciada por la dinámica de los ángulos de los rotores y las relaciones potencia ángulo, con el fin de determinar las curvas de oscilación que permiten determinar la estabilidad del sistema.

Es importante definir un método que permita deducir el comportamiento dinámico del sistema no lineal. El matemático Ruso Alexander Mikkhailovich Lyapunov definió dos métodos para el análisis de estabilidad: El primer método se determina la estabilidad local alrededor de un punto de equilibrio, denominado método de linealización y el segundo método determina las propiedades de estabilidad de un sistema no lineal, restringido a dinámicas locales, para ello utiliza una función escalar de energía asociada.

El método directo de Lyapunov tiene en cuenta que la energía total de un sistema disipada continuamente, hace que el sistema converja a un punto de equilibrio. La estabilidad en este punto de equilibrio es más importante que la estabilidad local de un sistema.

A. Aplicación del segundo método de Liapunov

Para aplicar el segundo método de Lyapunov se debe tener en cuenta las tres etapas dentro de las cuales se tendrá el punto de equilibrio del sistema de potencia analizar.

- 1) Antes de que ocurra la falla o prefalla.
- 2) Durante la falla
- 3) Después de eliminar la falla.

El sistema se puede describir de acuerdo a la

ecuación 1.

$$(Mi) \left(\frac{d^2\delta_i}{d\tau^2} \right) + (Di) \left(\frac{d\delta_i}{d\tau} \right) + [fi(\delta_1, \delta_2, \dots, \delta_n)] = (Pmi) \tag{1}$$

Donde (Mi) es la diagonal de la matriz (nxn) que representa las constantes del momento efectivo de las n máquinas rotativas.

(Mi) = 4πfHi pu radianes² de potencia por radianes eléctricos.

(Hi) = constante de inercia en pu de la segunda potencia.

(Di) = la diagonal de la matriz (nxn) que representa el coeficiente de amortiguamiento de n maquinas rotativas.

Di = 2πfdi pu radianes de potencia por radianes eléctricos.

di = Coeficiente de amortiguamiento de la segunda potencia.

Pmi = Potencia mecánica de entrada en la máquina ith

La potencia mecánica de entrada puede ser constante o variable; para los estudios de estabilidad transitoria se asume constante.

τ = Tiempo en radianes (τ = 2π ft)

$$fi(\delta_1, \delta_1, \dots, \delta_n) = E_i^2 G_{ii} + \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n E_i E_j Y_{ij} \cos[\theta_{ij} - (\delta_i - \delta_j)] \tag{2}$$

fi(δ₁, δ₁, ... δ_n) = Ecuaciones de potencia eléctrica.

E_i∠δ_i = Fasor de voltaje interna de la máquina ith

Y_{ij}∠θ_{ij} = G_{ij} + jB_{ij} Admitancia de transferencia de cortocircuito entre las maquinas ith y jth.

Estos parámetros antes de la falla son diferentes que después de la falla. La expresión $f_i(\delta_1, \delta_1, \dots, \delta_n)$ denota la potencia eléctrica de la máquina i^{th} y $f_i^*(\delta_1, \delta_1, \dots, \delta_n)$ denota la potencia durante la falla.

Se debe notar cual sistema es estable o no después de eliminar la perturbación. Para ello el estado estable del sistema después de la falla se obtiene con la solución de la ecuación de potencia

$$f_i(\delta_1, \delta_1, \dots, \delta_n) = P_{mi}; i = 1, 2, \dots, n. \quad (3)$$

Este estado estable se prueba para la estabilidad y la región de estabilidad asintótica por el segundo método de Liapunov, en el que se establece una función de Liapunov escalar adecuada y se da el establecimiento de la región de estabilidad asintótica. Para la solución del sistema de estudio se construye una función adecuada que cumple con las siguientes condiciones:

- 1) La función de Liapunov V deberá ser una función escalar continua de variables de estado.
- 2) La primera derivada parcial, con respecto a las variables de estado, debe existir y ser continua en una región Ω , excepto el estado de equilibrio se desvanece.
- 3) Su valor en el estado de equilibrio debe ser cero y $V > 0$ entre la región Ω .
- 4) Su derivada debe ser negativa para las variables de estado en Ω , excepto en el estado de equilibrio donde se desvanece.
- 5) Ω es una región acotada designada por $V < b$ ($b > 0$)
- 6) En la región Ω , el estado de equilibrio es el mayor conjunto invariante M donde $V = 0$.

Cada trayectoria del sistema que parte de Ω tiende a M , el estado de equilibrio, así, el tiempo t , tiende a infinito y es asintóticamente estable.

El valor de b depende de los parámetros del sistema y de la naturaleza del transitorio, en cada caso el valor de b proporciona un índice de la región de estabilidad.

El procedimiento para establecer la región de estabilidad y determinar el tiempo crítico se da a partir de estos principales pasos:

Paso 1. Flujo de carga para el sistema en pre-falla

Paso 2. Determinar el punto de conducción y la transferencia de admitancias entre los buses internos de las máquinas para la falla y el sistema pos-falla.

Paso 3. Determinar el estado estable de equilibrio del sistema en pos-falla probando su estabilidad.

Paso 4. Determinación del estado de equilibrio inestable más cercano al estado de equilibrio estable encontrado en el paso 3.

Paso 5. Estimar el índice de la región de estabilidad del sistema en pos-falla.

Paso 6. Adelantar la integración pasó a paso (Curvas de oscilación) del sistema en falla para encontrar el tiempo crítico de conmutación.

Para el caso inicialmente se resuelve los dos primeros pasos, el paso 3, indica resolver la ecuación algebraica no lineal por el método descendente más agudo.

$$f_i(\delta_1, \delta_1, \dots, \delta_n) = P_{mi}; i = 1, 2, \dots, n. \quad (3)$$

Definiendo la ecuación:

$$\phi = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n (f_i - P_{mi})^2 \quad (4)$$

Al encontrar un mínimo de la ecuación ϕ en la solución de (3) y el mínimo valor de ϕ es cero.

En el estado de equilibrio si se da la condición de que las derivadas parciales son mayores a cero para todo i el sistema es estable en su estado estable.

Para el paso 4, se da la solución por la evaluación de la suposición inicial para minimización en la que se determina el estado estable de equilibrio.

En el paso 5, se obtiene la función de Lyapunov para sistemas de potencia multi-máquinas, teniendo en cuenta el sistema en condiciones de posfalla.

$$\begin{aligned}
 &V(\delta_1, \delta_1, \dots, \delta_n, \omega_1, \omega_2, \dots, \omega_n) = \\
 &= \sum_{k=1}^n \left[\frac{1}{2} M_k \omega_k^2 \right. \\
 &\quad + (E_k^2 G_{kk} - P_{mi})(\delta_k \\
 &\quad - \delta_n^3) \left. + \sum_{k=1}^{n-1} \sum_{j=k+1}^n E_k E_j \right. \\
 &\quad \times \{ B_{kj} \cos(\delta_k^3 - \delta_j^3) \\
 &\quad - \cos(\delta_k - \delta_i) \\
 &\quad + G_{kj} [\text{sen}(\delta_k^3 - \delta_j^3) \\
 &\quad \left. - \text{sen}(\delta_k - \delta_i)] \}
 \end{aligned} \tag{5}$$

Esta función puede ser simplificada despreciando el efecto de la transferencia de conductancias en la red.

Para el paso 6 El valor de V no alcanza al valor de b sin un periodo razonable transitorio. El estudio del límite se hace por medio de un programa digital por computadora.

Caso de Estudio

A. Parámetros del sistema a analizar

Se tomó como caso de estudio el realizado por H. A. El-Abiad, et al [1]. En la figura 1 se muestra el diagrama unifilar con las características para las constantes de las líneas, datos de las máquinas y cargas, como se muestran en las Tablas 1-3.

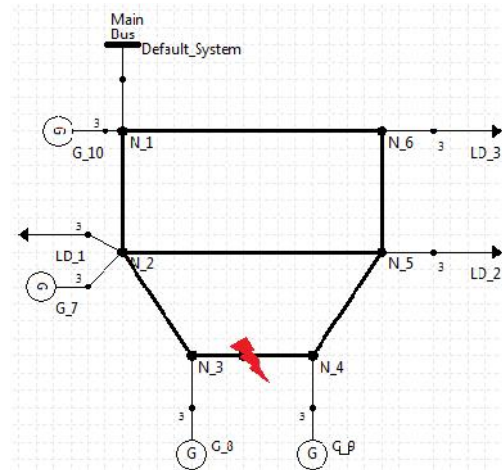


Figura 1. Diagrama unifilar para el caso de estudio, 6 nodos, 4 generadores.

Fuente: Autores.

Tabla 1. Parámetros de las líneas.

Líneas		Impedancias pu	
Desde Bus	Hasta Bus	R	X
1	2	0.05	0.20
2	3	0.10	0.50
3	4	0.20	0.80
4	5	0.10	0.30
5	6	0.20	0.40
6	1	0.10	0.15
2	5	0.20	0.50

Tabla 2. Constantes de la máquina síncrona.

2	En el Bus	MVA Capacidad	M pu	Xd pu	D pu
10	1	100	75350	0.004	1.0
7	2	15	1130	1.000	12.0
8	3	40	2260	0.500	2.5
9	4	30	1508	0.400	6.0

Tabla 3. Cargas del sistema.

En el Bus	Cargas	
	P en MW	Q en MVAR
2	20	10

5	40	15
6	30	10

B. Se asumen los siguientes supuestos para el caso de estudio

- 1) La potencia de entrada para todas las máquinas del sistema permaneces constantes durante todo el periodo transitorio.
- 2) Cada máquina se representa por una reactancia transitoria y una FEM.
- 3) El ángulo del rotor de cada máquina es fijo con respecto al ángulo de fase eléctrico del voltaje tras la reactancia transitoria.
- 4) El amortiguamiento o torque asíncrono es directamente proporcional a la tasa de cambio del ángulo del rotor.
- 5) Otras cargas de las máquinas sincrónicas se representan como impedancias constantes.

Para el análisis de la estabilidad del sistema se utilizó la herramienta Matlab, para evaluar los casos propuestos en [1].

Análisis MATLAB

El análisis de estabilidad se evalúa para una falla trifásica utilizando el software Matlab. Las librerías que se utilizaron fueron las siguientes:

- BLOSS
- BUSOUT
- YBUS

A. Simulaciones en Matlab para las condiciones de pre falla durante la falla y pos falla.

En las tablas 4-6 se presentan los datos del flujo de carga antes, durante y después de falla.

Tabla 4. Flujo de Carga para el Sistema en Pre falla.

Bus No.	V Mag	δ °	Carga		Generación		Inyectada 0.000
			MW	MVAR	MW	MVAR	
1	1.000	0.00	0.0	0.0	33.20	8.7	0.000
2	1.002	-0.12	20.0	10.0	10.00	5.0	0.000
3	1.084	4.69	0.0	0.0	35.00	23.0	0.000
4	1.024	1.51	10.0	0.0	21.00	10.0	0.000
5	0.958	-2.41	37.0	14.0	0.00	0.0	0.000
6	0.956	-2.20	27.0	92.0	0.00	0.0	0.000

1. Simulaciones del sistema antes de la falla

Las Tablas 5, 6 y 7 presentan los datos obtenidos para la pre falla proporcionados por el software Matlab, La matriz YBus se conforma de la matriz de conductancia y susceptancia para la pre falla, La conductancia o Matriz G del sistema se presenta en la Tabla 5, La Matriz B o susceptancia se presenta en la tabla 6, los datos de las fuerzas electromotrices (fems) de los generadores, la potencia de entrada se presentan en la Tabla 7.

Tabla 5. Matriz G del Sistema Prefalla.

	10	7	8	9
10	0.8475	-0.0127	-0.0797	-0.1144
7	-0.0127	0.0293	0.0165	0.0103
8	-0.0797	0.0165	0.1067	0.0178
9	-0.1144	0.0103	0.0178	0.2172

Tabla 6. Matriz B del Sistema en Prefalla.

	10	7	8	9
10	-2.2961	0.6574	0.6389	0.7567
7	0.6574	-0.8797	0.1081	0.0799
8	0.6389	0.1081	1.0891	0.3027
9	0.7567	0.0799	0.3027	-1.2360

Tabla 7. Voltajes Internos del Bus para el Sistema en Prefalla.

VOLTAJES INTERNOS DEL BUS PARA EL SISTEMA EN PREFALLA			
Generador Numero	E pu	Angulo Grados	Pm (entrada) pu
10	1.0004	0.0760	0.4056

7	0.9540	-6.1160	0.0720
8	1.1856	11.3370	0.3130
9	1.0664	5.5867	0.1900

El código implementado en Matlab arroja resultados para la condición de pre falla, con errores del 7,25%, debido a que el error el generador 10 sobrepasaba este margen fue necesario modificar la potencia base a un valor de 110Mva

2. Simulaciones del sistema durante la falla

Para la falla trifásica en el nodo 3, la matriz YBus durante la falla, se presenta en la Tabla 8.

Tabla 8. Ybus durante la falla.

	10	7	8	9
10	1.008-2.718i	-0.006+0.581i	0	-0.076+0.547i
7	-0.006+0.058i	0.027-0.892i	0	0.007+0.044i
8	0.000+0.000i	0.000-0.000i	0-2.000i	0
9	-0.076+0.547i	0.007+0.043i	0	0.2171-1.336i

El programa arroja valores cercanos a los especificados en [1] con errores entre 0% y el 30%.

3. Simulaciones del sistema después de la falla

Tras la falla, se introduce en el código la parte del sistema que se va a desconectar producto de la falla, que para el caso de estudio será la línea entre el nodo 3 y 4, En la Tabla 9 se muestra la matriz de impedancias del sistema después de la falla.

Tabla 9. Ybus después de la falla.

	10	7	8	9
10	0.847-2.295i	-	-	-0.117+0.744i
7	-0.012+0.658i	0.012+0.658i	0.077+0.650i	0.008+0.064i
8	-0.077+0.650i	0.017+0.123i	0.103-0.866i	0.0021+0.064i
9	-0.118+0.744i	0.008+0.064i	0.002+0.064i	0.254-0.982i

Para pos falla el programa de simulación arroja valores con errores entre el 4% y el 6%.

B. Análisis de estabilidad para los tres casos

El cuarto paso de la simulación, hace referencia a la estabilidad del sistema, después de la obtención de la matriz de pre falla se introduce el tiempo crítico al cual el sistema se estabiliza o inestabiliza, para el caso de estudio se tomaran tres casos de estudio para tc, los cuales son:

- caso 1: $tc_1 = 0.4110s$
- caso 2: $tc_2 = 0.4244s$
- caso3: $tc_3 = 0.39s$

Los primeros dos propuestos en [1] y el tercero se propuesto por los autores. A través de un programa implementado en Matlab se obtienen las curvas de oscilación del sistema mostradas en la figura 2-5, para tc_1, tc_2, tc_3 respectivamente con un tiempo final de $t_f = 1.8s$.

Para el caso 1: $tc_1 = 0.4110s$ (figura 2)

Para el caso 1, en $tc_1 = 0.4110$ la curva de oscilación, determino que el sistema no es estable, lo cual no corresponde con los datos presentados en [1].

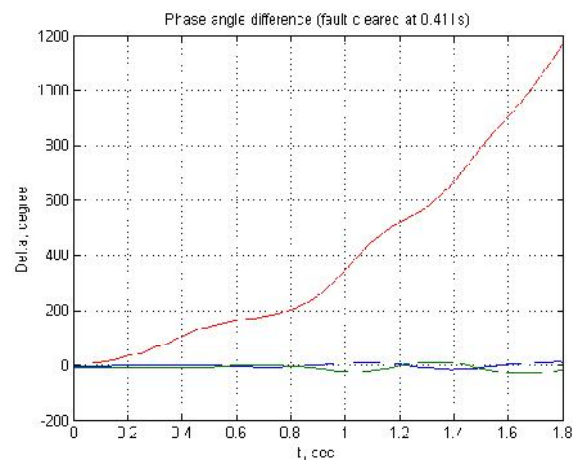


Figura 2. Curvas de oscilación de las máquinas $t = 0.4110s$.

Fuente: Autores.

Para el caso 2: $tc_2 = 0.4244s$ (figura 3)

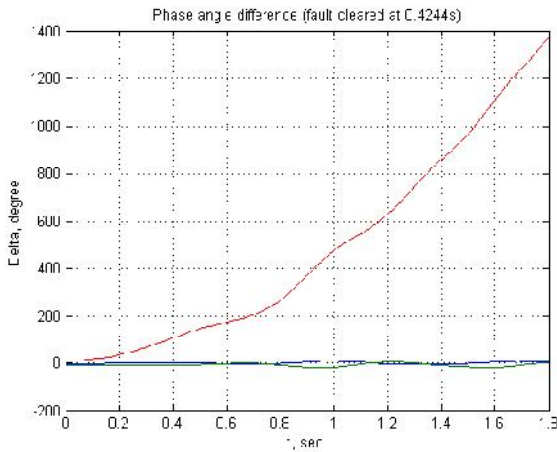


Figura 3. Curvas de oscilación de las máquinas $t = 0.4244s$

Fuente: Autores.

Para el caso 2, en $tc = 0.4244$ la curva de oscilación, determino que el sistema no es estable, lo cual corresponde con los datos presentados en [1].

Para el caso 3: $tc_3 = 0.399s$ (figura 4)

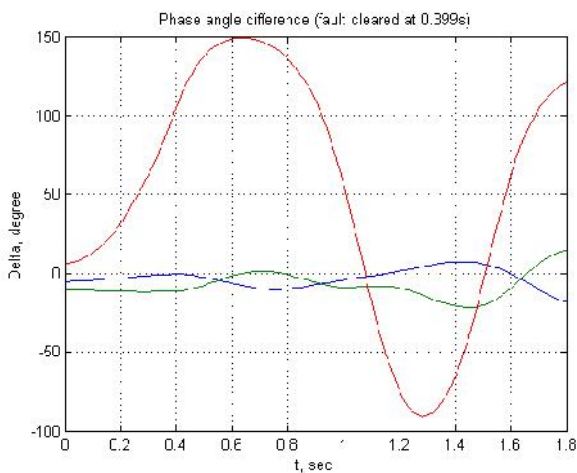


Figura 4. Curvas de oscilación de las máquinas $t = 0.399s$

Fuente: Autores.

Para este caso en particular, el tiempo crítico es $tc = 0.399s$, pero para un tiempo $tc = 0.4s$ el

sistema comenzaba a desestabilizarse, como se muestra en la figura 5.

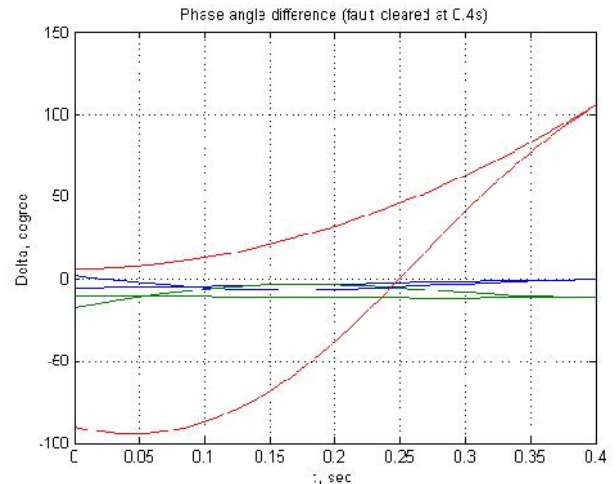


Figura 5. Curvas de oscilación de las máquinas $t = 0.4s$.

Fuente: Autores.

Conclusiones

El método de Lyapunov es aplicable para sistemas de potencia multimáquina, con el método se puede tener una determinación automática de la estabilidad o inestabilidad del sistema. Adicionalmente se puede determinar el tiempo crítico del mismo.

Al implementar este método en Matlab para el caso de estudio se encontró que la simulación con este método presenta errores aceptables, comparado con los resultados presentados en 1996 por El-Abiad et al.

Referencias

[1] H. A. El-Abiad, K. Nagappan, "Transient Stability Regions of Multimachine Power System," *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, vol. 2, pp. 85, Feb. 1996.

INFORMACIÓN DE LOS AUTORES

Nelson Enrique Vera Parra: Ingeniero Electrónico, Magister en Ciencias de la Información y las

Comunicaciones, Candidato a Doctor en Ingeniería. Coordinador del grupo de trabajo en Computación de Alto Desempeño y Bioinformática del Grupo Internacional de Investigación en Informática, Comunicaciones y Gestión del Conocimiento - GICOGE de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas. nelsonenriquevera@gmail.com neverap@udistrital.edu.co

Luis Alejandro Arias Barragán: Ingeniero Electromecánico-Universidad Politécnica Estatal de Kharkov Ucrania-1996, Master of Science en Ingeniería Eléctrica-Universidad Politécnica Estatal de Kharkov Ucrania-1996 (convalidado en 2006), Magister en Ciencias de la Información y las Telecomunicaciones-Universidad Distrital Francisco José de Caldas-2009. Se encuentra cursando su doctorado en la Universidad Distrital Francisco José de Caldas, de Bogotá, Colombia. Docente investigador en la Universidad Autónoma de Colombia-Colombia. lincarias@yahoo.com

Edwin Rivas Trujillo: Ingeniero Electricista, Magister en Sistemas de Generación Energía Eléctrica, Master y Doctor en Ingeniería Eléctrica, Electrónica y Automática. Director del Grupo de Compatibilidad e Interferencia Electromagnética de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas. edwinrivast@gmail.com - erivas@udistrital.edu.co