

Implementación del Método SIME (Single Machine Equivalent) en DIgSILENT PowerFactory para calcular Márgenes de Estabilidad Transitoria

D. Echeverría¹ P. Salazar¹ J. Cepeda¹ H. Arcos²

¹ Operador Nacional de Electricidad, CENACE

E-mail: decheverria@cenace.org.ec, psalazar@cenace.org.ec, jcepeda@cenace.org.ec

² Escuela Politécnica Nacional, EPN

E-mail: hugo.arcos@epn.edu.ec

Resumen

Este trabajo presenta una herramienta computacional, basada en el Método SIME (Single Machine Equivalent), la cual permite evaluar problemas de estabilidad transitoria en sistemas eléctricos de potencia. Mediante esta herramienta se obtienen márgenes de estabilidad que orientan la definición de acciones de control preventivo para mejorar la seguridad dinámica del sistema de potencia. El software es desarrollado utilizando lenguaje de programación DIgSILENT Programming Language (DPL) y enfoca su análisis en la determinación de índices de seguridad dinámica que permiten evaluar en el comportamiento del sistema de potencia en su configuración post-falla en términos del equivalente OMIB (One Machine Infinite Bus). La evolución de las magnitudes eléctricas (ángulo y velocidad del rotor, potencia mecánica y eléctrica) del OMIB es calculada a partir de la evolución en el tiempo de las magnitudes eléctricas de las máquinas del sistema de potencia y a partir del criterio de igualdad de áreas EAC, se calculan los márgenes de estabilidad transitoria del sistema de potencia. Los resultados obtenidos de la aplicación de la metodología en el sistema de prueba IEEE New England, permiten verificar las bondades del método para calcular márgenes de estabilidad transitoria.

Palabras clave— Estabilidad Transitoria, Sistemas de Potencia, OMIB, SIME.

Abstract

This paper presents the development of a computational tool based on the SIME (Single Machine Equivalent) Method, which assess transient stability problems of a power system through stability margins. This evaluation allows guiding the definition of preventive control actions in order to improve power system dynamic security. Using the DIgSILENT Programming Language (DPL), a computational tool for evaluating the transient stability and obtaining stability margins based on SIME method was developed. This application evaluates the behavior of the power system in its post-fault configuration in terms of equivalent OMIB (One Machine Infinite Bus). The evolution of mechanical and electrical parameters (rotor angle, rotor speed, mechanical and electrical power) of OMIB is calculated from the evolution over time of the electrical quantities of the machines and from the Equal Area Criterion EAC. It allows calculating transient stability margins of the power system. The results obtained by implementation and application of the methodology in the test system IEEE New England allow verifying the benefits of the method for calculating transient stability margins.

Index terms— Power Systems, Transient Stability, OMIB, SIME.

Recibido: 21-10-2015, Aprobado tras revisión: 24-12-2015.

Forma sugerida de citación: Echeverría, D.; Salazar, P.; Cepeda, J. y Arcos, H. (2016). "Implementación del Método SIME (Single Machine Equivalent) en DIgSILENT PowerFactory para calcular Márgenes de Estabilidad Transitoria". Revista Técnica "energía". N° 12, Pp. 138-146. ISSN 1390-5074.

1. INTRODUCCIÓN

Los sistemas eléctricos de potencia (SEP) son sistemas dinámicos de alta complejidad. La necesidad de satisfacer la demanda de energía eléctrica bajo ciertos estándares de calidad, exige que los SEP tengan un desempeño adecuado cuando experimentan perturbaciones, concretamente se requiere que el sistema mantenga la estabilidad ante cierto tipo de contingencias específicas [1].

La estabilidad transitoria en sistemas de potencia es un problema altamente no lineal y de gran dimensión [1], que tradicionalmente ha sido abordado mediante métodos de integración numérica para resolver los sistemas de ecuaciones algebraico-diferenciales no lineales del sistema y así obtener simulaciones en el dominio del tiempo. El análisis de simulaciones en el dominio del tiempo centra su interés en la determinación de tiempos críticos de despeje de fallas de gran magnitud, esto es, el tiempo máximo de duración de un disturbio sin que el sistema pierda su capacidad de recuperación a un nuevo estado estacionario o punto de equilibrio.

Actualmente, la simulación en el dominio del tiempo es ampliamente aceptada por los ingenieros que planifican el crecimiento y la operación del sistema. Sin embargo, es insuficiente para un análisis a fondo del problema de estabilidad transitoria, ya que tiene las siguientes desventajas: no proporciona márgenes de estabilidad transitoria (distancia del sistema a una posible inestabilidad), no permite un análisis de sensibilidad del sistema, no sugiere medidas de control que permitan mejorar la seguridad del sistema [2].

Con el propósito de superar las limitaciones mencionadas, este trabajo presenta una herramienta computacional basada en el Método SIME (Single Machine Equivalent), la cual combina la simulación en el dominio del tiempo (PowerFactory de DIGSILENT) con el Criterio de Igualdad de Áreas (EAC) [2]. Esta herramienta, desarrollada en el lenguaje de programación DPL (DIGSILENT Programming Language) de PowerFactory, evalúa la estabilidad transitoria del sistema y calcula márgenes de seguridad que pueden brindarle al operador de un sistema de potencia, elementos de juicio al momento de tomar decisiones en condiciones operativas adversas que eventualmente sean usadas para disparar acciones de control que permitan mejorar el estado de seguridad del sistema.

2. ESTABILIDAD TRANSITORIA

La estabilidad transitoria es un tipo de estabilidad de ángulo del rotor que representa la capacidad del sistema de mantener el sincronismo de sus unidades de generación cuando es sometido a grandes perturbaciones. La respuesta del sistema se caracteriza por grandes variaciones de los ángulos de los rotores de sus unidades generadoras y por una relación no lineal entre la potencia generada y el ángulo de carga [3]. Si la separación angular de las máquinas en el sistema permanece dentro de ciertos límites, el sistema mantiene el sincronismo. Es importante mencionar que la estabilidad transitoria depende tanto de las condiciones iniciales como de la severidad de la perturbación.

3. MÉTODOS DE EVALUACIÓN DE ESTABILIDAD TRANSITORIA

3.1. Métodos Indirectos o Convencionales

La evaluación convencional implica la simulación en el dominio del tiempo del comportamiento dinámico del sistema considerando tres etapas diferentes (pre-falla, falla y post-falla) y la obtención de las curvas de oscilación de los ángulos de rotor [4]. Además, requiere la implementación de modelos detallados de los diferentes componentes del sistema con la finalidad de lograr resultados confiables.

3.2. Métodos Directos

Los métodos directos se enfocan en la obtención de información respecto a la estabilidad transitoria, directamente del análisis de los estados del sistema sin realizar simulaciones en el dominio del tiempo. Se busca mayor rapidez de cálculo y una medida cuantitativa del grado de estabilidad/inestabilidad [2]. El primer método directo utilizado en el estudio y análisis del comportamiento dinámico de los sistemas de potencia se basa en los conceptos matemáticos desarrollados por Lyapunov [2], y se conoce como método de la *Función de Energía Transitoria* (TEF). Hacen uso de estos conceptos el método "*lowest energy unstable equilibrium point*" (UEP), el método "*Potential energy boundary surface*" (PEBS) y el método "*controlling unstable equilibrium point*" (CUEP). Este último incluye el método "*boundary-controlling unstable equilibrium point*" (BCU), muy popular en la investigación actual [5]. También se han desarrollado métodos basados en consideraciones

de energía, directamente vinculados con la generalización del *Criterio Extendido de Igualdad de Áreas (EEAC)* [2]. La principal desventaja de estos métodos es la dificultad de manejar modelos detallados de los generadores y otros componentes del sistema, lo cual implica una importante limitación para su aplicación [6], [7].

3.3. Métodos Híbridos

La idea básica de estos métodos es realizar una combinación del método convencional de integración en el dominio del tiempo con un método directo con el objetivo de utilizar las ventajas de cada uno de ellos. Los métodos híbridos poseen ventajas en cuanto a la precisión de resultados y su característica de proveer información cuantitativa del grado de estabilidad. El esquema de cálculo SIME (Single Machine Equivalent) propuesto en [8] combina la simulación en el dominio del tiempo con el método EAC logrando un algoritmo robusto y confiable que aprovecha la flexibilidad del dominio del tiempo en cuanto al modelado del sistema de potencia, con la velocidad y la riqueza de información que brindan los métodos directos.

4. MÉTODO SIME (SINGLE MACHINE EQUIVALENT)

A continuación se describe el método de la máquina equivalente, el cual es un esquema de cálculo investigado en la Universidad de Liege, Bélgica, denominado SIME (Single Machine Equivalent) [8], que combina la simulación en el dominio del tiempo con el Criterio de Igualdad de Áreas.

4.1. El Modelo Equivalente OMIB

El método de la máquina equivalente tiene sus orígenes en el criterio de igualdad de áreas extendido, y se basa en las dos proposiciones siguientes [9]:

Proposición 1: Sin importar la complejidad del sistema de potencia, el mecanismo de pérdida de sincronismo será originado por la separación irrevocable de sus máquinas sincrónicas en dos grupos: uno compuesto por las “máquinas críticas” (CMs), las cuales son responsables de la pérdida de sincronismo, y el otro de las “máquinas no-críticas” (NMs). Por lo tanto, la estabilidad transitoria de un sistema de potencia puede deducirse de un sistema máquina barra infinita OMIB (One Machine Infinite Bus) configurado de manera apropiada.

Proposición 2: Las propiedades de estabilidad del sistema OMIB pueden deducirse del Criterio de Igualdad de Áreas (EAC) aplicado al sistema equivalente OMIB.

El método considera la variación de parámetros de las máquinas equivalentes en el tiempo, es decir, incluye la dinámica del sistema a través del equivalente OMIB y es considerado un método “híbrido” de evaluación de la estabilidad transitoria debido a que combina simulaciones en el dominio del tiempo para conocer el comportamiento del sistema y el criterio de áreas iguales para evaluar la estabilidad del sistema. La ventaja principal de utilizar el método es la posibilidad de calcular un margen de estabilidad, y además conocer las máquinas responsables de la pérdida de sincronismo.

El método de la máquina equivalente utiliza la configuración post-falla del sistema para conocer los dos grupos de máquinas mencionados en la proposición 1. Mediante un ordenamiento decreciente de las magnitudes de los ángulos de rotor de las máquinas del sistema, se identifican aquellas que tienen la mayor separación angular como las máquinas críticas (CMs) y el resto de las máquinas como no críticas (NMs). Estos dos grupos de máquinas se consideran como candidatos para formar el OMIB, y el procedimiento se repite hasta alcanzar condiciones de inestabilidad en las que es posible determinar las máquinas críticas definitivas y las condiciones de seguridad del sistema.

En las siguientes ecuaciones, el subíndice “C” identifica a las máquinas críticas y el subíndice “N” a las máquinas no críticas. Los parámetros del OMIB se calculan como sigue:

Los ángulos y velocidades angulares de los dos grupos de máquinas se calculan mediante [9]:

$$\delta_C(t) = \frac{1}{M_C} \sum_{k \in C} M_k \delta_k(t) \quad (1)$$

$$\delta_N(t) = \frac{1}{M_N} \sum_{j \in N} M_j \delta_j(t) \quad (2)$$

$$\omega_C(t) = \frac{1}{M_C} \sum_{k \in C} M_k \omega_k(t) \quad (3)$$

$$\omega_N(t) = \frac{1}{M_N} \sum_{j \in N} M_j \omega_j(t) \quad (4)$$

Donde:

$$M_C = \sum_{k \in C} M_k; M_N = \sum_{j \in N} M_j \quad (5)$$

El ángulo y la velocidad de rotor del equivalente OMIB se determinan con y .

$$\delta(t) = \delta_C(t) - \delta_N(t) \quad (6)$$

$$\omega(t) = \omega_C(t) - \omega_N(t) \quad (7)$$

Las potencias mecánica y eléctrica del equivalente OMIB se definen con y .

$$P_m(t) = M \left(\frac{1}{M_C} \sum_{k \in C} P_{mk}(t) - \frac{1}{M_N} \sum_{j \in N} P_{nj}(t) \right) \quad (8)$$

$$P_e(t) = M \left(\frac{1}{M_C} \sum_{k \in C} P_{ek}(t) - \frac{1}{M_N} \sum_{j \in N} P_{ej}(t) \right) \quad (9)$$

Donde M denota el coeficiente de inercia del equivalente OMIB, el cual es calculado con .

$$M = \frac{M_C M_N}{M_C + M_N} \quad (10)$$

Finalmente la potencia de aceleración P_a del equivalente OMIB viene dada por .

$$P_a(t) = P_m(t) - P_e(t) \quad (11)$$

4.2. Criterio de Igualdad de Áreas EAC

El EAC se basa en el concepto de energía. La evaluación de la estabilidad transitoria se hace mediante el criterio de áreas iguales que establece que la estabilidad de un sistema en condiciones post-falla se puede evaluar con el margen de estabilidad definido como el exceso del área de desaceleración A_{dec} (que representa la energía potencial máxima que el sistema puede disipar en su estado post-falla) con respecto al área de aceleración A_{acc} (que representa la energía cinética del sistema almacenada durante la falla) de la curva P - δ del equivalente OMIB y que se expresa con la ecuación [9]:

$$\eta = A_{dec} - A_{acc} \quad (12)$$

4.3. Condiciones de la trayectoria inestable del OMIB

Un caso inestable corresponde a $h < 0$ (ηu margen inestable), es decir, $A_{dec} < A_{acc}$. Como se muestra en la Fig. 1 (a), la curva de P_e corta la curva de P_m , donde la potencia de aceleración P_a pasa por cero y continúa aumentando dado que la energía de aceleración supera a la de desaceleración. Desde un punto de vista físico, $P_a = 0$ toma lugar en $\delta = \delta u$ y marca la pérdida de sincronismo del OMIB. Una trayectoria OMIB inestable alcanza el ángulo inestable δu al tiempo t_u , tan pronto como:

$$P_a(t_u) = 0, \quad \dot{P}_a(t_u) = \frac{dP_a}{dt} \Big|_{t=t_u} > 0 \quad (13)$$

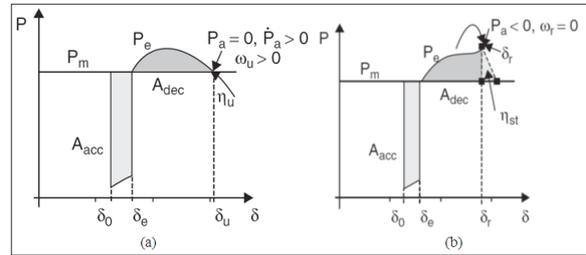


Figura 1: Curva P_a - δ del equivalente OMIB. (a) Caso inestable. (b) Caso estable

4.4. Condiciones de la trayectoria estable del OMIB

Un caso estable corresponde a $h > 0$ (ηst margen estable), es decir, $A_{dec} > A_{acc}$. Como se muestra en la Fig. 1 (b), en este caso la energía cinética adquirida es menor que la energía potencial máxima y la P_e detiene su trayectoria en $\delta = \delta r$, antes de cruzar la P_m . Dicho de otra manera, en $\delta = \delta r$; $w = 0$ con $P_a < 0$, el ángulo δ deja de incrementar su valor y entonces decrece. Una trayectoria OMIB estable alcanza el ángulo de retorno δr ($\delta r < \delta u$) en el tiempo t_r , tan pronto como:

$$\omega(t_r) = 0, \text{ con } P_a(t_r) < 0 \quad (14)$$

De este modo, el tiempo de cálculo está definido por el tiempo que tarda el equivalente OMIB en alcanzar el ángulo de retorno δr (que indica que el sistema es estable) o el ángulo δu (que indica que el sistema será inestable).

Las condiciones y son criterios objetivos de parada del algoritmo y son utilizados al momento de realizar la evaluación de estabilidad transitoria

del sistema de potencia, lo cual constituye una contribución fundamental del método SIME sobre el método convencional de análisis en el dominio del tiempo [8].

5. IMPLEMENTACIÓN DEL MÉTODO SIME EN DIgSILENT PowerFactory

La herramienta computacional desarrollada permite calcular márgenes de estabilidad transitoria que pueden brindar al operador de un sistema de potencia elementos de juicio sobre la seguridad de las condiciones operativas de su sistema. El software es implementado en el lenguaje de programación DPL de DIgSILENT PowerFactory, versión 15, y permite analizar la seguridad operativa de un sistema de potencia y determinar índices de estabilidad transitoria [10].

El algoritmo de la metodología SIME es implementado según se describe en los diagramas de flujo presentados en la Fig. 2 y Fig. 3.

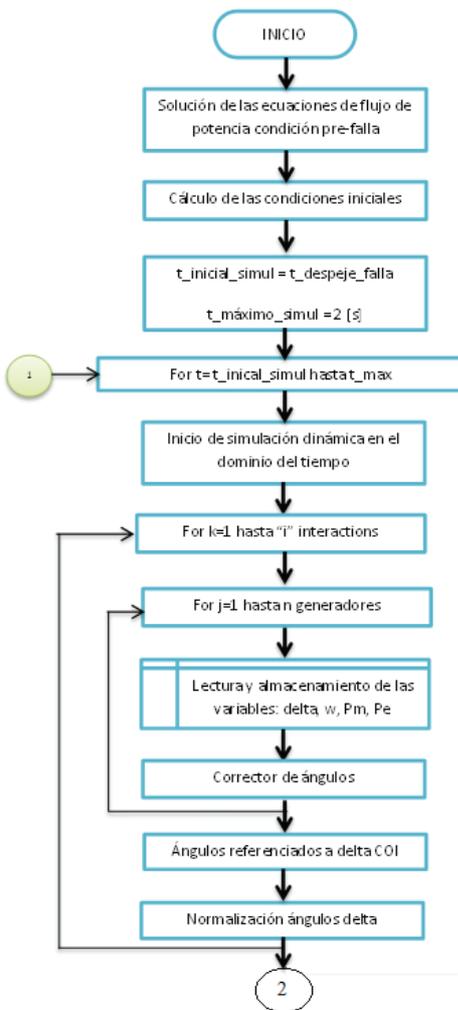


Figura 2: Algoritmo Metodología SIME. Parte 1

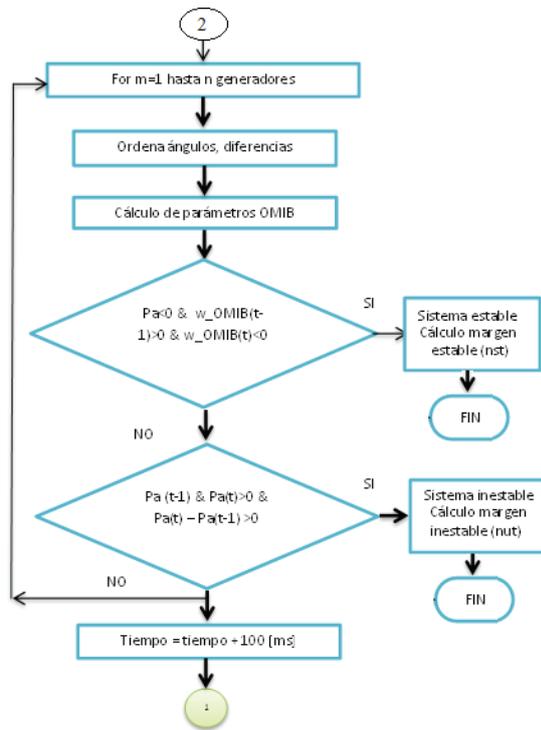


Figura 3: Algoritmo Metodología SIME. Parte 2

En la Fig. 3 se muestran los criterios de parada establecidos por el Método SIME.

De forma ilustrativa, a continuación se presenta un ejemplo del código de programación escrito en el lenguaje DPL de PowerFactory, en el cual se muestra como se obtienen las variables eléctricas y mecánicas para su uso en el Método SIME.

```
! Obtención de las variables eléctricas
y mecánicas de los n generadores
para el uso en el SIME
if (Genx){
nombre=sprintf('%s',Genx);
nom = Genx.GetFullName();
i1 = ResIndex(R_simul_2, Genx, 's:phi');
i2 = ResIndex(R_simul_2, Genx, 's:pt');
i3 = ResIndex(R_simul_2, Genx, 's:pgt');
i4 = ResIndex(R_simul_2, Genx, 's:speed');
GetResData(Obs_phi,R_simul_2,ele,i1);
GetResData(Obs_pt,R_simul_2,ele,i2);
GetResData(Obs_pgt,R_simul_2,ele,i3);
GetResData(Obs_speed,R_simul_2,ele,i4);
GetResData(tiempo,R_simul_2,ele,-1);
...}
```

6. RESULTADOS

Para comprobar la efectividad de la metodología implementada en PowerFactory, se realiza la evaluación de la estabilidad transitoria del sistema de potencia de prueba IEEE New England, de 39 barras y 10 generadores [11], presentada en la Fig. 4.

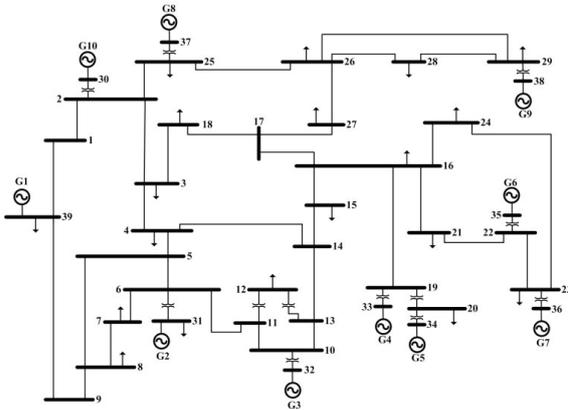


Figura 4: Sistema de prueba New England

6.1. Caso Inestable

Se simula una falla trifásica en la Línea 2-25 aplicada en $t=0,1$ s, y en $t=0,22$ s se considera que los interruptores abren la Línea 2-25. A continuación se presentan los resultados obtenidos con la herramienta desarrollada.

6.1.1 Resultado Identificación de Máquinas Críticas

La metodología convencional para determinar las máquinas críticas, consiste en hacer un seguimiento a la trayectoria pos-falla de los ángulos del rotor de los generadores en función del tiempo, en cada paso de integración se ordenan de mayor a menor los ángulos y se obtiene la mayor desviación angular ("gap" más grande) entre dos máquinas adyacentes. Se considera que las máquinas críticas candidatas son aquellas que están por encima de esa mayor diferencia [12].

La metodología descrita en el párrafo anterior es adecuada, para los casos en los que las máquinas críticas no cambian en el transcurso del tiempo, es decir la mayor diferencia o gap se mantiene en el tiempo. En la Fig. 5 se muestra un ejemplo de la variación de las máquinas críticas.

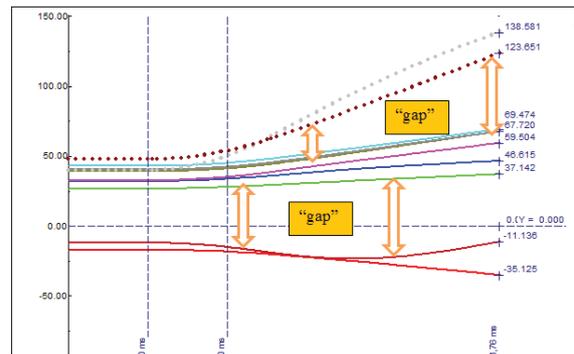


Figura 5: Variación de las Máquinas Críticas en el transcurso del tiempo

Para evitar una selección equivocada del conjunto de máquinas críticas, se puede aplicar la formulación descrita en [12], la cual permite normalizar los ángulos de rotor.

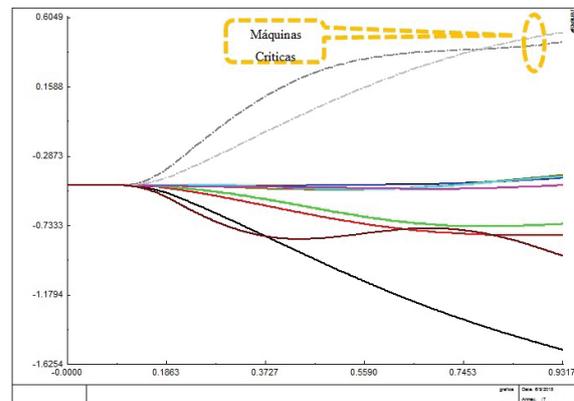


Figura 6: Ángulos de rotor normalizados vs tiempo

En la Fig. 6, se observa el comportamiento en el tiempo de los ángulos de rotor normalizados, sobre esta base la identificación de máquinas críticas se torna en una tarea menos compleja.

6.1.2 Resultado Márgenes de Estabilidad Transitoria

En la Fig. 7, se observa el gráfico de la Potencia de aceleración en función del ángulo de rotor para el sistema equivalente OMIB. Se aprecia que el área de aceleración es mayor que el área de desaceleración cuando el ángulo llega a los 128° , aproximadamente en el tiempo $t=601$ ms, luego de lo cual el sistema irrevocablemente tendrá una condición inestable.

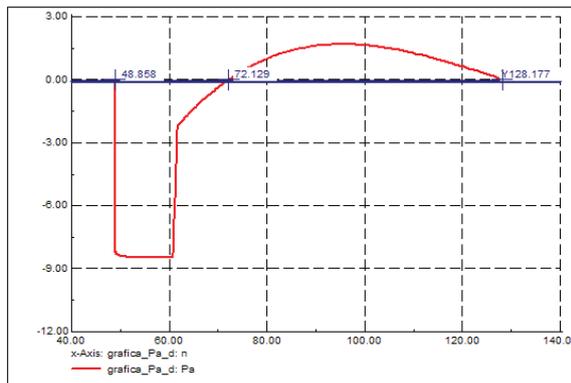


Figura 7: Potencia aceleración Pa [pu] vs delta [°]

La Fig. 8 muestra los principales resultados de la metodología implementada:

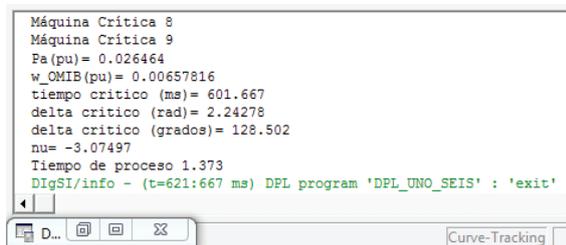


Figura 8: Reporte de resultados – Metodología SIME – Caso inestable

En la Fig. 8 se puede apreciar cuales son las máquinas críticas, el tiempo crítico (tiempo a la inestabilidad), el margen de estabilidad (nu), así como también el ángulo en el cual se produce la inestabilidad del sistema.

Un resultado muy importante, constituye el cálculo del margen de inestabilidad que para el ejemplo es de $n = -3,07497$. Una de las grandes ventajas encontradas en la metodología SIME, es que con una simulación menor a los dos segundos se puede conocer los márgenes de seguridad transitoria de un sistema de potencia.

6.2. Caso Estable

Se simula una falla trifásica en la Línea 2-25 aplicada en $t=0,1$ s, y en $t=0,18$ s se simula la apertura de los interruptores de la Línea 2-25.

6.2.1 Resultado Márgenes de Estabilidad Transitoria

La Fig. 9 muestra el gráfico de la Potencia de aceleración en función del ángulo para el sistema equivalente OMIB. Se aprecia que el

área de desaceleración es mayor que el área de aceleración, por tanto el sistema es estable y el margen de estabilidad es positivo ($n_{st}=6,59$).

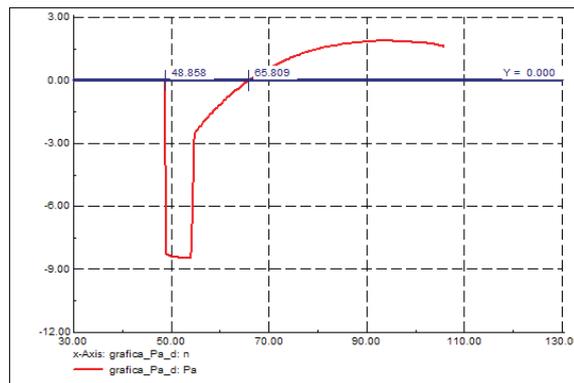


Figura 9: Potencia aceleración Pa [pu] vs delta [°]

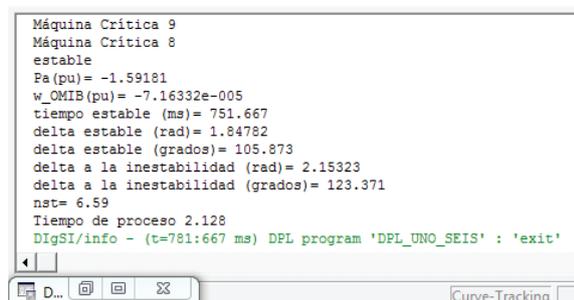


Figura 10: Reporte de resultados – Metodología SIME- Caso estable

El reporte de resultados puede ser observado en la Fig. 10, donde se establece que las máquinas críticas son los generadores G8 y G9; adicionalmente se observa que tanto la potencia de aceleración (Pa) como la variable omega de velocidad son negativos, lo cual implica una condición de estabilidad al tiempo $t=751,67$ ms; con un ángulo de retorno o estable de $105,87^\circ$ y un margen de estabilidad positivo de $n=6,59$. Cabe señalar que la aplicación desarrollada permite, a través de una regresión cuadrática, conocer el ángulo a la inestabilidad que en este caso es de $123,37^\circ$

6.3. Metodología para el Cálculo del Tiempo crítico de despeje CCT

Otra de las ventajas de la metodología SIME es poder calcular el tiempo crítico de despeje ante problemas de estabilidad transitoria.

En este sentido, existe una relación lineal entre el margen de estabilidad transitoria (n) y el tiempo de despeje de la falla. La Tabla 1 muestra los resultados del margen de estabilidad variando el tiempo de despeje de la falla en la línea 2-25.

Tabla 1: Variación del margen con el tiempo de despeje de la falla

| Tiempo de despeje de la falla (ms) | Margen de estabilidad (n) |
|------------------------------------|---------------------------|
| 200 | -0,296844 |
| 220 | -3,07497 |
| 250 | -7,69419 |

En la Fig. 11 se observa el comportamiento lineal de la variación del margen de estabilidad respecto del tiempo de despeje de la falla. Por tal motivo, es posible apreciar que realizando una extrapolación se puede obtener el valor del tiempo de despeje cuando el margen de estabilidad es igual a cero ($n=0$), el cual corresponde al tiempo crítico de despeje de la falla ($t_{cr}=198\text{ ms}$).

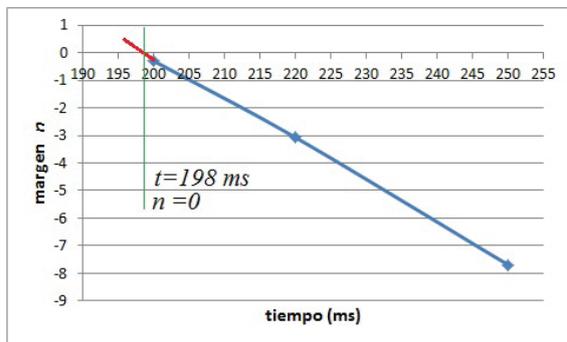


Figura 11: Variación del margen con el tiempo de despeje de la falla

La metodología SIME permite calcular el tiempo crítico de despeje a partir de los resultados de tan solo dos simulaciones inestables del sistema.

A continuación, se muestran los resultados de la simulación en el dominio del tiempo utilizando el software PowerFactory de DIGSILENT, en el cual se han realizado varias simulaciones hasta conseguir un caso inestable y poder determinar el tiempo crítico de despeje, que en este caso es $t_{cr}=199\text{ ms}$.

La Fig. 12 muestra el comportamiento de los ángulos de rotor del sistema de potencia de prueba en la simulación en el dominio del tiempo. Se concluye entonces que la metodología SIME proporciona resultados precisos, así como también un margen de estabilidad del sistema, el cual puede ser utilizado para ejercer acciones de control preventivo.

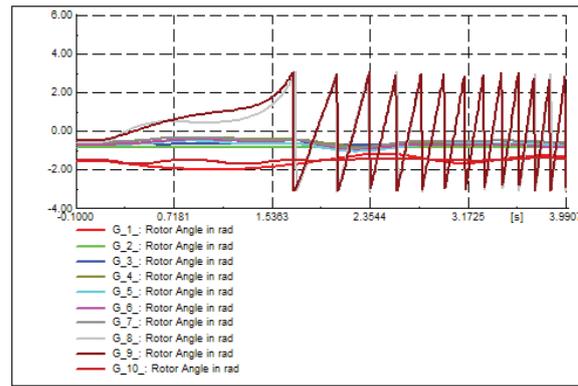


Figura 12: Ángulos de rotor. Falla en la línea 2-25

7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

La aplicación de la metodología SIME en el análisis de estabilidad transitoria de un SEP, presenta importantes ventajas cuantitativas con respecto a los métodos convencionales basados exclusivamente en simulaciones en el dominio del tiempo, ya que proporciona los márgenes de estabilidad transitoria y permite evaluar la seguridad de un sistema de potencia. Adicionalmente, la metodología permite calcular el tiempo a la inestabilidad, lo que puede ser utilizado para diseñar acciones de control preventivo y correctivo en un sistema de potencia.

La aplicación de la metodología en el Sistema IEEE New England, muestra resultados bastante precisos y permite validar la robustez de la herramienta implementada en PowerFactory. Bajo este escenario, se plantea como trabajo futuro la utilización de la herramienta desarrollada para evaluar la estabilidad transitoria del Sistema Nacional Interconectado de Ecuador.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] P. Kundur, "Power System Stability and Control", McGraw-Hill, New York, USA, 1994.
- [2] M. Ribbens-Pavella, P. Murthy, "Transient Stability of Power Systems", John Wiley and Sons, England, 1994.
- [3] IEEE/CIGRE, "Definition and Classification of Power System Stability", IEEE Transactions on Power Systems, VOL. 19, No. 2, May 2004.

- [4] A. Fouad, V. Vittal, "Power System Transient Stability Analysis Using the Transient Energy Function", Prentice-Hall, Inc. New Jersey, 1992.
- [5] Hsiao-Dong Chang, Chia-Chi Chu, G. Cauley, "Direct stability analysis of electric power systems using energy functions: theory, applications, and perspective", Proceedings of the IEEE, Volume 83, Nov. 1995.
- [6] Rahimi, N. Balú, M. Lauby, "Assessing on-line transient stability in Energy Management System", IEEE Computer Application in Power, pp. 44-49, July 1991.
- [7] Rahimi, M. Lauby, K. Lee, "Evaluation of the Transient Energy Function method for on-line dynamic security analysis", IEEE Transaction on Power Systems, Vol. 8, No 2, pp. 497-506, May 1993.
- [8] Y. Zhang, L. Wenhenkel, M. Pavella, "SIME: A hybrid approach to fast transient stability assessment and contingency selection", Electrical Power & Energy Systems, Vol. 19 No. 3, pp. 195-208, 1997.
- [9] M. Pavella, D. Ernst, and D. Ruiz-Vega, "Transient Stability of Power Systems: A Unified Approach to Assessment and Control", Norwell, Kluwer, 2000.
- [10] DIgSILENT Power Factory, "User's Manual Version 15.0", Edición 1, 2014, DIgSILENT GmbH, Gomaringen, Germany.
- [11] M. Pai, "Energy Function Analysis for Power System Stability", Kluwer, Norwell, MA, 1989.
- [12] D. Echeverría, J. Cepeda, "Identificación de Máquinas Críticas ante Problemas de Estabilidad Transitoria basado en Data Mining y Mediciones Sincrofasoriales", Revista Técnica "energía", edición 11, enero 2015.



Diego Echeverría.- Recibió su título de Ingeniero Eléctrico de la Escuela Politécnica Nacional de Quito, en 2006. Se encuentra realizando sus estudios de Doctorado en Ingeniería Eléctrica en el Instituto de Energía Eléctrica (IEE), de la Universidad Nacional de San Juan. Actualmente trabaja en el Operador Nacional de Electricidad CENACE de Ecuador en el Área de Investigación y Desarrollo. Sus áreas de interés son: Estabilidad de Sistemas de Potencia en Tiempo Real, Sistemas de medición sincrofasoriales PMU's y Control de Emergencia de Sistemas de Potencia.



Paul Salazar.- Recibió el título de Ingeniero Eléctrico en la Escuela Politécnica Nacional de Quito – Ecuador en 2003. Se encuentra analizando la Tesis de la Maestría en Ciencias de la Ingeniería Eléctrica en el Escuela Politécnica Nacional. Actualmente trabaja en el Operador Nacional de Electricidad – CENACE de Ecuador en el Área de Planeamiento Energético. Sus áreas de interés son: Estabilidad de Sistemas de Potencia, Planificación de Sistemas de Potencia, Energías Renovables, Estudios de Prospectiva Energética.



Jaime Cristóbal Cepeda.- Nació en Latacunga en 1981. Recibió el título de Ingeniero Eléctrico en la Escuela Politécnica Nacional en 2005 y el de Doctor en Ingeniería Eléctrica en la Universidad Nacional de San Juan en 2013. Entre 2005 y 2009 trabajó en Schlumberger y en el CONELEC. Colaboró como investigador en el Instituto de Energía Eléctrica, Universidad Nacional de San Juan, Argentina y en el Instituto de Sistemas Eléctricos de Potencia, Universidad Duisburg-Essen, Alemania entre 2009 y 2013. Actualmente, se desempeña como Jefe de Investigación y Desarrollo del CENACE. Sus áreas de interés incluyen los sistemas de medición fasorial, la evaluación de vulnerabilidad en tiempo real y el desarrollo de Smart Grids.



Hugo Arcos Martínez.- Nació en Quito, Ecuador, en 1972. Recibió el título de Ingeniero Eléctrico en la Escuela Politécnica Nacional en 1998, y el de Doctor en Ingeniería Eléctrica en la Universidad Nacional de San Juan en 2003. Ha desarrollado su carrera profesional en diversas instituciones del Sector Eléctrico Ecuatoriano y actualmente se desempeña como Coordinador de la Carrera de Ingeniería Eléctrica de la Escuela Politécnica Nacional. Sus áreas de interés son: Modelación en Sistemas Eléctricos de Potencia, Estudios de Transitorios Electromagnéticos y Electromecánicos, Redes Inteligentes, Energías Renovables, Confiabilidad de SEP, Planificación de Sistemas de Potencia, entre otras.