



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE
MÉXICO**

**PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN
INGENIERÍA**

**ESTUDIO DEL AHORRO DE LA ENERGÍA CINÉTICA
TRANSFERIDA ENTRE ISLAS, UTILIZANDO
EQUIVALENTES DINÁMICOS AMORTIGUADOS**

T E S I S

QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE

MAESTRO EN INGENIERÍA

INGENIERÍA ELÉCTRICA – SISTEMAS ELÉCTRICOS DE POTENCIA

P R E S E N T A

NANCY JACQUELINE PACHECO MARTÍNEZ

TUTOR

DR. CARLOS JUÁREZ TOLEDO



JURADO ASIGNADO

Presidente: M.I Lorenzo Bautista Rodolfo
Secretario: Ing. Guerreo Cepeda Rafael
Vocal: Dr. Juárez Toledo Carlos
1er Suplente: Dra. Martínez Carrillo Irma
2do. Suplente: Dr. Castellanos Bustamante Rafael

División de Estudios de Posgrado de la Facultad de Ingeniería UNAM

DIRECTOR DE LA TESIS

Dr. Carlos Juárez Toledo

Dedicatoria:

A Dios y la Virgen por su inmenso amor y darme la fortaleza espiritual y física.

A mi Madre por ser mi ejemplo y la luz de la vida, a mi Padre por su inmenso apoyo, a cada una de mis Hermanas y Hermanos por ser modelo de vida, por honrarme con su hermosa amistad y compartir su sabiduría con migo.

A Sergito por su inmenso amor y constante compañía.

A mi sobrina Aura por brindarme siempre su dulce sonrisa.

Agradecimientos.

A mi director de tesis Carlos Juárez Toledo por su profesionalismo, sus valiosos consejos y confianza brindada para realizar este trabajo.

A mis maestros Rafael Guerrero Cepeda y Lorenzo Bautista por su calidad humana y brindarme su apoyo en mis estudios.

Prólogo

En los últimos años, la programación basada en técnicas heurísticas ha tenido un especial interés, atrayendo así, la atención de especialistas en el problema de ahorro de la energía.

Lo que nos brinda hoy día, la posibilidad de incursionar con técnicas novedosas en el campo de la ingeniería. Bajo este contexto el método que se presenta, está basado en la noción de ahorro de la energía cinética transferida en los grupos de generadores coherentes; específicamente se propone el estudio de ahorro de la energía cinética por medio de la disminución del desfase angular de la máquina aglomerada obtenida por equivalentes dinámicos.

El objetivo es disminuir las pérdidas de la energía cinética transferida entre las diversas conexiones de las islas de un sistema multimáquinas de gran dimensión (grupo de generadores coherentes) del sistema en estudio. Cabe señalar, que en el trabajo se utilizan dos modelos, el primero es el sistema de 2 áreas del IEEE para desarrollar la técnica presentada, la cual se valida en el segundo modelo del sistema interconectado de la red mexicana

Resumen

Una vez que una contingencia ocurre en un sistema de potencia, el sistema, para mantener la estabilidad libera grandes cantidades de energía cinética reflejada en el desfaseamiento de los generadores.

Aun sin tomar en cuenta las pérdidas económicas que conlleva la inestabilidad del sistema, las propias energías cinéticas entregadas por los generadores para mantener la estabilidad representan anualmente grandes costos en la transmisión y generación.

En esta tesis, se investiga, analiza y desarrolla un método directo para la obtención de la energía disipada por la diferencia de velocidades relativas de los generadores, con la finalidad de proponer una disminución del desfaseamiento de los generadores coherentes y con ello un ahorro significativo en la operación de un sistema eléctrico de potencia.

El método propuesto, permite reducir el tamaño y complejidad de un estudio convencional de estabilidad transitoria, al estudio de un sistema equivalente aglomerado de dos máquinas, y por otra parte proporcionar ventajas numéricas y conceptuales respecto a los métodos existentes.

Son dos los objetivos principales que se persiguen en esta tesis:

- Se busca un equivalente dinámico que le dé solución a los problemas de estabilidad transitoria de primera oscilación, utilizando conceptos de energía para tal fin.
- El segundo objetivo y más importante es el lograr reducir y ahorrar la energía necesaria para mantener la estabilidad del sistema.

Para lograr tal finalidad fue indispensable la implementación computacional del método, logrando expresiones analíticas que describen el amortiguamiento dinámico del sistema. En lo referente a la aplicación del método, se utilizan dos diferentes modelos, el primero de ellos es el modelo de 2 áreas del IEEE con cuatro generadores para introducir la teoría propuesta. El segundo modelo empleado, es el modelo conformado por 45 generadores de la red mexicana para validar la técnica presentada.

Índice general

Prólogo.	ii
Resumen.	iii
Acrónimos y Símbolos.	iv
Índice General.	vii
Índice de Figuras.	ix
Índice de Tablas.	ix
Capítulo 1 Introducción	
1.1 Planteamiento del problema.	1
1.2 Estudio de la Investigación Precedente.	2
1.3 Objetivo de la Tesis.	4
1.4 Contribuciones de la Tesis.	5
1.5 Estructura de la tesis.	6
1.6 Referencias.	7
Capítulo 2 Equivalentes Dinámicos de dos generadores	
2.1 Introducción.	9
2.1.1 Criterio de Áreas Iguales.	10
2.1.2 Margen de Estabilidad.	13
2.2 Métodos de Análisis Fundamentados en el Equivalente de dos generadores.	13
2.2.1 Modelos Equivalentes OMIB del tipo Estático	15
2.2.2 Modelos Equivalentes OMIB del tipo Dinámico.	17
2.3 Método para el desarrollo de Equivalentes OMIB generalizados.	19
2.3.1 Identificación del Grupo Crítico.	20
2.3.2 Cálculo del Modelo OMIB.	21
2.3.3 Desarrollo de los OMIB generalizados	21
2.3.4 Obtención de los modelos instantáneos OMIB.	23
2.3.5 Determinación de los parámetros instantáneos OMIB.	24
2.4 Referencias	26
Capítulo 3 Diseño y Aplicación de un PSSs Variantes en el Tiempo Utilizando el Concepto de Energía Cinética Transferida en el Modo Inter-área.	
3.1 Introducción.	27
3.2 Energía Cinética OMIB.	28
3.3 Modos empleados en el análisis de la estabilidad.	28
3.4 Aplicación del Estabilizador de Potencia.	31
3.5 Amortiguamiento del Modo Inter-área (IAM).	32
3.5.1 Acciones del controlador del PSS en línea.	33
3.7 Sistema de Prueba.	34
3.8 Resultados.	36
3.9 Referencias.	39

<i>Capítulo 4 Estudio de Ahorro de Energía Cinética Utilizado el Concepto de Amortiguamiento del IAM en el Sistema Interconectado Mexicano.</i>	
4.1	Introducción. 40
4.2	Estudio del Ahorro de Energía 41
4.3	Estudio de Pequeña Señal en el SIME aplicado a la disminución del Intercambio de Energía Cinética en el OMIB 42
4.3.1	Escenario del funcionamiento seleccionado. 43
4.4	Sistema de Prueba. 44
4.5	Estudio del intercambio de Energía Cinética del SIM. 45
4.5.1	Escenario de Amortiguamiento del 25%. 46
4.5.2	Otros escenarios de Amortiguamiento. 48
4.6	Referencias. 52
<i>Capítulo 5 Conclusiones generales y Trabajos futuros</i>	
5.1	Conclusiones generales. 53
5.2	Trabajos futuros. 54
<i>Apéndice A</i>	
	Base de Datos del sistema de dos áreas del IEEE 55

Índice de Figuras

Figura 2.1	Sistema Generador Bus -Infinito.	10
Figura 2.2	Imagen representativa del Criterio de Áreas Iguales.	12
Figura 2.3	Diagrama para la obtención y el cálculo de atributos generalizados del OMIB	20
Figura 2.4	Selección de los parámetros instantáneos.	25
Figura 3.1	Modo Local.	29
Figura 3.2	Modo Inter-área	29
Figura 3.3	Modo Intra-planta.	30
Figura 3.4	Modo Intra-área.	30
Figura 3.5	Estructura del estabilizador de potencia considerado para estos estudios.	31
Figura 3.6	Sistema de dos áreas de la IEEE	34
Figura 3.7	Velocidades de los cuatro generadores (Caso Base)	36
Figura 3.8	Velocidades de los cuatro generadores (Modo Local)	37
Figura 3.10	Velocidades de los cuatro generadores (Modo Inter-área).	38
Figura 4.1	Intercambio de energía cinética del grupo uno al grupo dos.	43
Figura 4.2	Intercambio de energía cinética del grupo dos al grupo uno.	44
Figura 4.3	Detalle Centro-Sureste del Sistema Interconectado Mexicano.	45
Figura 4.4	Representación del ángulo de las velocidades de los 45 generadores del SIM.	47
Figura 4.5	Representación del intercambio de energía entre áreas.	48
Figura 4.6	Transferencia de energía con FA del 25%,30% y 35%.	49
Figura 4.7	Valor de la transferencia de energía cinética.	50

Índice de Tablas

Tabla 3.1	Parámetros de control PSS.	32
Tabla 3.2	Áreas que conforman el sistema en estudio.	35
Tabla 3.3	Modos identificados en el sistema analizado	35
Tabla 3.4	Valores utilizados de las G_{KPSS} en cada área.	36
Tabla 4.1	Condiciones de ganancia aplicadas al SIM.	47
Tabla 4.2	Otras condiciones de ganancia aplicadas al SIM	49
Tabla 4.3	Ahorro de Energía en forma porcentual.	51

Capítulo 1

Introducción

1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

En el estudio y análisis de la estabilidad dinámica, un caso práctico es proponer el problema de amortiguamiento como un conjunto de señales oscilando alrededor de un punto; donde las condiciones iniciales o de frontera establecen la propiedad de estabilidad. Lo anterior, en virtud de que en los recientes años se han incorporado a estos estudios, señales que ayudan a estabilizar de manera suplementaria, eliminando las oscilaciones de baja frecuencia sostenidas o bien llegar a aumentar el amortiguamiento de las mismas [1,7].

La incorporación de estas señales suplementarias nos ayuda a aumentar el amortiguamiento del sistema para conocer el índice de mejoramiento del intercambio de energía cinética y así ahorrar la energía que regularmente se disipa por rotaciones entre los generadores.

Otro problema identificado, es la caracterización del comportamiento dinámico del sistema de potencia a nivel de variables de tiempo, el cual nos lleva a realizar estudios analíticos de grandes dimensiones, que dificultan el poder identificar el fenómeno a estudiar [8,11].

Debido a las razones antes expuestas, el presente trabajo nos motivó a desarrollar métodos de análisis para la estabilidad transitoria basados en la integración numérica del modelo dinámico del modo de menor frecuencia del sistema de potencia.

En la presente tesis se aborda el problema del estudio de la Energía Cinética, el cual tiene un rol importante para garantizar la estabilidad transitoria, lo que constituye uno de los objetivos fundamentales de esta tesis [12].

1.2 ESTUDIO DE LA INVESTIGACIÓN PRECEDENTE

Uno de los principales problemas en el análisis del comportamiento dinámico de los Sistemas Eléctricos de Potencia (SEP) es que requiere la representación adecuada de sus elementos, este requisito fundamental ocasiona que el modelo matemático resultante de un SEP sea altamente no-lineal. Sin embargo, a pesar de la naturaleza no-lineal de los SEP el estudio de oscilaciones electromecánicas puede realizarse mediante la aplicación de técnicas para análisis de sistemas lineales, como lo es el análisis modal, debido a que las características de estas oscilaciones (frecuencia y amortiguamiento) están en función de la condición de operación y estructura del SEP más que de la ubicación o severidad del disturbio aplicado.

Estas técnicas se basan en soluciones de ecuaciones algebraicas en el dominio del tiempo y se utilizan para el análisis de transitorios y estabilidad de pequeña señal. Dichas técnicas permiten crear diferentes escenarios que incluyen el estado de operación normal y contingencias, y se utilizan para determinar los tiempos de respuestas y comportamientos de los elementos ante los diferentes eventos. Varias simulaciones en el tiempo fueron realizadas a finales de los años 70s y principios de los 80s para representar el fenómeno de inestabilidad de mediano tiempo y largo tiempo. En los años 90s se utilizaron para analizar colapsos de voltaje en sistemas AC/DC, con la función de Lyapunov evaluada en un instante de tiempo.

A continuación se hará mención sobre algunos de los principales trabajos relacionados con el método OMIB.

1987 A. Rahimi, G. Shaffer. Cuya función es evaluar el comportamiento dinámico del sistema ante diferentes contingencias por medio de redes neuronales para la identificación del colapso.

1988 Xue Y., Van Cutsem, T., Ribbens-Pavella. Para concretar un método simple sobre el estudio de la estabilidad en sistemas de potencia de gran tamaño (OMIB estáticos).

1989 Xue Y., Van Cutsem, T., Ribbens-Pavella. Extender el uso del Criterio de Áreas Iguales fundamentada en la generalización y aplicación del criterio OMIB.

1997 Y. Zhang L. Wehenkel, P. Rousseaux, M. Pavella. Al realizar un método híbrido que combina la simplificación de los OMIB estáticos con las herramientas modernas con programas de modelado de sistemas de potencia en el estudio de la estabilidad (método SIME).

1998 M. Pavella. Clasificar los métodos OMIB proponiendo un modelo generalizado.

2004 D. Ruiz V, A. R, Messina M. Pavella. El proponer modelos en línea, para lograr el control de oscilaciones usando el método SIME como análisis Pony.

2005 C. Juarez, R. Castellano, A.R. Messina. En el análisis y control en modos-inter-área de un sistema de potencia usando un modelo dinámico OMIB.

2006 C. Juarez T, A. R. Messina y D. Ruiz. V. Al realizar el análisis y control del modo inter-área usando equivalentes dinámicos OMIB.

2007 C. Juarez, A.M. Stankovic. Estudiar la estabilidad local y global del sistema utilizando parámetros instantáneos OMIB [13,14].

2009 C. Juarez, I, Martinez, N. Pacheco. Investigar las trayectorias de las multioscilaciones variantes en el tiempo OMIB [15].

2010 N. Pacheco, C. Juarez, I. Martinez. Análisis y Control de la Energía Cinética Transferida en el Modo Inter-área usando una Representación Máquina Bus Infinito con PSS Variantes en el Tiempo [16].

Actualmente los estudios de estabilidad han dado un giro completo siendo utilizados para encontrar índices de amortiguamiento [17], los cuales determinan factores de robustez prediciendo los lugares menos amortiguados del sistema logrando determinar que tanto afectará una falla en el sistema.

Otro enfoque interesante es el uso de los índices de amortiguamiento para determinar las pérdidas de energía del sistema por medio de la disminución del desfase de los grupos de generadores coherentes utilizando equivalentes dinámicos [17], este enfoque compone el tema central de esta tesis y se expone a continuación.

1.3 OBJETIVOS DE LA TESIS

El objetivo principal de esta tesis es realizar una representación y análisis en los sistemas eléctricos de potencia, desarrollando un método numérico directo para obtener índices cuantitativos que nos representen las pérdidas de energía de los sistemas eléctricos de potencia por medio de la disminución del desfase angular de los grupos de generadores coherentes utilizando equivalentes dinámicos.

Otros objetivos que persigue la tesis son:

- Obtener una coordinación de los generadores utilizando señales suplementarias de los mismos, logrando un ahorro considerable de la energía disipada.
- El realizar análisis de estabilidad transitoria utilizando el enfoque de la energía cinética transferida.
- Lograr la incorporación de un PSS el cual tiene la característica de ser variante en el tiempo y además de ser coordinado por el intercambio de la energía de los principales rotores del modo electromecánico.
- El desarrollo de Clusters dinámicos fijos utilizando el patrón de oscilación del Modo Inter – área.

Para cumplir con tales objetivos, se expone una metodología para analizar las formas importantes de amortiguar el modo inter-área de un sistema multimáquinas utilizando la información procedente del intercambio de energía cinética entre las áreas más sensibles de las redes en estudio.

La originalidad de este nuevo método se basa en como modelar un control variante en el tiempo. Dicho modelo variante en el tiempo es coordinado por medio de funciones de energía logrando amortiguar la dinámica de las variaciones previsibles.

En esta tesis se utilizaron dos modelos de prueba para ilustrar la teoría propuesta. El sistema de dos áreas del IEEE y el modelo compacto de la red Mexicana constituida de 45 generadores.

1.4 CONTRIBUCIONES DE LA TESIS

Este trabajo presenta una alternativa viable para atacar el problema de estimación de estabilidad transitoria en línea. La metodología se ejemplifica por medio del diseño de un sistema basado en el intercambio de la energía cinética y comprobado en un modelo que forma parte de la red interconectada mexicana.

- El estudio y obtención de técnicas generalizadas para el análisis de la estabilidad transitoria, así como de las oscilaciones de postfalla logrando con ello amortiguar sistemas multimáquinas
- Aportación a la extensión de los métodos existentes en la literatura para determinar el amortiguamiento del OMIB. Al simular los modelos con los parámetros adecuados y con ello será posible reproducir los resultados en redes más robustas.
- El desarrollo de una herramienta analítica fundamentada en conceptos de energía con la finalidad de lograr la identificación del fenómeno de oscilaciones electromecánicas y la disminución de los costos de análisis de los sistemas en estudio.
- Publicaciones de artículos en congresos internacionales y nacionales para ampliar este tipo de herramientas en favor de la investigación.

A continuación se mencionan los trabajos publicados durante el desarrollo de esta tesis.

Trabajos expuestos en Congresos Internacionales

- C. Juarez, I. Martinez and N. Pacheco, “Multi-Swing Trajectory Analysis using Time-Varying One-Machine Infinite Bus Equivalents”, 6th International Conference on Electrical Engineering, Computing Science and Automatic Control, Toluca, México, 2009.
- N. Pacheco, C. Juarez, I. Martinez, “Análisis y Control de la Energía Cinética Transferida en el Modo Inter-área usando una Representación Máquina Bus Infinito con PSSs Variantes en el Tiempo”, 4to Congreso Iberoamericano de Estudiantes de Ingeniería Eléctrica (IV CIBELEC 2010), 5tas jornadas de ingeniería eléctrica, Mérida-Venezuela, 2010.

Trabajo enviado a revista indexada

- Estudio de la Estabilidad Transitoria Usando Interpolación No Lineal de Alto Orden. (Revista de la Facultad de Ingeniería UNAM).

1.5 ESTRUCTURA DE LA TESIS

La organización del presente trabajo es la siguiente:

En el capítulo uno, se da a conocer el planteamiento del problema para su análisis. En el cual se realiza una breve revisión del trabajo previo, se dan a conocer los objetivos y contribuciones de la tesis, así como la estructura de la misma.

En el capítulo dos, denominado “Equivalentes Dinámicos de Dos Generadores” se introduce el fundamento de los modelos equivalentes de dos máquinas y se hace un estudio de los métodos que se han utilizado para determinar la estabilidad en los sistemas eléctricos de potencia. El cual se centra en las aproximaciones desarrolladas según dos parámetros: I) Técnicas de representación basadas en modelos equivalentes de dos máquinas y II) Un método propuesto para el desarrollo de un modelo OMIB generalizado.

En el capítulo tres, se aborda la forma de Modelar un Control Variante en el Tiempo el cual es coordinado por diagramas de bloques PID. En cada instante de tiempo nuestro modelo OMIB ajusta los parámetros del control en base al intercambio de la energía cinética que se transfiere entre los grupos descritos por el Modo Inter-área.

En el capítulo cuatro, se expone el concepto de ahorro de energía al presentar un método original para amortiguar el sistema de potencia utilizando un control en línea, para reducir drásticamente el intercambio de energía cinética entre las principales regiones. Y por ende una reducción del costo de la energía.

Finalmente en el capítulo cinco, se presentan las conclusiones generales del desarrollo de este trabajo y se proponen nuevas líneas de investigación.

1.6 REFERENCIAS

- [1] A. A. Fouad, Vijay Vittal, "Power system transient stability analysis using the transient energy function method". Ed. Prentice Hall, 1992, pp. 16-18.
- [2] K. Ogata, "*State Space Analysis of Control Systems*". Ed. Prentice Hall, 1998, pp.669-685.
- [3] P. Kundur. "*Power System Stability and Control*". Ed. New York: McGraw-Hill, 1994, pp. 1127-1132.
- [4] N.S. Nise, "*Control System Engineering*", Ed. New York: Wiley, 2004, pp.805-813.
- [5] A. Visioli, "*Tuning of PID controllers with fuzzy logic*", Proc. Inst. Elect. Eng. Contr. Theory Applicant, vol. 148, no. 1, pp. 1-8, January. 2001.
- [6] G. Rogers, "*Power System Oscillations*", Kluwer's Power Electronic and Power Systems Series, Series Editor: M.A. Pai, Canada. 2000.
- [7] Mania Pavella "*Generalized One-Machine Equivalents in Transient Stability Studies*", IEEE Power Engineering Review, January 1998.
- [8] R. Castellanos, A.R. Messina, H. Sarmiento, "*Robust stability analysis of large power systems using the structured singular value theory*", Electrical Power & Energy Systems, Elsevier, 2005, vol. 27, no5- 6, pp. 389-397.
- [9] R. Belhomme and M. Pavella, "*A composite electromechanical distance approach to transient stability*", IEEE Transactions on Power Systems, May 1991, Vol. 6, Issue 2 pp. 622-631, ISSN: 1558-0679
- [10] C. Juarez, R. Castellanos, A. R. Messina, "*Analysis of inter-area Oscillations using Time-Varying One-Machine Infinite Bus Equivalents*", IEEE Power Engineering Society General Meeting, SF California USA June 2005. ISBN 0-7803-9157-8.
- [11] C. Juarez T., A.R. Messina, D. Ruiz-Vega, "*Analysis and Control of the inter-area mode phenomenon using selective One-machine Infinite Bus dynamic Equivalents*", *Electric Power Systems Research, Volume 76, Issue 4*, pp.180-193, January 2006.
- [12] C. Juarez and A.M. Stankovic, "*Contraction analysis of power system dynamics using time-varying OMIB equivalents*", North American Power Symposium, Sep. 30 – Oct. 2, 2007.
- [13] R. Castellanos B., A. Roman M, C. Juarez T "*A New Linear Fractional Transformation Based Approach to Power System Robustness Analysis*", International Journal of Emerging Electric Power Systems, Volume8, Issue 5, 2007, Article 2, pp. 1-28.
- [14] C. Juarez, I. Martinez and Nancy Pacheco, "*Multi-Swing Trajectory Analysis using Time-Varying One-Machine Infinite Bus Equivalents*", 6th International Conference on Electrical Engineering, Computing Science and Automatic Control, Toluca, Mexico, 2009.
- [15] Damien Ernst, Mania Pavella,"*Closed-Loop Transient Stability Emergency Control*", Proceedings of the PES Winter Meeting, page 5- January 23-27 2000.

- [16] N. Pacheco M, C. Juarez T, I. Martínez C, “*Análisis y Control de la Energía Cinética Transferida en el Modo Inter-área usando una Representación Maquina Bus Infinito con PSSs Variantes en el Tiempo*”, 4to Congreso Iberoamericano de Estudiantes de Ingeniería Eléctrica (IV CIBELEC 2010) 5tas jornadas de ingeniería eléctrica, Mérida-Venezuela, 3, 2010.
- [17] Marcus T. Schilling, Roy Billinton and Marcelos Groetaers dos Santos “*Bibliography on Power Systems Probabilistic Security Analysis 1968-2008*”, International Journal of Emerging Electric Power Systems, Volume 10, Issue 3, 2009.

Capítulo 2

Equivalentes dinámicos de dos generadores

2.1 INTRODUCCIÓN

La evolución natural de las técnicas de análisis de estabilidad transitoria nos ha conducido al desarrollo de diversos métodos de análisis.

Actualmente la teoría de equivalentes dinámicos ha sido utilizada para desarrollar modelos y técnicas que predican con gran confiabilidad los parámetros críticos del sistema. Adicionalmente a esto han sido capaces de sincronizar dispositivos que amortiguan el sistema en el período de falla.

Los métodos de análisis de estabilidad en el dominio del tiempo basado en la extensión del criterio de áreas iguales, transforman el problema del estudio de estabilidad transitoria de un sistema multimáquinas al estudio de un sistema equivalente máquina bus infinito. La obtención de un modelo equivalente de dos generadores se ha implementado en la literatura según diferentes perspectivas. Destacan entre ellos dos enfoques principales: criterios de modelado basados en equivalentes estáticos y criterios de modelado fundados en la obtención de equivalentes dinámicos. Recientemente han surgido los métodos denominados generalizados que combinan los dos enfoques mencionados.

En este capítulo se aborda el problema de la determinación de equivalentes dinámicos basados en la generalización del criterio de áreas iguales.

2.1.1 CRITERIO DE ÁREAS IGUALES

El fenómeno de estabilidad se encuentra asociado al mantenimiento de la operación en sincronismo del sistema, y por lo tanto, generalmente los estudios de estabilidad se asocian al estudio de la operación de las máquinas eléctricas. No obstante existen perturbaciones que pueden provocar el colapso del sistema y que no se encuentran asociadas directamente a la pérdida del sincronismo de este, sino por ejemplo a la caída incontrolable de la tensión.

Sin embargo, en la práctica son los fenómenos asociados a la estabilidad del ángulo del rotor de las máquinas sincrónicas son los que involucran mayor estudio.

Considere un generador conectado en forma radial a un bus infinito a través de una línea de transmisión.

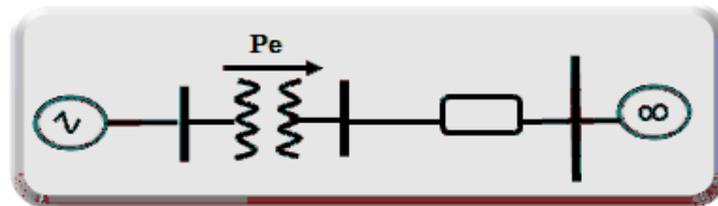


Fig. 2.1 Sistema Generador - Bus Infinito

El comportamiento dinámico del sistema puede expresarse como:

$$M \frac{d^2 \delta}{dt^2} = P_m - P_e - D \frac{d\delta}{dt} \quad (2.1)$$

con las condiciones de equilibrio $\left. \frac{d\delta}{dt} \right|_{\delta=\delta^0} = 0$, $\left. \frac{d^2 \delta}{dt^2} \right|_{\delta=\delta^0} = 0$

en donde M es la constante de inercia, P_m es la potencia mecánica, P_e es la potencia eléctrica, $\frac{d\delta}{dt}$ es la velocidad angular y δ_0 es el ángulo del rotor en la posición de equilibrio.

Con objeto de ilustrar la naturaleza del comportamiento dinámico del sistema, asuma ahora sin pérdida de generalidad que el sistema se encuentra en la condición de equilibrio para $t < 0$. En $t = 0$ se aplica un corto circuito en terminales del generador.

Multiplicando la ecuación (2.1) por ω e integrando con respecto al tiempo se tiene:

$$\frac{1}{2}M\left(\frac{d\delta}{dt}\right)^2 = \int_{\delta^0}^{\delta} (P_m - P_e)d\delta + D \int_{\delta^0}^{\delta} D\omega d\delta \quad (2.2)$$

La ecuación (2.2) establece el balance de energía en el sistema máquina bus infinito; el término del lado izquierdo representa la energía cinética acumulada en el período de falla; los términos del lado derecho representan la potencia acelerante y las pérdidas por fricción.

Despreciando las pérdidas por amortiguamiento en la ecuación (2.2) se obtiene:

$$\left(\frac{d\delta}{dt}\right)^2 = \int_{\delta^0}^{\delta} 2 \frac{(P_m - P_e)}{M} d\delta \quad (2.3)$$

en donde la potencia de aceleración es definida por $P_a=(P_m-P_e)$:

$$\frac{d\delta}{dt} = \sqrt{\int_{\delta^0}^{\delta} 2 \frac{P_a}{M} d\delta} \quad (2.4)$$

En la ecuación (2.4), se muestra que la velocidad del generador está determinada por la integral de la potencia de aceleración. En el instante inmediato a la falla, la potencia P_a es positiva y la posición angular del rotor aumenta de forma prácticamente lineal.

Si el generador mantiene el sincronismo, la nueva posición de equilibrio estará determinada por la condición de $\omega_r=0$ y el ángulo del generador alcanzará un valor máximo de retorno δ_r es igual a cero [3,4].

La figura (2.2) representa un ejemplo típico de las curvas de oscilación del sistema para los casos de pre-falla, falla y post-falla ilustrando la noción de las áreas de aceleración [Área de aceleración =A1] y área de desaceleración [Área de desaceleración =A2].

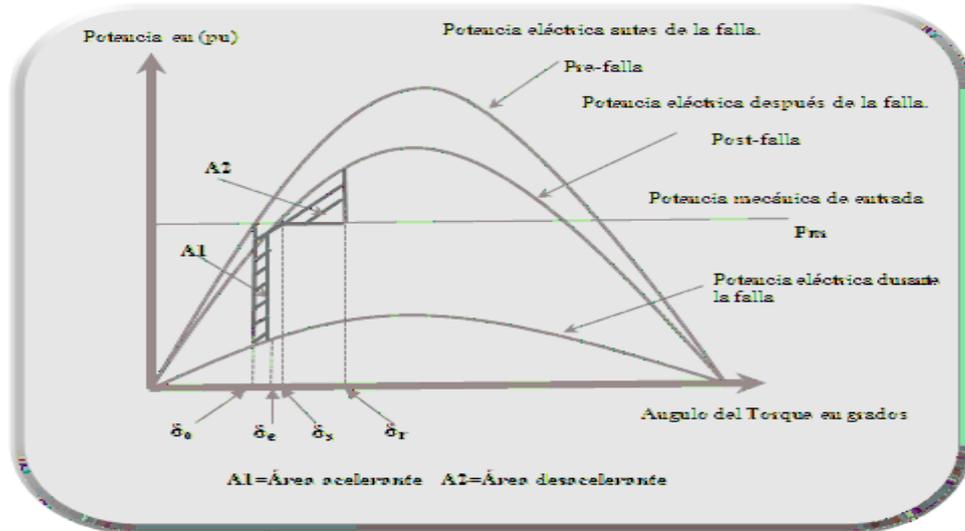


Fig. 2.2 Imagen representativa del Criterio de Áreas Iguales
 Dónde

δ_e : Es la posición angular del rotor en el instante de liberación de la falla y corresponde al final del disturbio.

δ_s : Es el ángulo donde cambia la potencia de aceleración en potencia de frenado conocido como ángulo de cambio y corresponde al cruce de la potencia mecánica con la eléctrica.

δ_r : Ángulo de retorno, representa la máxima posición angular. Si existe dicho ángulo de retorno se considera estable; pero si la potencia eléctrica cruza a la potencia mecánica después del ángulo de cambio, el sistema será inestable.

Para propósitos de análisis se asume que el sistema permanece en la condición de equilibrio δ_0 , hasta el instante en que ocurre la falla en $t=0$.

En la figura (2.2), el área de aceleración (A1) representa la energía acumulada durante el período de falla, mientras que el área de frenado (A2) representa la máxima energía potencial que le sistema puede disipar en el período de postfalla.

El área de aceleración queda expresada como:

$$A_{ac} = \int_{\delta^0}^{\delta^s} P_a d\delta = \int_{\delta^0}^{\delta^s} (P_{m_f} - P_{e_f}) d\delta \quad (2.5)$$

Donde P_{mf} , P_{ef} , representan, las potencias mecánicas y eléctricas en la condición de falla.

Un razonamiento análogo permite que:

$$A_{dec} = \int_{\delta^s}^{\delta^r} P_a d\delta = \int_{\delta^s}^{\delta^r} (P_{m_f} - P_{e_f}) d\delta \quad (2.6)$$

Donde P_{mf} , P_{ef} , representan, respectivamente, las potencias mecánicas y eléctricas en la condición de postfalla. Cabe destacar, que en el método clásico la potencia mecánica es constante y que las ecuaciones anteriores establecen las relaciones energéticas para la primera oscilación.

Las condiciones de estabilidad del OMIB pueden sintetizarse en la siguiente relación [5].

- | | | | |
|------------------------------------|----------------|----------------------------|----------------------------|
| 1. Condición de estabilidad OMIB | $P_a(tr) > 0$ | $\delta(tr)$ es máximo | $\dot{\delta}(t_r) = 0$ |
| 2. Condición de inestabilidad OMIB | $P_a(t_u) = 0$ | $\delta(t_u)$ no es máximo | $\dot{\delta}(t_u) \neq 0$ |

2.1.2 EL MARGEN DE ESTABILIDAD

Con el criterio de áreas iguales, las propiedades de la estabilidad ante un disturbio pueden ser definidas por el exceso del área de aceleración sobre el área de frenado [6]. Por lo consiguiente, el margen de estabilidad puede expresarse como:

$$\eta = A_{acelerante} - A_{desacelerante} \quad (2.7)$$

Donde el tiempo crítico de liberación corresponde al caso $\eta = 0$.

El análisis de las ecuaciones de estabilidad permite establecer las siguientes condiciones para η [1]:

- Si $\eta < 0$ el sistema es inestable
- Si $\eta > 0$ el sistema es estable

Estas condiciones sintetizan el criterio de áreas iguales. A continuación se hace una revisión de los principales métodos de análisis de estabilidad transitoria, con énfasis en el estudio de los métodos estáticos y dinámicos derivados de la utilización de programas de estabilidad transitoria y conceptos de energía.

2.2 METODOS DE ANÁLISIS FUNDAMENTADOS EN EL EQUIVALENTE DE DOS GENERADORES

Los métodos actuales de obtención de equivalentes de dos máquinas están basados en la noción física de que ante una perturbación suficientemente severa, un grupo de generadores perderá el sincronismo. La pérdida de estabilidad puede verse como la separación del sistema en dos grupos, el grupo

crítico de generadores que pierden sincronismo y el resto de generadores del sistema denominado como grupo no crítico.

Si se considera que ahora cada grupo puede remplazarse mediante un generador ficticio localizado en el centro de inercia de cada grupo, el comportamiento dinámico del sistema puede representarse mediante el intercambio de potencia de estos dos generadores equivalentes.

A partir de esta noción, el comportamiento del sistema puede entonces representarse mediante un generador equivalente conectado a un bus infinito (OMIB).

El método del equivalente OMIB puede realizarse siguiendo diferentes perspectivas. Los métodos existentes para el cálculo de equivalentes de dos máquinas pueden agruparse, conceptualmente en dos tipos:

- Modelos estáticos o invariantes en el tiempo
- Modelos dinámicos variantes en el tiempo

El procedimiento básico para determinar el equivalente OMIB consta de los siguientes pasos:

1. Encontrar el grupo de generadores críticos para una perturbación
2. Obtener de forma analítica o numérica, un sistema equivalente de dos generadores
3. Establecer el equivalente OMIB
4. Determinar los atributos instantáneos del equivalente OMIB

Aunque el procedimiento general para los tres primeros pasos es común a todos los métodos equivalentes de dos máquinas, la diferencia entre uno y otro radica en el procedimiento para determinar el grupo crítico, así como la obtención del OMIB [7,8].

A continuación se hace una revisión fundamental de las características de estos métodos centrándonos en las aproximaciones desarrolladas según dos perspectivas:

- Técnicas basadas en modelos analíticos y
- Técnicas fundadas en modelos numéricos.

El objetivo es introducir algunos conceptos necesarios para el desarrollo de equivalentes OMIB generalizados y la identificación de las limitaciones inherentes a estas metodologías.

2.2.1 MODELOS EQUIVALENTES OMIB DEL TIPO ESTÁTICO

En esta categoría pueden incluirse distintas aproximaciones de naturaleza analítica derivadas de la simplificación del modelo dinámico del sistema de potencia. Entre los ejemplos más representativos de este tipo de herramientas se encuentra el criterio extendido de áreas iguales desarrollado por Y. Xue et al, [12].

Asuma un sistema multimáquinas con ng generadores representados por su modelo clásico como una fuente de voltaje detrás de una reactancia transitoria. Por su simplicidad las cargas se representan como impedancias constantes y la red se reduce a los nodos internos de los generadores.

Para el modelo clásico las ecuaciones de movimiento del sistema con respecto a un marco de referencia síncrono arbitrario son las siguientes:

$$\frac{d\delta_i}{dt} = \omega_i, \quad M_i \frac{d\omega_i}{dt} = P_{mi} - P_{ei} - D_i \omega_i = P_{ai} \quad (2.8)$$

Para $i=1, \dots, ng$, donde

δ_i es la posición angular i del generador, M_i es la constante de inercia, P_{mi} es la potencia de entrada, ω_i es la velocidad de desviación, y P_{ai} es la potencia de aceleración. La potencia eléctrica está dada por

$$P_{e_i} = E_i^2 Y_{ii} \cos \theta_{ii} + \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^{ng} [E_i E_j Y_{ij} \cos(\delta_i - \delta_j - \theta_{ij})] \quad (2.9)$$

donde E_i, E_j , representan los voltajes internos del generador, el θ_{ij} representan los ángulos de fase, y Y_{ij} es la transferencia de las admitancias entre los nodos i, j respectivamente.

Despreciando el amortiguamiento, si asumimos que ante una perturbación de interés los generadores del sistema se separan en dos grupos; uno crítico (C) y otro no crítico (el resto del sistema) (NC), se puede establecer entonces para cada uno de ellos las ecuaciones siguientes:

GRUPO CRÍTICO

$$M_C \ddot{\delta}_C = \sum_{k \in C} (P_{m_k} - P_{e_k}) \quad (2.10)$$

GRUPO NO CRÍTICO (resto del sistema)

$$M_{NC} \ddot{\delta}_{NC} = \sum_{l \in NC} (P_{m_l} - P_{e_l}) \quad (2.11)$$

Para facilitar esta interpretación, suponemos ahora que el grupo crítico consiste en un solo generador representado por el subíndice “s”. En el modelo dinámico se obtiene al asumir adicionalmente que todos los generadores en el grupo no crítico (y en general de cada grupo) son prácticamente coherentes entre sí, esto es [9-11].

$$\delta_1 = \delta_a \quad \forall 1, a \in NC$$

Se deduce entonces, que el comportamiento dinámico del sistema se puede escribir en la forma

$$M_{NC} \ddot{\delta}_{NC} = \sum_{l \in C} (P_{m_l} - P_{e_l})$$

$$P_{e_l} = E_1^2 Y_{11} \cos \theta_{11} + E_1 E_s Y_{1s} \cos(\delta_1 - \delta_s - \theta_{1s}) + \sum_{\substack{j \in NC \\ j \neq 1}} E_1 E_j Y_{1j} \cos(\theta_{1s}) \quad (2.12)$$

Y para la maquina crítica tenemos:

$$M_{CM} \ddot{\delta}_{CM} = P_{m_{CM}} - P_{e_{CM}}$$

$$P_{e_{CM}} = E_{CM}^2 Y_{CM} \cos \theta_{CM} + \sum_{l \in NC} E_{CM} E_l Y_{1CM} \cos(\delta_{CM} - \delta_1 - \theta_{1CM}) \quad (2.13)$$

Para expresar las ecuaciones del sistema en coordenada del OMIB se define

$$M_{OMIB} \ddot{\delta}_{OMIB} = P_m - [P_c + P_{\max} \sin(\delta_{OMIB} - \nu_{OMIB})] \quad (2.14)$$

en donde , $\delta_{OMIB} = \delta_{CM} - \delta_{NC}$ es el ángulo del OMIB, y

$$M_{OMIB} = \frac{M_{CM} M_{NC}}{M_T}; \quad M_T = \sum_{i=1}^{ng} M_i;$$

$$P_m = M_T^{-1} \left(M_a P_{m_{CM}} - M_{CM} \sum_{l \in NC} P_{m_l} \right) \quad P_c = M_T^{-1} \left(M_a E_{CM}^2 G_{CM} - M_{CM} \sum_{1, j \in NC} E_1 E_j G_{1j} \right)$$

$$P_{\max} = \sqrt{(E^2 + D^2)}; \quad \nu_{OMIB} = -Tg^{-1} \left(\frac{E}{D} \right)$$

$$E = \frac{M_a - M_{CM}}{M_T} \sum_{l \in A} E_{CM} E_l E_{s1}; \quad D = \sum_{l \in A} E_{CM} E_l E_{s1}$$

Los parámetros $M_{omib}, P_m, P_{max}, V_{omib}$ son constantes para las condiciones de prefalla, falla y postfalla. Y. Xue, et al., [12,13] realiza una justificación de la obtención y aplicación de la ecuación 2.14

La principal ventaja de este tipo de formulaciones es la rapidez del análisis de estabilidad transitoria. Su principal desventaja se deriva de la limitada capacidad para incluir modelos detallados del sistema de potencia. Ejemplos de este tipo de formulaciones incluye el criterio extendido de áreas iguales (EEAC).

2.2.2 MODELOS EQUIVALENTES OMIB DEL TIPO DINÁMICO

Una de las limitaciones fundamentales de los enfoques analíticos es su capacidad para permitir un modelado detallado del sistema de potencia.

Esto ha motivado el desarrollo de métodos de análisis, que combinan la utilización de un simulador de estabilidad transitoria con el criterio generalizado de áreas iguales.

Este tipo de modelos incluyen el método máquina bus infinito. Y otros métodos de análisis de estimación dinámicas entre los que se encuentran métodos basados en funciones de energía [10].

Sean MC y NC los conjuntos de generadores pertenecientes al grupo crítico y no crítico o resto del sistema respectivamente. Siguiendo un mecanismo de deducción análogo al utilizado para los modelos analíticos, el comportamiento instantáneo del ángulo del centro parcial de área de los dos grupos pueden entonces expresarse mediante las ecuaciones siguientes [9]:

$$\delta_C(t) = M_C^{-1} \sum_{i \in C} M_i \delta_i(t) = M_C^{-1} \sum_{i=1}^{g_c} M_i \delta_i(t) \quad ; \quad (2.15)$$

$$\delta_{NC}(t) = M_{NC}^{-1} \sum_{j \in NC} M_j \delta_j(t) = M_{NC}^{-1} \sum_{j=1}^{g_{nc}} M_j \delta_j(t) \quad (2.16)$$

en donde g_c y g_{nc} representan los generadores del grupo crítico y no crítico o el resto del sistema respectivamente.

$$M_C = \sum_{i \in C} M_i = \sum_{i=1}^{g_c} M_i, \quad M_{NC} = \sum_{j \in NC} M_j = \sum_{j=1}^{g_{nc}} M_j \quad (2.17)$$

Por consiguiente, el comportamiento dinámico equivalente para cada centro de área puede expresarse como:

$$M_C \dot{\delta}_C(t) = \sum_{i=1}^{gc} (P_{mci}(t) - P_{eci}(t)) \quad M_{NC} \dot{\delta}_{NC}(t) = \sum_{j=1}^{gnc} (P_{mncj}(t) - P_{encj}(t)) \quad (2.18)$$

Definiendo el ángulo OMIB como $\delta_{omib}(t) = \delta_C(t) - \delta_{NC}(t)$ el comportamiento del OMIB puede expresarse como:

$$\begin{bmatrix} \dot{\delta}_{OMIB} \\ \dot{\omega}_{OMIB} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \omega_{OMIB} \\ \frac{1}{M_{OMIB}} (P_{m_{OMIB}} - P_{e_{OMIB}}) \end{bmatrix} \quad (2.19)$$

en donde

$$\begin{aligned} P_{m_{OMIB}} &= M_{OMIB} \left(\frac{1}{M_{CM}} \sum_{i \in CM} P_{m_i} - \frac{1}{M_{NC}} \sum_{j \in NC} P_{m_j} \right) \\ P_{e_{OMIB}} &= M_{OMIB} \left(\frac{1}{M_{CM}} \sum_{i \in CM} P_{e_i} - \frac{1}{M_{NC}} \sum_{j \in NC} P_{e_j} \right) \end{aligned} \quad (2.20)$$

$$\begin{aligned} M_{CM} &= \sum_{i \in CM} M_i \quad ; \quad M_{NC} = \sum_{j \in NC} M_j, \\ M_{OMIB} &= \frac{M_{CM} M_{NC}}{(M_{CM} + M_{NC})}, \end{aligned} \quad (2.21)$$

Una manera práctica para construir un modelo en 3D variante en el tiempo, es a partir de la ecuación (2.19) y obtener de forma numérica la velocidad y aceleración como:

$$\begin{cases} \omega_{OMIB} \approx \nabla \delta_{OMIB} \\ \dot{\omega}_{OMIB} \approx \nabla^2 \delta_{OMIB} \end{cases} \quad (2.22)$$

Este tipo de métodos obtienen el modelo OMIB a partir de las variables de salida de un simulador de estabilidad transitoria. La diferencia fundamental entre este tipo de modelos reside en la identificación de los generadores críticos y el cálculo del OMIB. En el análisis de este tipo de equivalentes es preciso indicar lo siguiente:

- Por su naturaleza, este tipo de enfoques no presentan restricciones de modelado; el nivel de detalle en la representación del sistema, es por definición, el de simulador de estabilidad transitoria utilizado en el

análisis.

- El equivalente OMIB es numérico, por lo que en principio no se tienen soluciones de forma analítica.

La potencia eléctrica no es senoidal. Sin embargo, en el estudio de las oscilaciones múltiples, cada tramo de la función es aproximada mediante una función senoidal que puede contener una armónica fundamental o varias componentes armónicas [14].

La principal limitación es su incapacidad para obtener expresiones analíticas de interés para el análisis de diversos aspectos del comportamiento dinámico del sistema, concretamente, el estudio de la estabilidad multioscilación.

La determinación de un modelo OMIB con la capacidad de aproximar el comportamiento dinámico del sistema en cada instante de la trayectoria dinámica requiere la solución de dos aspectos:

- I. La identificación de los generadores que conforman el grupo crítico en cada instante de tiempo definido por el simulador de estabilidad transitoria.
- II. El cálculo de los parámetros instantáneos del modelo equivalente.

2.3 MÉTODO PARA EL DESARROLLO DE EQUIVALENTES OMIB GENERALIZADOS

En este apartado se presenta el desarrollo de equivalentes dinámicos OMIB generalizado.

La herramienta analítica generaliza, los métodos existentes para permitir en forma sistemática el estudio de la estabilidad multioscilacion y el cálculo de parámetros instantáneos del sistema.

En la figura 2.3 se resume en forma esquemática el diagrama a seguir.

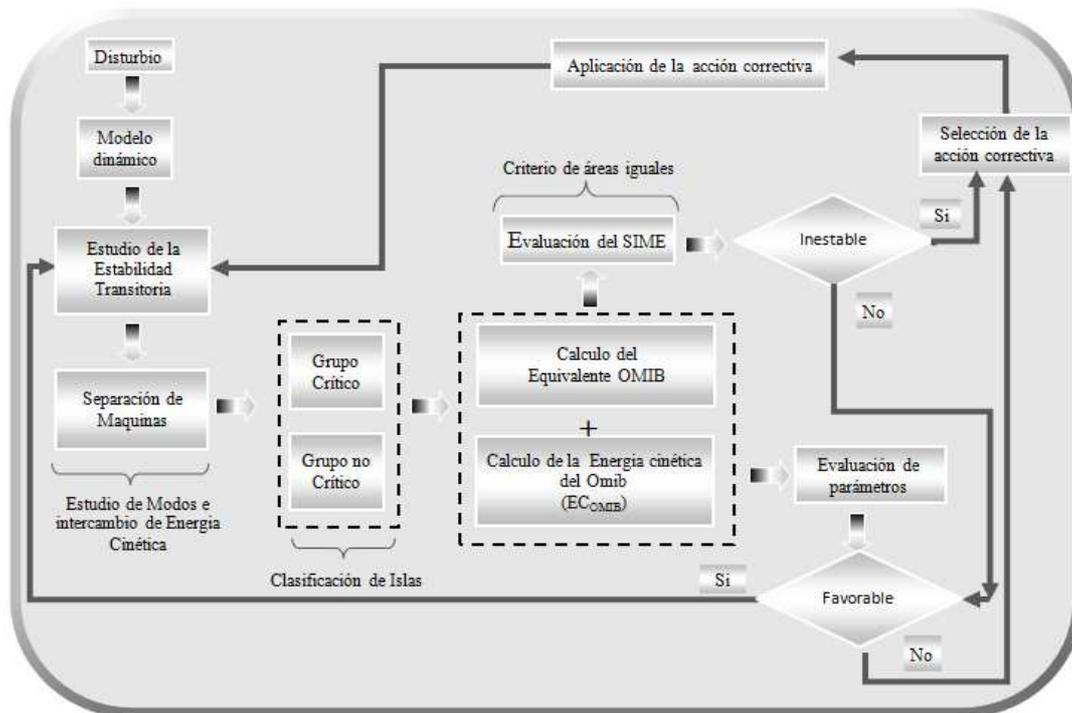


Figura 2.3 Diagrama para la obtención y el cálculo de atributos generalizados OMIB [15].

El procedimiento puede implementarse para la evaluación en línea de acciones de control [15]. A continuación se describen brevemente, las características de las etapas.

2.3.1 IDENTIFICACIÓN DEL GRUPO CRÍTICO

El cálculo del OMIB requiere la solución de dos aspectos fundamentales la identificación de los generadores críticos y el cálculo del modelo OMIB [7].

Donde los algoritmos desarrollados en este trabajo para la identificación de los generadores críticos, están basados en la noción física de que los generadores que pierden sincronismo, son aquellos que presentan una mayor velocidad relativa en la condición de prefalla.

Dicho algoritmo se describe en tres secciones las cuales son:

1. Se indica el generador con mayor velocidad absoluta. En cada paso de integración se permite determinar la velocidad instantánea de cada máquina (la forma de calcular la velocidad instantánea es por medio de la primera derivada numérica del ángulo de cada generador).
2. Se clasifican los grupos por medio de un criterio que identifica las máquinas con mayor velocidad instantánea.

3. El procedimiento es iterativo hasta que el grupo de generadores críticos identificados pierde la estabilidad.

Para la implementación de este algoritmo se utilizó el siguiente criterio heurístico:

- Se determina el generador con mayor velocidad absoluta en el período de falla, i.e.

$$\omega_{\max} = \max(\omega_i)$$

- Se establece un límite inferior para determinar el generador con menor velocidad que pertenece al grupo crítico. i.e.

$$Lim_{\inf} = k(\omega_{\max})$$

- Se incluyen en el grupo crítico a todos aquellos generadores cuya velocidad sea mayor al límite inferior, i.e.

$$\omega_i \in C_si_ \omega > Lim_{\inf}$$

Este procedimiento se repite para cada paso de iteración de la simulación numérica y que el grupo crítico puede variar cuando hay acciones de control y otros cambios importantes en el sistema. El esfuerzo del cálculo de este procedimiento es mínimo, y los resultados obtenidos son precisos para los distintos escenarios de operación considerados.

La forma de calcular la velocidad instantánea es por medio de la primera derivada numérica del ángulo de cada generador.

2.3.2 CÁLCULO DEL MODELO OMIB

El cálculo del OMIB se realiza en dos pasos:

1. Se calcula un equivalente ficticio representando el comportamiento dinámico de los ángulos parciales de área mediante las expresiones (2.15), (2.16).
2. El comportamiento dinámico del OMIB siguiendo los procedimientos expuestos en la sección 2.2.2

En los pasos intermedios se desarrollan criterios para el cálculo de diferentes parámetros del sistema.

2.3.3 DESARROLLO DE LOS OMIB GENERALIZADOS.

El comportamiento del sistema puede ser expresado como

$$\begin{aligned} \dot{\delta}_{omib}(t) &= \omega_{omib}(t) \\ \dot{\omega}_{omib}(t) &= \frac{1}{M_{omib}(t)} [Pm_{omib}(t) - Pe_{omib}(t) - D_{omib}(t) * \omega_{omib}(t)] \end{aligned} \quad (2.23)$$

en donde las potencias mecánicas y eléctricas y los parámetros instantáneos se determinan a partir de las salidas del simulador de estabilidad transitoria.

Conceptualmente, una simplificación fundamental al problema del cálculo de equivalentes instantáneos se obtiene en este trabajo al reconocer que el modelo OMIB en (2.23) puede considerarse como un caso particular de la ecuación de movimiento de un sistema no lineal de segundo orden de la forma

$$\ddot{\delta}_{omib_g}(t) + c(t)\dot{\delta}_{omib_g}(t) + \alpha(t)\delta_{omib_g}(t) + N(\delta_{omib_g}(t), \omega_{omib_g}(t)) = u(t) \quad (2.24)$$

o, equivalente,

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \delta_{omib_g}(t) \\ \omega_{omib_g}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \omega_{omib_g}(t) \\ u(t) - c(t)\omega_{omib_g}(t) - \alpha(t)\delta_{omib_g}(t) - N(\delta_{omib_g}(t), \omega(t)) \end{bmatrix} \quad (2.25)$$

en donde la función continua en el tiempo, $N(\delta_{omib}(t), \omega_{omib}(t))$ representa la parte no lineal del sistema y los coeficientes c, α representan parámetros variantes en el tiempo que se desean identificar; la función $u(t)$ representa la fuerza externa aplicada al sistema.

La determinación del OMIB generalizado comprende los siguientes pasos:

1. Para cada instante de tiempo, se expresa el comportamiento dinámico del OMIB en forma descrita por (2.23).
2. A partir de esta representación se identifica un modelo de la forma (2.24) y (2.25).
3. La separación de los grupos se realiza como se describió en la sección (2.3.1).
4. Dada la identificación de los grupos es posible determinar atributos generalizados OMIB del sistema (2.25).
5. Determinar el margen de estabilidad OMIB (por medio del criterio

de áreas iguales) y la evaluación de parámetros generalizados OMIB.

6. Se desarrollan medidas correctivas, como se describe en la figura 2.3.

En contraste con las formulaciones convencionales, los modelos generalizados combinan las dos principales características de los métodos de análisis estáticos y dinámicos, ventajas computacionales y la capacidad de obtener expresiones analíticas.

2.3.4 OBTENCIÓN DE LOS MODELOS INSTANTÁNEOS OMIB

Para ilustrar la naturaleza del modelo propuesto, consideramos que el comportamiento dinámico del sistema puede expresarse mediante la ecuación (2.23). El objetivo es identificar los parámetros instantáneos y construir un modelo analítico para cada instante de tiempo.

En la evaluación de los parámetros modales se investigaron dos procedimientos analíticos para la determinación de éstos:

1. Se basa en aproximar la potencia eléctrica mediante la expresión en series de Taylor de la forma

$$N(\delta_{omib}(t), \omega_{omib}(t)) = \beta(t)(\delta_{omib}(t))^2 + \gamma(t)(\delta_{omib}(t))^3 + \dots \quad (2.26)$$

en donde los coeficientes $\beta(t), \gamma(t), \dots$ representan parámetros variantes en el tiempo, que se determinan mediante un proceso de identificación; el orden de la función polinomial $N(\delta_{omib}(t), \omega_{omib}(t))$ está determinado por la exactitud requerida en el proceso.

2. En este enfoque, la potencia del OMIB se expresa mediante una función senoidal de la forma

$$P_{e_{omib}}(t) = \alpha_{omib}(t) \text{sen}(\beta_{omib}(t)\delta_{omib}(t) + \varphi_{omib}(t)) \quad (2.27)$$

en donde $\alpha_{omib}(t), \beta_{omib}(t)$ y $\varphi_{omib}(t)$ representan parámetros variantes en el tiempo que se determinan a partir de la potencia eléctrica instantánea.

En general, en el estudio de oscilaciones electromecánicas se encontró que el último enfoque permite obtener resultados de mayor interés.

2.3.5 DETERMINACIÓN DE LOS PARÁMETROS INSTANTÁNEOS OMIB

La determinación de los parámetros instantáneos del sistema comprende los siguientes pasos:

1. Para cada instante de tiempo se determina el modelo OMIB generalizado, sección 2.3.3.
2. Se utiliza un método de identificación de los parámetros instantáneos para la expresión de interés y se determinan los parámetros.
3. Se realiza la evaluación de los parámetros instantáneos
4. Se determinan las acciones de control para mejorar el amortiguamiento del sistema.
5. Se realiza la aplicación de la acción correctiva.

Para determinar los parámetros instantáneos se partió de la representación (2.24), el comportamiento dinámico del sistema se expresa en forma generalizada como

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \delta_{omib_g}(t) \\ \omega_{omib_g}(t) \end{bmatrix} = J_{omib}(t) \begin{bmatrix} \Delta \delta_{omib_g}(t) \\ \Delta \omega_{omib_g}(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} o \\ h(\delta_{omib}(t), \omega_{omib}(t)) \end{bmatrix} \quad (2.28)$$

en donde J_{omib} es el Jacobiano del OMIB para cada instante de tiempo y los parámetros se identifican para cada paso de integración, la función $h(\delta_{omib}(t), \omega_{omib}(t))$ representa términos no lineales de segundo orden y mayores.

En la figura 2.4 está indicado la posibilidad de determinar los parámetros instantáneos de dos formas:

- Realizar la simplificación de despreciar los términos de orden superior, indicada con una línea continua.
- Elegir un orden de grado dos o superiores es decir $h(\delta_{omib}(t), \omega_{omib}(t)) \neq 0$ indicada con línea punteada. En este trabajo se utilizó un modelo lineal.

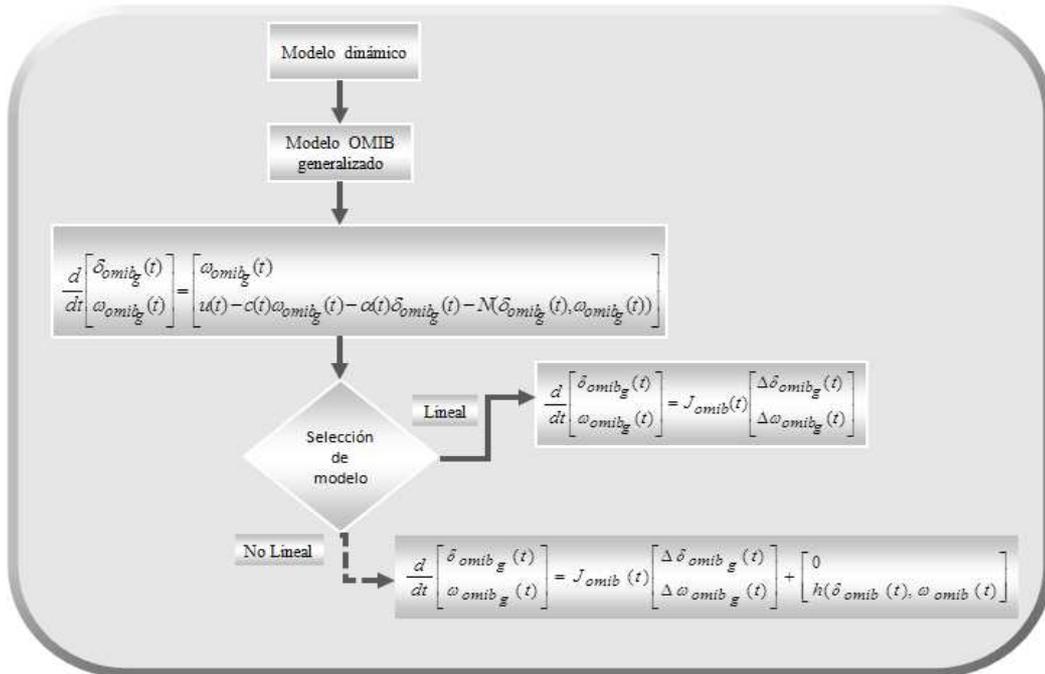


Figura 2.4 Selección de los parámetros instantáneos [15].

De lo anterior podemos destacar que:

- El metodo SIME combina el equivalente OMIB y el EAC
- La $P_{e_{OMIB}}$ y $P_{a_{OMIB}}(t)$ son sinusoidales
- El coeficiente de inercia M_{OMIB} es constante para cada equivalente OMIB
- La aceleración del OMIB, $\ddot{\delta}_{OMIB}$, puede ser obtenida por la derivación numérica de la velocidad, i.e., $\ddot{\delta}_{OMIB} = d(\omega_{OMIB}(t))/dt$
- Los parámetros OMIB pueden ser usados para el estudio de la estabilidad transitoria con EAC.

Los supuestos matemáticos presentados son matemáticamente razonables y favorables a una teoría compacta. Puesto que el objetivo de estos enfoques es estudiar el comportamiento dinámico del sistema con base en un detallado análisis y representación del sistema en estudio.

2.4 REFERENCIAS

- [1] Pavella M, Damien Ernest, D.R Vega, "Transient stability of power systems", Kluwer Academic Publishers, Belgium 2000, ISBN 0-7923-7963-2.
- [2] EPRI, Interconnected Power System Dynamics Tutorial, Enero 1998.
- [3] A. A. Fouad, Vijay Vittal, "Power system transient stability analysis using the transient energy function method". Ed. Prentice Hall, 1992, pp. 16-18.
- [4] Paul M Anderson and A. A Fouad, "Power system control and stability", IEEE PRESS Power Systems Engineering series, New York 1994.
- [5] W.D Stevenson, "Análisis de Sistemas Electricos de Potencia". Mc. Graw Hill, Mexico 1979.
- [6] D.R Vega, "Dynamic security assessment and control: transient and small signal stability", Tesis Doctoral, Universidad de Liege, 2002.
- [7] Regine Belhomme, "Distances electromecaniques on stabilite transitoire", Tesis Doctoral, Universidad de Liege, 1990.
- [8] V. Vittal, S. Rajagopal, et, al., "Transient stability analysis of stressed power systems using the energy function method", IEEE Trans. on Power System, vol. 3,no. 1,Febrero 1998, pp 23-244.
- [9] Z Q. Wu, "Single machine equal are criterion for Multimachine system stability assessment based on time domain simulation", IEEE Power Engineering Review, November 2001, pp.51-52.
- [10] Y Zhang, L Wehenkel, P Rousseaux, M Pavella, "SIME: Hybrid approach to fast transient stability assessment and contingency selection" International journal of electric power and energy systems,vol,19,No.3 pp.195-208,1997
- [11] M. Pavella "Generalized one-machine equivalents in transient stability studies", IEEE Power Engineering Review, January 1998, pp. 50-52.
- [12] Y. Xue, Th. Van Cutsem, M. Ribbens-Pavella, "Extended equal-area criterion justifications, generalizations, applications" IEEE Trans. on Power System, Vol.4, No.1,February 1989,pp. 44-52.
- [13] Y. Xue, L. Wehenkel, E. Euxibie, B. Heilbronn, R. Belhomment, P Rousseaux, M. Pavella, J.F Lesigne, "Extend equal area criterion revisited", IEEE Trans. On Power Systems, Vol.7 no.3, August 1992, pp. 1012-1022.
- [14] D. Ruiz V, A. R Messina, M. Pavella, "An approach to on-line assessment of power system damping". IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems, 2003.
- [15] C. J. Toledo "Determinación de Modelos Equivalentes de Dos Máquinas Para el Estudio de la Estabilidad Transitoria". Tesis Maestría, Universidad de Guadalajara, 2003.

Capítulo 3

Diseño y Aplicación de un PSS Variante en el Tiempo Utilizando el Concepto de Energía Cinética Transferida en el Modo Inter-área

3.1 INTRODUCCIÓN

El modelo y análisis de oscilaciones electromagnéticas ha constituido un área de especial interés en la aplicación de métodos basados en equivalentes de dos generadores. Estos trabajos abordan fundamentalmente la determinación de las características de amortiguamiento del sistema a partir del modelo OMIB.

El objetivo de este capítulo es la evaluación del amortiguamiento instantáneo y el diseño de acciones de control, se ha propuesto la utilización de métodos de identificación lineal como Pony o Fourier. Para tratar con modelos más complejos y el desarrollo de acciones de control [1].

Donde se investiga la aplicación de los métodos de estudio desarrollados al análisis y control de las oscilaciones electromecánicas. Se busca profundizar en el análisis de la capacidad de este tipo de métodos para identificar las características relevantes del sistema en el estudio de las oscilaciones electromecánicas de los Modos Local e Inter-área y se proponen técnicas basadas en el estudio del cálculo de la energía cinética, para determinar la magnitud de las oscilaciones y el amortiguamiento del sistema.

Finalmente se verifica la aplicación de la teoría expuesta en un modelo de la IEEE constituido por cuatro generados, dejando la teoría asentada para ser aplicada en un modelo más complejo.

1.2 ENERGÍA CINÉTICA OMIB

Las oscilaciones electromecánicas inter-área tienen su origen físico en el intercambio de energía cinética entre grupos de generadores. En este contexto, el modelo OMIB representa el comportamiento del sistema de potencia mediante un modelo equivalente de dos generadores; el cambio de energía entre estos dos generadores proporciona información específica sobre el intercambio de energía cinética del sistema y la naturaleza del proceso oscilatorio.

Con el objetivo de ilustrar las ideas expuestas, asuma el comportamiento instantáneo del sistema expresado de la siguiente forma:

$$M_C \ddot{\delta}_C = \sum_{k \in C} (P_{mk} - P_{ek}) \quad (3.1)$$

$$M_{NC} \ddot{\delta}_{NC} = \sum_{l \in NC} (P_{ml} - P_{el}) \quad (3.2)$$

Se deduce entonces, que la energía cinética instantánea de cada grupo estará dada por las relaciones

$$E_{CC}(t) = \frac{1}{2} M_C(t) \omega_C^2(t) \quad (3.3)$$

$$E_{CNC}(t) = \frac{1}{2} M_{NC}(t) \omega_{NC}^2(t) \quad (3.4)$$

Entonces:
$$E_{Comib}(t) = \frac{1}{2} M_{omib}(t) \omega_{omib}^2(t) \quad (3.5)$$

Las ecuaciones (3.1) a (3.5) describen en este análisis las relaciones energéticas de interés para el estudio de interacción entre los dos grupos equivalentes.

Una vez que se ha determinado el modelo OMIB, estas relaciones se utilizan para cuantificar la magnitud y características del fenómeno inter-área.

1.3 MODOS EMPLEADOS EN EL ANÁLISIS DE LA ESTABILIDAD

La frecuencia a la que normalmente oscila un sistema de potencia es de 60 Hz. Cuando ocurren perturbaciones en el sistema, se originan oscilaciones no deseadas de potencia, voltaje y corriente que presentan frecuencias de oscilación diferentes a 60 Hz. Estas oscilaciones pueden ser perjudiciales para

el sistema. Cuando dichas oscilaciones no deseadas aparecen, generalmente tienen una frecuencia mucho más baja que la frecuencia nominal del sistema. Valores típicos de dichas frecuencias oscilan entre 0.05Hz y 3Hz. Las oscilaciones cuya frecuencia es menor de 1 Hz son las que pueden ocasionar mayores daños al sistema de potencia, dado que pueden ser no amortiguadas. Las frecuencias típicas de oscilación se dividen comúnmente en cuatro modos de oscilación, las cuales presentan mayor interés en estudios de estabilidad de sistemas de potencia y que dependiendo de la naturaleza de la frecuencia y del factor de participación son:

- A. **Modos locales (LM):** se presentan cuando las unidades de una estación generadora oscilan con respecto al resto del sistema, el cual se ve como una barra infinita. Estos modos de oscilación presentan frecuencias que oscilan en el rango de 0.7 a 1.5 Hz.

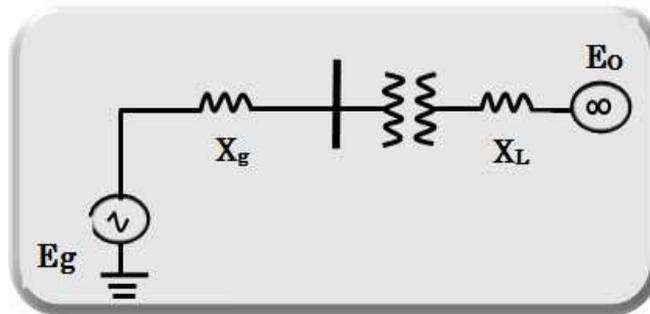


Figura 3.1. Modo local

- B. **Modos Inter-área (IAM):** se presentan cuando un grupo de máquinas en una parte del sistema oscilan con respecto a otro grupo en otra parte del sistema, entre los cuales existe una conexión a través de una línea de transmisión generalmente larga. Este modo de oscilación se da entre 0.1 y 0.7 Hz. Estos modos de oscilación, junto con los modos locales, tienen una naturaleza electromecánica y están asociados con los rotores de los generadores.

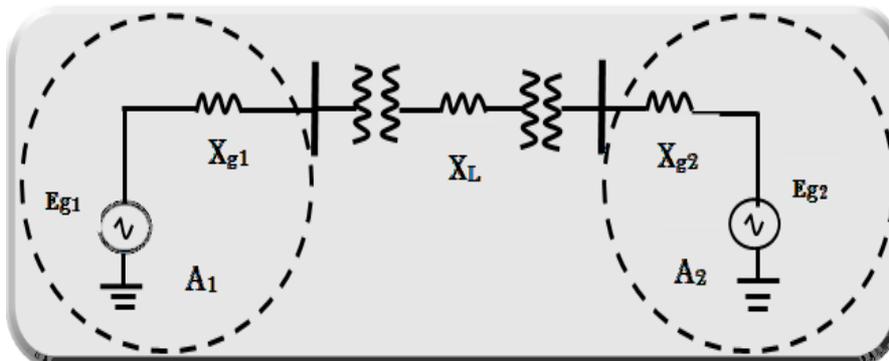


Figura 3.2 Modo Inter-área

C. **Modos locales (Intra-planta):** Estos modos comúnmente llamados Intra-planta, ocurren entre unidades dentro de una misma subestación o región, la frecuencia usualmente está en el rango de 0.9 Hz a 2.0 Hz.

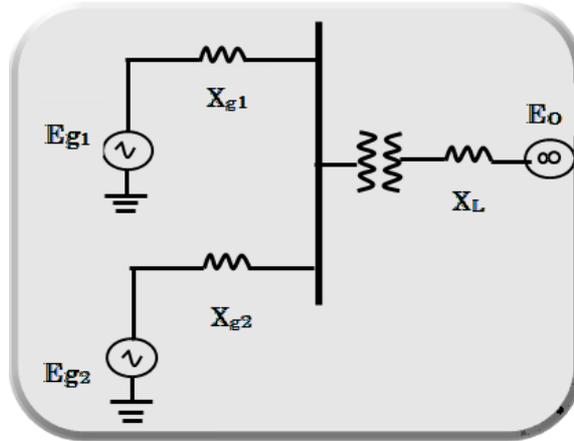


Figura 3.3 Modo Intra-planta

D. **Modo Intra-área.** Están asociados con la oscilación de una región contra otra no necesariamente cercana y la característica es que la excitación de su frecuencia esta entre 0.05 y 0.5 Hz.

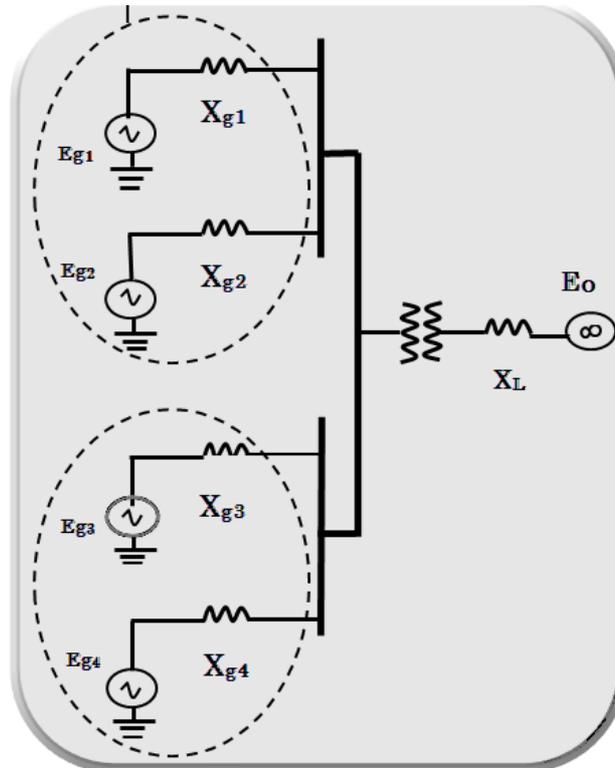


Figura 3.4 Modo Intra-área

Es de aclarar que un “modo” se entiende como una resonancia del sistema (frecuencia de oscilación natural del sistema), que se identifica por una combinación de su frecuencia de oscilación, amortiguamiento y diagrama de participaciones; el diagrama de participaciones indica que elementos del sistema oscilan entre sí. De la misma forma que se habla de un modo o de una frecuencia de resonancia en un circuito LC, en un SEP se puede hablar de muchos modos

1.4 APLICACIÓN DEL ESTABILIZADOR DE POTENCIA

En la siguiente sección se presenta la aplicación de la metodología desarrollada al mejoramiento de la estabilidad del modo inter-área. Para los propósitos del estudio se consideró la utilización de la desviación de cada generador como señal suplementaria [2].

El diseño convencional de los PSS utilizado en este capítulo, se basa en la combinación de análisis modal, asignación de modos y análisis de sensibilidades utilizando el parámetro de la energía cinética como línea de retroalimentación [3,4].

En la figura 3.5 se muestra la estructura del control PSS considerado en los estudios presentados. Para propósitos de análisis, la ganancia del estabilizador G_{kpss} , se ajustó para lograr el amortiguamiento deseado en las características de estabilidad en el modo de interés.

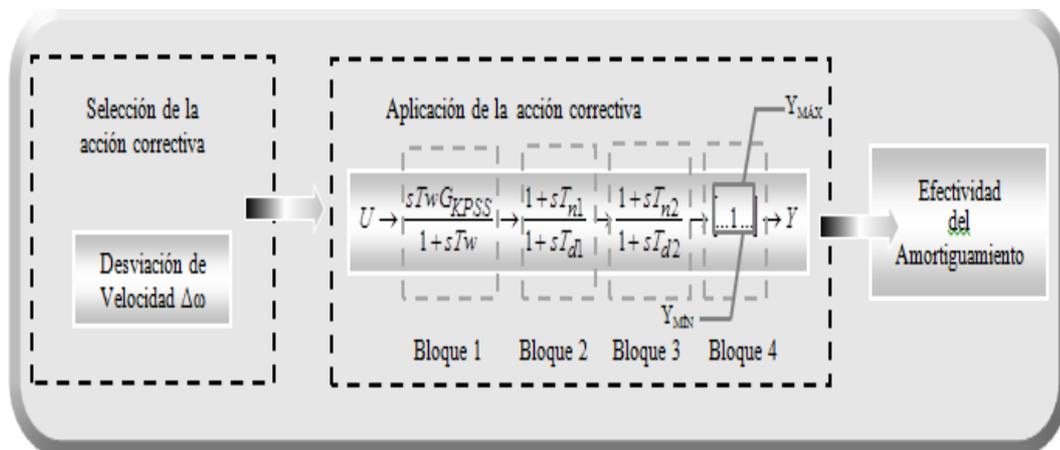


Figura 3.5 Estructura del estabilizador de potencia considerado para estos estudios.

Donde se observa que el estabilizador se divide en cuatro etapas: Se comienzan con algunas señales de entrada (U) comunes como son la velocidad, la frecuencia y la potencia, el primer bloque es de compensación de fase y ganancia, cuyo objetivo es el de amortiguar oscilaciones de baja frecuencia que afectan la estabilidad del sistema; el boque 2 es el efecto de filtros paso/alto , el bloque 3 es la compensación de adelanto -atraso de fase conocido como circuito “washout”, el cual permite llevar la salida (Y) del controlador a cero en

condiciones de estado estable y finalmente el bloque 4, es conocido como el bloque limitador propio del control PSS. Cuya función de transferencia queda expresada por la siguiente expresión:

$$U(s) = G_{kPSS} \frac{sT_W}{1 + sT_W} \left[\frac{(1 + sT_{n1})(1 + sT_{n2})}{(1 + sT_{d1})(1 + sT_{d2})} \right] Y(s) \quad (3.6)$$

El formato de datos para el PSS es mostrado

Bloque	Símbolo	Parámetro	Unidad
1	<i>GPSS</i>	Ganancia	%
2	<i>TW</i>	Tiempo constante (del filtro paso-alto)	s.
	<i>Tn1</i>	primer tiempo de inicio constante (entrega) Tn1	s.
	<i>Td1</i>	Primer tiempo de retraso	s.
3	<i>Tn2</i>	Segundo tiempo de inicio constante (entrega)	s.
	<i>Td2</i>	Segundo tiempo de retraso constante	s.
4	<i>Ymáx</i>	Límite máximo de salida	pu
	<i>Ymín</i>	Límite mínimo de salida	pu

TABLA 3.1 Parámetros del control del PSS

La estructura del control que se utiliza, consiste de componentes PID en cascada con la inclusión de filtros del tipo adelanto-atraso, donde se muestra como estos controles actúan a través de los sistemas de excitación; puesto que su función es desarrollar un componente de par eléctrico en fase con las desviaciones de la velocidad del rotor para amortiguar los modos electromecánicos Locales o Inter-área.

Se verifica que la excitación de dichos modos ocasiona que un cluster de ellos oscile en contrafase respecto al resto del sistema, manifestándose en un cambio de energía en el sistema (intercambio de energía cinética).

3.5 AMORTIGUAMIENTO DEL MODO INTER-ÁREA (IAM)

El uso de variables en el tiempo de equivalentes OMIB para analizar la raíz de los grandes disturbios del modo IAM ha sido recientemente propuesto para el control en línea y la evaluación de las oscilaciones transitorias en el marco del método de la máquina equivalente SIME.

Por ello la importancia del análisis del fenómeno del Modo Inter-área, el cual se caracteriza por la separación de un gran grupo de generadores (máquinas más sobreexcitadas) del resto del sistema lo que implica la no linealidad, y el comportamiento no estacionario que surge de la interacción de los modos fundamentales de oscilación.

La extracción y la representación fiel de estas características de una simulación de estabilidad transitoria permiten la identificación de la modalidad dominante de la separación de los grupos críticos implicados en las oscilaciones y el intercambio de energía entre los modos u oscilaciones [5,6].

3.5.1 ACCIONES DEL CONTROL DEL PSS EN LÍNEA

El PSS variante en el tiempo es utilizado por planificación de la ganancia. En este método, el algoritmo de planificación de la ganancia, hace uso de la Tabla 3.1, en la que están especificados los parámetros de los reguladores a utilizar para cada uno de las condiciones de operación del sistema

A) ALGORITMO PARA EL ESTUDIO DEL INTERCAMBIO DE ENERGÍA CINÉTICA AJUSTANDO G_{KPSS}

En este estudio se emplea el modelo del PSS figura 3.5. Donde la función de transferencia del i-ésimo estabilizador está dada por la ecuación (3.6).

- a) Se especifican las condiciones del sistema a analizar
- b) Se inicia el algoritmo con parámetros fijos del PSS iguales a 50%.
- c) Se calcula la respuesta del sistema de potencia ante el PSS, que se especifica en un archivo de conmutación (base de datos de programa de 2 áreas).
- d) Se llama el archivo de la base de datos del sistema a simular, donde se calcula el OMIB, del ángulo OMIB, la velocidad OMIB y la energía cinética transferida OMIB.

- e) Se aplica en línea un aumento en la ganancia de los PSS del 50 a 95% para el área 2 (control del modo local) y para el área uno de 50 a 90% con combinación del aumento del área 1 mencionado anteriormente (control del modo inter-área).
- f) Se grafican la velocidad y el ángulo del OMIB para cada valor de G_{KPSS} analizado y se observa la efectividad del control diseñado.
- g) Finalmente si el amortiguamiento no es adecuado, se regresa al punto b).

Una de las principales características de estos métodos es la búsqueda de robustez en la operación de redes de potencia de gran dimensión. El modelo variante en el tiempo es coordinado por medio de funciones de energía logrando amortiguar la dinámica de las variaciones previsibles que se presenten [7,8].

3.6 SISTEMA DE PRUEBA

En el presente trabajo se utilizó el modelo de dos áreas con cuatro generadores del IEEE [9,10], lo que permite dejar la teoría asentada para ser analizada de manera inmediata una red con topología más compleja (capítulo cuatro).

El diagrama unifilar del sistema de prueba se muestra en la Fig.3.6. El sistema consta de dos áreas idénticas conectadas por dos líneas de transmisión. En cada área, hay dos generadores, en los buses 1 y 2 en la zona 1, y en los buses 11 y 12 en la zona 2. Las cargas están en el bus 4 en el área 1, y en el bus 14 en el área 2.

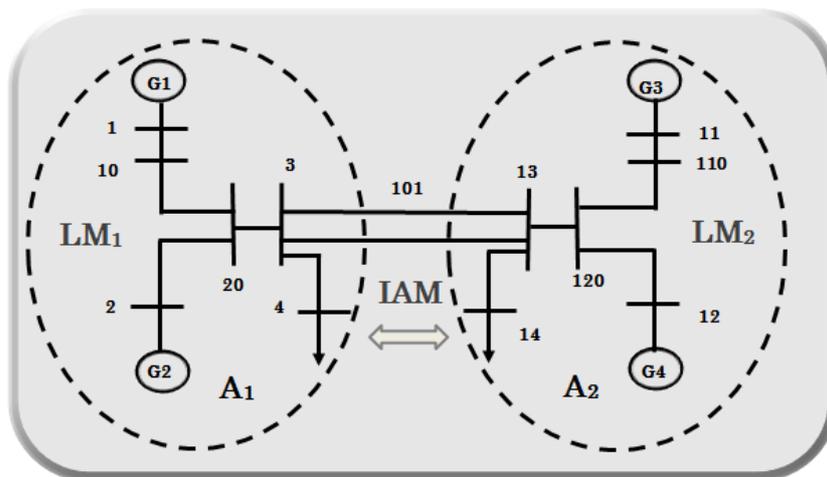


Figura 3.6 Sistema de dos áreas del IEEE.

A) Análisis de Agrupación (Clustering Analysis)

Debido a la topología de la red del sistema de prueba (Fig. 3.6) se observa claramente la separación de dos áreas: A1 compuesta por los generadores G1 y G2 y el área A2 constituida de los generadores G3 y G4 mostradas en la Tabla 3.2.

Área	Máquina
1	G1 y G2
2	G3 y G4

Tabla 3.2 Áreas que conforman el sistema en estudio

B) Análisis de pequeña señal del sistema de prueba

El sistema presenta un modo inter-área dominante (IAM) y dos modos locales LM1, LM2 asignados en la Tabla 3.3.

Modo	Tipo	Dinámica
LM1	Local	G1 Vs. G2
LM2	Local	G3 Vs. G4
IAM	Inter-Área	G1y G2 Vs. G3 y G4

Tabla 3.3 Modos identificados en el sistema analizado

Mientras que dentro de cada área existe un modo local que está conformado por la dinámica interna de cada cluster.

En el presente trabajo se analiza una falla entre los buses 3-101 de la línea 3 la cual exhibe un comportamiento de separación de las áreas 1 y 2 logrando la excitación del modo Inter-área de mayor importancia del sistema como se presenta en la siguiente sección.

3.7 RESULTADOS

Para el estudio de la teoría expuesta, se presentan tres casos: Caso Base, Control Local y Control Inter-Área

A. Caso Base

Para el Caso Base se realizó un estudio con ganancias fijas en los controladores del 50% de su valor nominal.

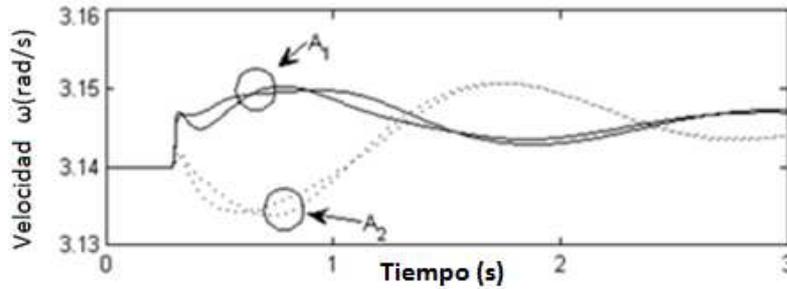


Figura 3.7 Velocidades de los cuatro generadores (Caso Base)

En la figura 3.7 del Caso Base se observan parte de los resultados del estudio. En particular se muestran las velocidades de los cuatro generadores y se distingue claramente la separación de dos áreas, detalladas en la Tabla 3.2, con lo cual se comprueba que la falla excita el modo electromecánico del sistema.

B. Amortiguamiento del Modo Local

Para validar los resultados del amortiguamiento en el Modo Local y el Modo Inter-área se presentan los ajustes de G_{KPSS} a realizar, para el Caso Base.

Casos	G_{KPSS}	G_{KPSS}
	A1	A2
Base	50%	50%
Control del modo Local	50%	95%
Control del modo Inter-Área	90%	95%

TABLA 3.4. Valores utilizados de las G_{KPSS} en cada área

En la figura 3.8 se puede observar que las oscilaciones de la velocidad en los generadores que conforman el área 2 disminuyen significativamente, y su

tiempo de asentamiento es de aproximadamente 1.5 segundos, en comparación con el de la figura 3.7 donde el tiempo de asentamiento es de casi tres segundos. Esto se debe a la elección de las ganancias G_{KPSS} del PSS que permiten un favorable e importante amortiguamiento para el sistema.

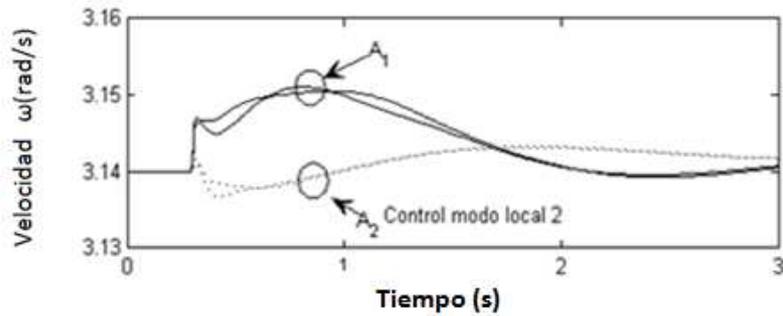


Figura 3.8 Velocidades de los cuatro generadores (Modo Local)

C. Amortiguamiento del modo Inter-Área

Para lograr un amortiguamiento adecuado del Modo Inter-área se aplicó un control simultáneo variante en el tiempo en las áreas 1 y 2.

Al aumentar las ganancias G_{KPSS} de las máquinas 1 y 2 y hacer nulas las ganancias G_{KPSS} de las máquinas 3 y 4 se aprecia en la figura 3.9 que las oscilaciones de la velocidad en los generadores que conforman el área 2 y área 1 se reducen muy significativamente y el tiempo de asentamiento es mucho menor a 1 segundo. Con lo cual se comprueba la eficacia del control en el Modo Inter-área.

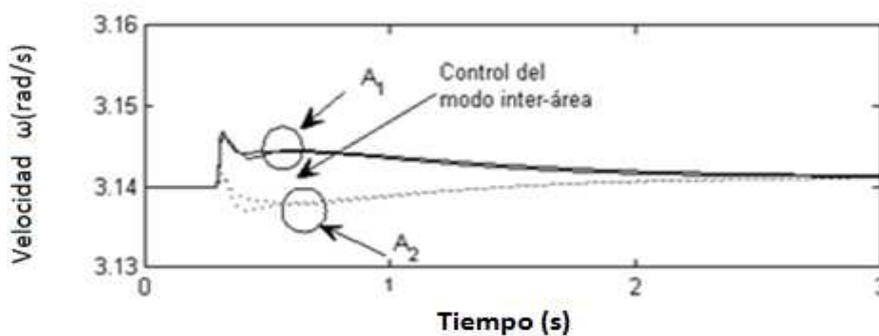


Figura 3.9. Velocidades de los cuatro generadores (Modo Inter-área)

La adecuada elección de las ganancias G_{KPSS} del PSS nos permite un mayor amortiguamiento en el sistema de estudio.

Esto que se puede observar como una gran ventaja en el intercambio de la energía cinética transferida entre las máquinas.

D. Amortiguamiento de la Transferencia de Energía Cinética

La grafica 3.10 nos muestra la transferencia de energía cinética que existe entre los generadores. En este estudio se estableció una técnica para obtener de forma cuantitativa la energía cinética transferida para los Modos Locales e Inter-área presentados en el análisis del sistema, por medio de la disminución del desfase angular de los grupos de generadores coherentes utilizando equivalentes dinámicos.

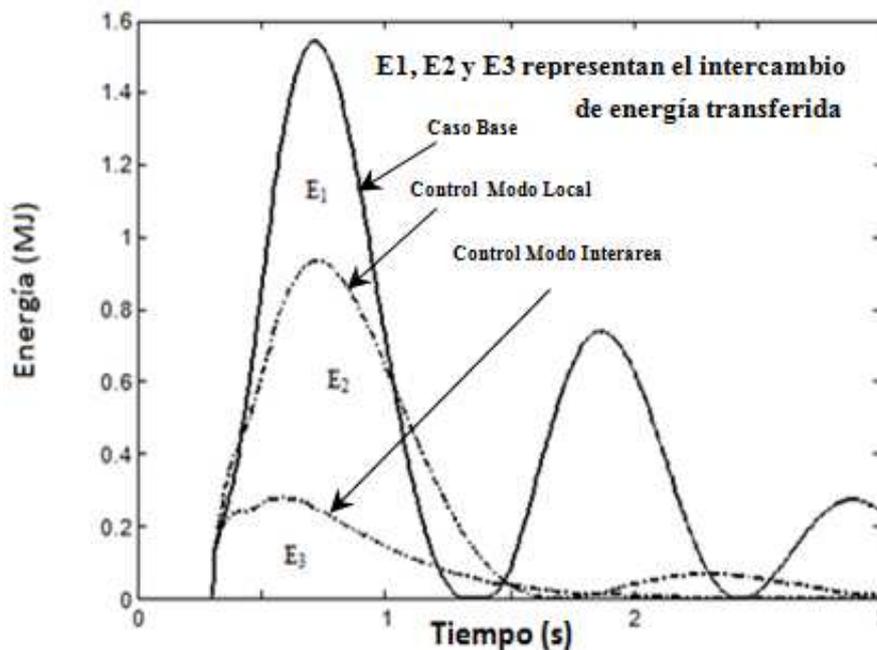


Figura 3.10 La transferencia de energía entre los cuatro generadores.

Se observa claramente en la figura 3.10 que para el Caso Base en el tiempo de 0.75 segundos se cuenta con un valor máximo de energía cinética transferida de $E_1=1.55$ [MJ]. Al aplicar el control del Modo Local se distingue que disminuye de forma notable el valor de la energía a un valor de $E_2=0.95$ [MJ], en el control del Modo Inter-área disminuye sustancialmente el valor de la energía $E_3=0.29$. Lo que nos indica la efectividad de la técnica, la cual nos permite disminuir la magnitud de las oscilaciones, reducir la energía cinética del OMIB y con ello, el fenómeno Inter-área.

3.8 REFERENCIAS

- [1] P. Kundur. *“Power System Stability and Control”*. Ed. New York: McGraw-Hill, 1994, pp. 1127-1132.
- [2] K. Ogata, *“State Space Analysis of Control Systems”*. Ed. Prentice Hall, 1998, pp.669-685.
- [3] N.S. Nise, *“Control System Engineering”*, Ed. New York: Wiley, 2004, pp.805-813.
- [4] Mania Pavella *“Generalized One-Machine Equivalents in Transient Stability Studies”*, IEEE Power Engineering Review, January 1998.
- [5] R. Castellanos, A.R. Messina, H. Sarmiento, *“Robust stability analysis of large power systems using the structured singular value theory”*, Electrical Power & Energy Systems, Elsevier, 2005, vol. 27, no.5- 6, pp. 389-397.
- [6] Z. Q. Wu, *“Single Machine Equal Area Criterion for Multimachine System Stability Assessment Based on Time Domain Simulation,”* IEEE Power Engineering Review. November 2001.
- [7] C. Juarez, R. Castellanos, A. R. Messina, *“Analysis of Inter-Area Oscillations using Time-Varying One-Machine Infinite Bus Equivalents”*, IEEE Power Engineering Society General Meeting, SF California USA June 2005. ISBN 0-7803-9157-8.
- [8] C. Juarez T., A.R. Messina, D. Ruiz-Vega, *“Analysis and Control of the inter-área mode phenomenon using selective One-machine Infinite Bus dynamic Equivalents”*, Electric Power Systems Research, Volumen 76, Issue 4, pp.180-193, January 2006..
- [9] C. Juarez, I. Martinez and Nancy Pacheco, *“Multi-Swing Trajectory Analysis using Time-Varying One-Machine Infinite Bus Equivalents”*, 6th International Conference on Electrical Engineering, Computing Science and Automatic Control, Toluca, México, 2009.
- [10] N. Pacheco M, C. Juarez T, I. Martinez C, *“Análisis y Control de la Energía Cinética Transferida en el Modo Inter-área usando una Representación Máquina Bus Infinito con PSSs Variantes en el Tiempo”*, 4to Congreso Iberoamericano de Estudiantes de Ingeniería Eléctrica (IV CIBELEC 2010) 5tas jornadas de ingeniería eléctrica, Mérida-Venezuela, 3, 2010.

Capítulo 4

Estudio de Ahorro de Energía Cinética Utilizando el Concepto del Amortiguamiento del IAM en el Sistema Interconectado Mexicano

4.1 INTRODUCCIÓN

La energía eléctrica se ha convertido en un recurso indispensable para la subsistencia y el desarrollo de la humanidad, es por ello que los estudios que se realizan a los Sistemas Eléctricos de Potencia son de gran importancia. Puesto que el término reserva de energía eléctrica es fundamental en todas las investigaciones realizadas a los sistemas de potencia, es indispensable proponer técnicas que nos ayuden a preservar y utilizar de forma adecuada este recurso.

Frecuentemente cuando una contingencia lo suficientemente severa ocurre en una red eléctrica estresa al sistema ocasionando diferencias angulares entre los generadores, estas diferencias angulares producen un intercambio de energía cinética entre las diferentes áreas que conforman el sistema. Si la falla no es lo suficientemente severa para producir la inestabilidad del sistema las diversas regiones o clusters de grupos coherentes intercambiarán energía cinética intentando mantener la estabilidad; dicho en otras palabras, este intercambio de energía cinética es la energía que consume el sistema para mantener el sincronismo.

En este capítulo, se expone el concepto de ahorro de energía al presentar un método original para amortiguar el sistema de potencia, con la finalidad de reducir el intercambio de energía cinética entre las principales regiones. El propósito es proveer modelos basados en conceptos de energía tales que puedan ser evaluados de manera cuantitativa, para demostrar que una coordinación apropiada de los sistemas podría llevar a una amortización considerable de la energía cinética. El sistema en el que se llevará a cabo la aplicación del método es un modelo de la Red Interconectada Mexicana conformada por 45 generadores.

4.2 ESTUDIO DEL AHORRO DE ENERGÍA

Dado que la energía eléctrica es parte del motor que impulsa a la sociedad moderna, una prioridad deseable es que la energía utilizada, sea suministrada en forma de energía limpia, confiable y con las menores pérdidas en la generación, distribución y consumo, con la finalidad de optimizar los recursos energéticos renovables y no renovables.

Cuando se presenta un disturbio en el sistema de potencia, hay una cantidad de energía que el sistema utiliza para aumentar el amortiguamiento del modo inter-área y mantenga el sincronismo de las máquinas en el período de falla, posteriormente si la falla no es lo suficientemente severa, en el período de postfalla la energía cinética es reducida en cada oscilación hasta que el sistema llegue a un punto de equilibrio comúnmente diferente que el anterior al disturbio.

Estas variaciones de la energía hacen que las máquinas oscilen o se alejen del punto de equilibrio [1,2]. Este movimiento es una indicación del hecho de que el exceso de energía se convierte en energía cinética (o la deficiencia de energía se sustrae de la energía cinética de las masas rodantes). Obviamente si el movimiento es indefinido, se perdería el sincronismo. Para evitar esto, el sistema debe ser capaz de absorber este exceso de energía en un tiempo tal que las fuerzas sobre los generadores tiendan a situarlos en nuevos puntos de equilibrio [3,4].

Diversos estudios han demostrado que la habilidad del sistema de potencia de absorber el exceso de energía cinética, depende en gran medida de su habilidad de convertir esta energía en energía de potencia; esto es, mediante el desplazamiento angular de los rotores de los generadores, de la variación de los flujos magnéticos en los generadores y/o las líneas, y de la disipación de energía a través de las cargas y líneas. Lo anterior depende de dos factores fundamentales en el período de postfalla.

1. La configuración final de la red
2. Diversos dispositivos o acciones de amortiguamiento

Por consiguiente, el sistema aumenta la energía cinética de regiones cercanas a la falla o pobremente amortiguadas, pero existe una cantidad crítica o máxima de energía cinética que la red puede absorber [5].

Si el sistema comienza con una cantidad de energía transitoria menor que esta energía crítica, los rotores oscilaran tanto como el sistema lo requiera es decir, hasta que el exceso de energía sea absorbido por la red, pero el sistema permanecerá estable.

4.3 ESTUDIO DE PEQUEÑA SEÑAL EN EL SIME APLICADO A LA DISMINUCIÓN DEL INTERCAMBIO DE ENERGÍA CINÉTICA DEL OMIB

El presente estudio parte de la simplificación de dos áreas del método SIME tratado en el capítulo dos, donde se presenta el estudio de la estabilidad transitoria como una técnica establecida para analizar el comportamiento de alimentación del sistema usado en una variedad de aplicaciones, incluyendo la evaluación de la estabilidad transitoria, el control, la contingencia de filtrado y más recientemente la identificación del modo de inestabilidad.

En el capítulo, sólo se aborda de manera cualitativa la idea básica detrás del método SIME, la cual es sustituir el comportamiento dinámico de la post-falla del sistema por un equivalente dinámico OMIB en el que los parámetros se ajustan continuamente para reproducir con precisión la dinámica del sistema multi-máquinas.

El equivalente OMIB trata esencialmente de lograr mediante la combinación de un programa de estabilidad transitoria con el criterio de áreas iguales. El cálculo de la variable en el tiempo equivalente OMIB, en esencia queda implicado por las siguientes cinco etapas:

- I. A partir de un escenario de falla dado, se realiza una separación de islas del sistema, constituido por dos (o más) grupos de máquinas, a saber, el grupo crítico (MC) que son las máquinas más alteradas, y el resto de las máquinas identificado como el grupo no-crítico (NC).
- II. Usando el centro parcial del ángulo (CPA) como marco de referencia de cada grupo, se agrega el de las máquinas de cada grupo en un equivalente.
- III. Con los CPA es posible determinar la energía que se transfiere entre las islas utilizando la ecuación (3.5) del Capítulo 3.
- IV. Una transformación posterior se utiliza para representar el comportamiento dinámico del sistema de dos máquinas por un sistema equivalente OMIB en los que la trayectoria transitoria de la dinámica del sistema multi-máquina está fielmente reproducida.
- V. Se evalúa la estabilidad transitoria del OMIB con el CAI.

Como se señaló anteriormente, el método SIME identifica la condición inestable con un programa de tiempo de dominio de estabilidad transitoria.

En cada paso de la simulación, los patrones de descomposición de MC se consideran mediante el siguiente procedimiento de tres etapas [7,8]:

- 1) Las máquinas se deben clasificar de acuerdo a sus desviaciones de ángulo del rotor

- 2) Identificar las primeras grandes desviaciones angulares del rotor, o las distancias, entre máquinas adyacentes
- 3) Seleccionar los candidatos de MC de acuerdo con su mayor distancia.

El proceso continúa hasta que un grupo de candidatos de MC y el correspondiente OMIB detectan condiciones de inestabilidad. A continuación, el candidato resultante es declarado por el concerniente sistema OMIB.

4.3.1 ESCENARIO DE FUNCIONAMIENTO SELECCIONADO

Se aborda el problema de ahorro de energía utilizando el concepto de amortiguamiento del modo inter-área, el estudio se centra en demostrar que entre mayor es la armonía del sistema, las pérdidas debidas al consumo interno de energía que la red utiliza para mantener el sincronismo de sus generadores es reducida drásticamente.

Para lograr este fin al modelo del Sistema Interconectado Mexicano se le aplicó una perturbación que excita el modo Centro-Sureste con lo cual se notó un significativo aumento en las diferencia de velocidad de los estados de las máquinas del sistema

Aquí la ventaja del equivalente OMIB es la de determinar el Modo Inter-área de manera instantánea es decir, en cada instante del tiempo es posible determinar las islas principales que intercambian energía cinética.

El control que se diseñó en este capítulo, se basa en la determinación instantánea de las diversas regiones que intercambian energía. Constando principalmente de dos pasos que se intercalan dependiendo del sentido en el que el sistema intercambia energía después de liberada la contingencia.

- **Paso uno:** Cuando el sistema intercambia energía cinética del grupo uno al dos. El grupo uno se encuentra con una mayor velocidad de rotación que el grupo dos, es por ello que es necesario disminuir la diferencia de velocidad del grupo uno al dos. Fig.4.1.

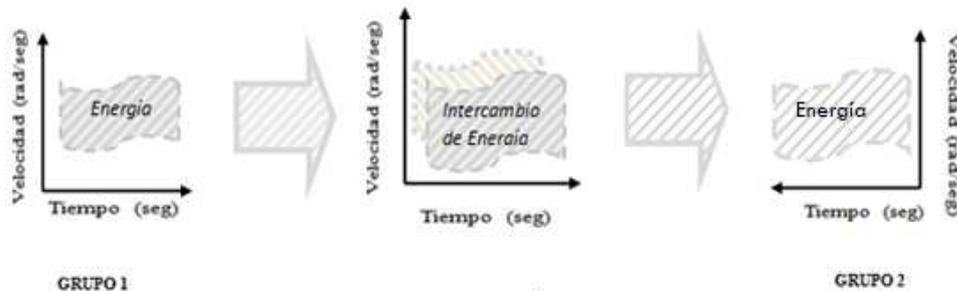


Fig .4.1 Intercambio de energía cinética del grupo 1 al grupo 2.

En este punto es importante que los controles actúen para disminuir la diferencia de velocidad entre los grupos, es por eso que las ganancias G_{KPSS} del dispositivo de control asociado a las máquinas son modificadas de la siguiente manera.

El grupo uno aumenta su ganancia en un 25% del valor nominal de operación logrando un pequeño frenado instantáneo.

El grupo dos disminuye su ganancia en un 25% alcanzando una pequeña aceleración.

De esta forma se logra un amortiguamiento en la diferencia de velocidad entre las dos regiones.

- **Paso dos:** Cuando se llega a un valor máximo del intercambio de la energía cinética, los roles de las islas uno y dos invierten su posición. Es decir, la isla dos se encuentra ahora intercambiando energía cinética con la uno por lo cual los controles cambian de posición de la siguiente manera.

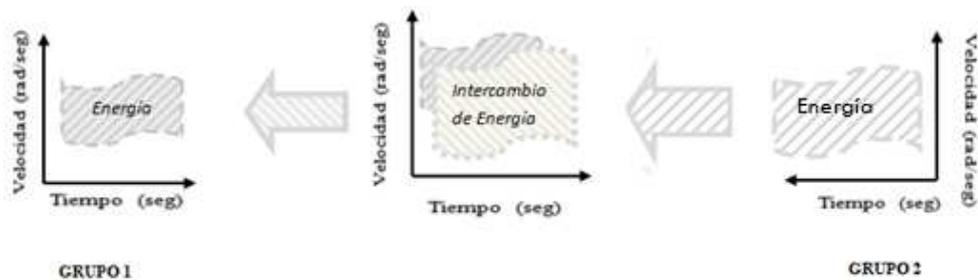


Fig. 4.2 Intercambio de energía cinética del grupo 2 al grupo 1.

El grupo uno disminuye su ganancia en un 25% del valor nominal de operación obteniendo una pequeña aceleración instantánea.

El grupo dos aumenta su ganancia en un 25% del valor predefinido de operación adquiriendo un pequeño frenado instantáneo.

La acción conjunta de los pasos uno y dos nos lleva a calcular la cantidad de energía cinética que intercambian los grupos de generadores, y con ello proponer un ahorro en la distribución del suministro.

4.4 SISTEMA DE PRUEBA

Los estudios de simulación se llevaron a cabo en un modelo del sistema de la red interconectada de México (SIM) conformado por 5-áreas para evaluar la aplicabilidad del método SIME basados en el aprovechamiento del análisis y

control de las oscilaciones inter-área, este sistema consta de 248 buses, 234 líneas, 45 máquinas y 8 SVC.

El sistema puede verse en la referencia [6] el cual muestra las principales islas del sistema.

El disturbio seleccionado para el análisis del comportamiento del tipo de IAM es el siguiente:

Caso de Estudio.- Una libranza en la zona Sureste al presentarse una falla trifásica de cortocircuito en el bus de Puebla-Texcoco (PRD-TUX) y Puebla Laguna Verde (PLV) de la zona Sureste del sistema. Donde se aprecia que la pérdida de esta línea puede resultar en las oscilaciones no amortiguadas y en consecuencia en la participación de un importante Modo de Inter-área dominante Centro-Sureste.

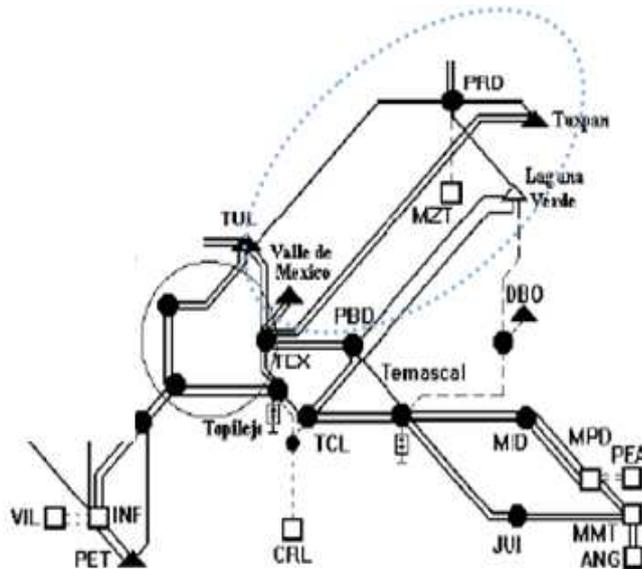


Fig. 4.3 Detalle Centro-Sureste del Sistema Interconectado Mexicano mayores detalles en la referencia [6].

4.5 ESTUDIO DEL INTERCAMBIO DE ENERGÍA CINÉTICA DEL SIM.

En la presente sección se aplica la teoría expuesta en el capítulo 3 y sección 4.3, la cual va encaminada a disminuir la energía cinética que transfieren los sistemas Centro-Sureste de la red Mexicana

Para conseguir este objetivo, es necesario analizar el comportamiento de la velocidad y aceleración OMIB, deducida de la ecuación (2.19) del capítulo dos.

Una vez obtenida las velocidades de los centros de inercia de las islas Centro – Sureste es posible aplicar los conceptos descritos en la sección 4.3.

En este trabajo se aplicaron tres diferentes condiciones de operación de las ganancias G_{KPSS} de los dispositivos PSS.

A continuación se menciona la primera condición variando el 25% la ganancia nominal del dispositivo, tal y como se explica en la sección 4.3.

4.5.1. Escenario de amortiguamiento del 25%

Partiendo del procedimiento explicado en la sección 4.3 se realiza el siguiente análisis.

1. Se inicia con parámetros fijos de las ganancia G_{KPSS} iguales a 100% del valor nominal predefinido en su operación
2. Se calcula la respuesta del sistema de potencia ante dicho valor de G_{KPSS} , que se especifica en un archivo de conmutación
3. Se aplica en línea el cambio del valor de la ganancia G_{KPSS} de un 100% a 125% para el área Sureste (control del Modo Local), a continuación se vuelve a efectuar otro cambio de un valor del 100% a 75% para el área Centro (control del Modo inter-área). El objetivo de esta modificación en línea es la de aumentar la velocidad en el área que tiende a desacelerarse y disminuir la velocidad en donde aumenta la velocidad, logrando una diferencia de velocidades controlables.
4. Una vez que cambia el sentido del intercambio de energía cinética los controles son cambiados, es decir el modo Sureste cambia de 125% a 75% y de 75% a 125% para la región Centro, logrando un efecto a la inversa con relación a las áreas respecto al punto tres.
5. Se grafican la velocidad y el ángulo del OMIB para cada valor de G_{KPSS} analizado y se observa la efectividad del control diseñado.
6. Si el amortiguamiento no es adecuado se regresa al punto 2

El modelo variante en el tiempo es coordinado por medio de funciones de energía logrando amortiguar la dinámica de las variaciones previsibles que se presenten.

Se describen las condiciones de las G_{KPSS} a analizar, las cuales expresan el comportamiento del ángulo de las 45 máquinas en la siguiente tabla.

Caso Base	Intercambio de energía del Sureste a Centro	Intercambio de energía del Centro a Sureste
Sistema S $G_{KPSS}=100\%$	Sistema S $G_{KPSS} =125\%$	Sistema S $G_{KPSS} =75\%$
Sistema C $G_{KPSS} =100\%$	Sistema C $G_{KPSS} =75\%$	Sistema C $G_{KPSS} =125\%$

Tabla 4.1 Condiciones de ganancia aplicadas al SIM

Se utilizó la primera oscilación para demostrar la efectividad de la sincronización de los controles.

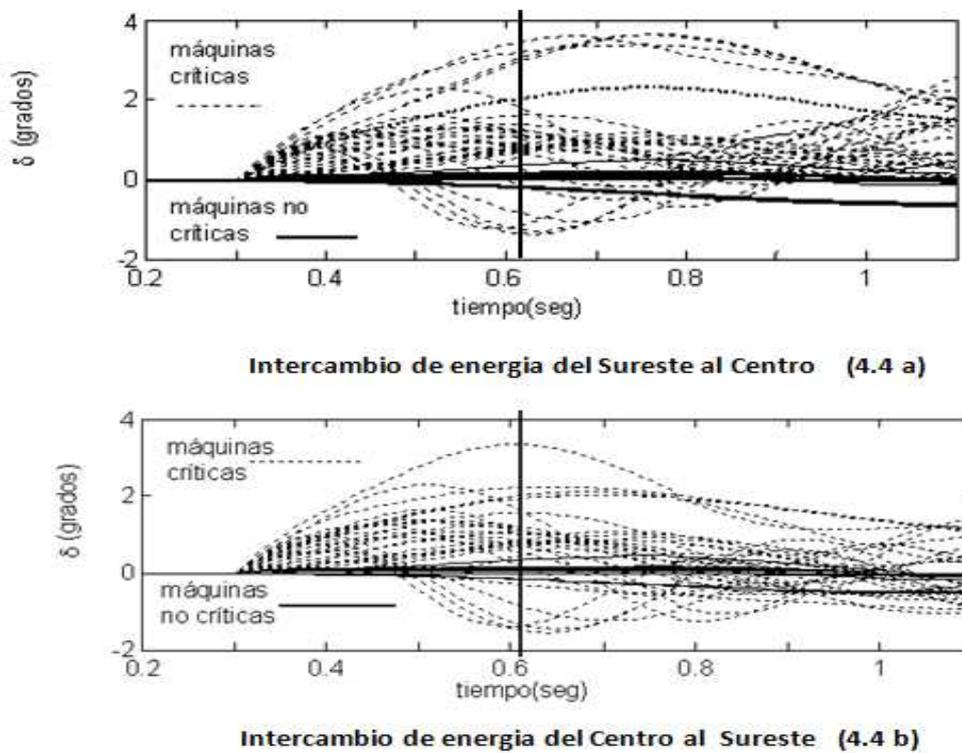


Figura 4.4 Representación del ángulo de las velocidades de los 45 generadores del SIM

En la figura 4.4 se distingue claramente la separación de las islas (grupo crítico y resto del sistema). Puede observarse en la región del Sureste al Centro para el valor de tiempo máximo de 0.6 segundos un valor del δ aproximadamente de 3.8° con un tiempo de asentamiento que tiende a 2 segundos y a continuación una disminución de las oscilaciones de la región Centro al Sureste en el mismo tiempo de aproximadamente 3.5° con un tiempo de asentamiento mucho menor a 1 segundo. Lo cual, podría verse como una

mejor sincronización de los ángulos de los generadores, el resto del capítulo se da una formalización de este resultado utilizando funciones de energía.

Utilizando el procedimiento de la sección 3.5.1 inciso A) capítulo tres, es posible encontrar el intercambio de energía cinética para la primera oscilación. La figura 4.5 muestra dicho intercambio de energía cinética utilizando el concepto de variación de la energía disipada en el sistema, con la finalidad de mantener el sincronismo del mismo.

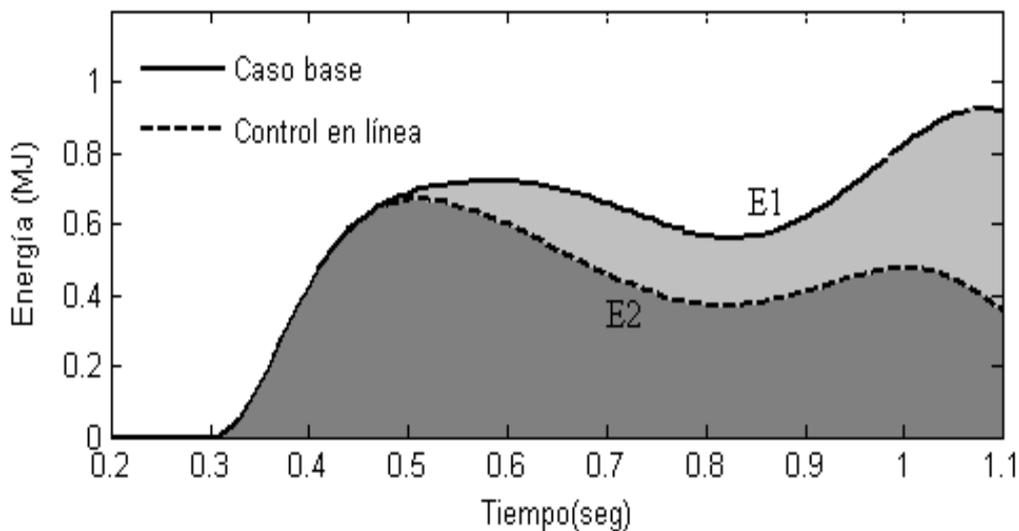


Fig. 4.5 Representación del intercambio de energía entre áreas.

En la figura 4.5 se puede observar claramente, que en el Caso Base la energía cinética E_1 es mucho mayor que la energía cinética E_2 ya que a esta última se le aplica el control en línea con una $G_{KPSS} = 25\%$ con lo cual se logra un ahorro significativo de las pérdidas de energía del sistema. En las secciones siguientes se cuantificarán estas cantidades de energía transferidas E_1 y E_2 representadas, así mismo se propondrán diferentes escenarios de amortiguamiento para una mejor comprensión

Cabe mencionar que para realizar el estudio de intercambio de energía cinética se utilizó la primera oscilación, debido a que estudios anteriores (ver referencia [9]) nos llevaron a la conclusión que en el caso estable la primera oscilación es la que contiene una mayor pérdida de energía con respecto a las demás oscilaciones.

4.5.2. Otros escenarios de amortiguamiento

En esta sección se analizaron otros escenarios de amortiguamiento siguiendo el procedimiento de la sección 4.5.1 de este capítulo. Los factores de amortiguamiento utilizados se describen en la siguiente tabla.

Factor de amortiguamiento del 30%		Factor de amortiguamiento del 35%	
<i>Intercambio de Energía de Sureste a Centro</i>	<i>Intercambio de Energía de Centro a Sureste</i>	<i>Intercambio de Energía de Sureste a Centro</i>	<i>Intercambio de Energía de Centro a Sureste</i>
Sistema S G _{KPSS} =130%	Sistema S G _{KPSS} =70%	Sistema S G _{KPSS} =135%	Sistema S G _{KPSS} =65%
Sistema C G _{KPSS} =70%	Sistema C G _{KPSS} =130%	Sistema C G _{KPSS} =65%	Sistema C G _{KPSS} =135%

Tabla 4.2. Otras condiciones de ganancia aplicadas al SIM

Utilizando los factores de amortiguamiento de la Tabla 4.2 y el procedimiento de la sección 4.5 se obtiene la Fig.4.6 la cual describe los diferentes casos analizados para el ahorro de la energía cinética transferida entre las islas del Centro y Sureste del Sistema Interconectado Mexicano.

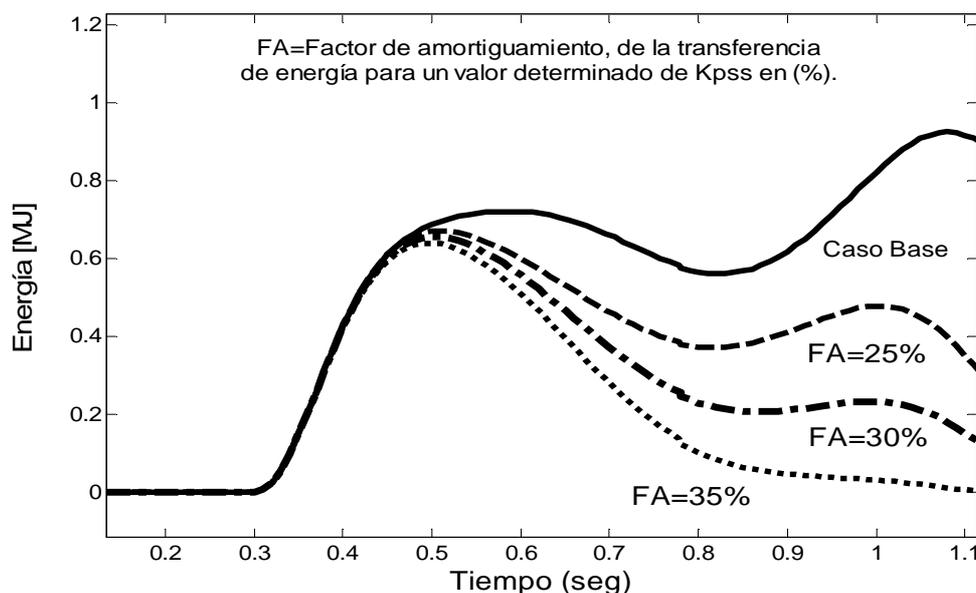


Figura 4.6 Transferencia de energía con FA del 25% ,30% y 35%.

La figura 4.6 muestra la manera en que se va controlando la reducción de la transferencia de energía con base en un factor de amortiguamiento (FA) que se aplica. Se logra demostrar que entre más grande es el valor del FA más disminuye la energía al igual que su tiempo de asentamiento, esto se debe a la adecuada elección de G_{KPSS} que nos permiten un mayor amortiguamiento.

En este capítulo se empleó la teoría numérica de integral trapezoidal aplicada a sistemas de potencia variantes en el tiempo de la referencia [7]. La cual toma en cuenta los diferentes escenarios de integración y que está sujeto a un programa de estabilidad transitoria. Los resultados de la aplicación de esta teoría se muestran en la Figura 4.7.

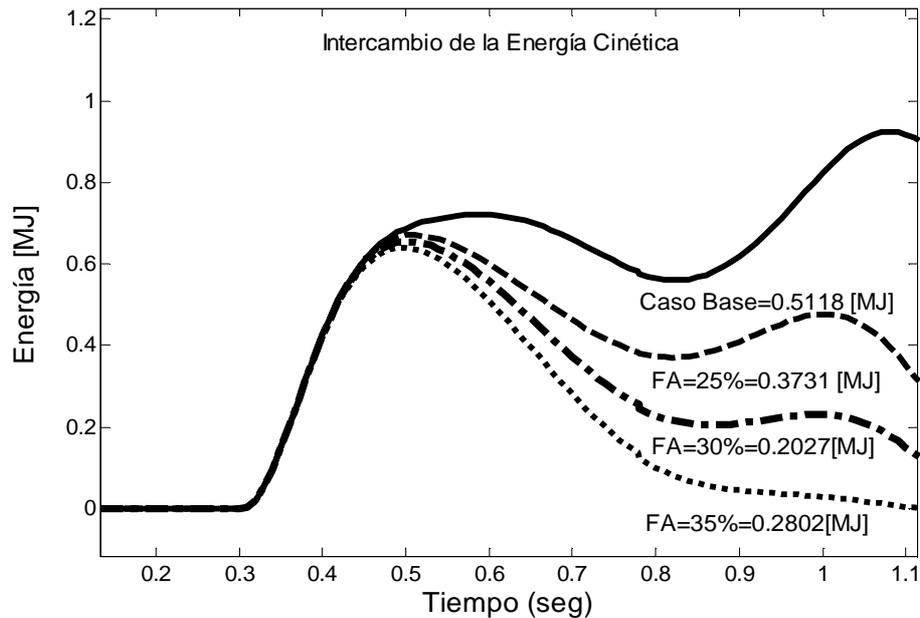


Fig. 4.7. Valor de la Transferencia de Energía Cinética.

En la figura 4.7 se incorpora el valor de la energía cinética transferida, este significativo resultado nos permite cuantificar el ahorro de energía, y llevarnos a una amortización considerable de la energía cinética la cual se desperdicia en los sistemas para lograr mantener el sincronismo.

La siguiente tabla nos muestra de forma detallada para cada caso de estudio realizado, la cantidad de la energía transferida que se obtuvo y en forma porcentual el ahorro de la misma.

Caso	Energía Transferida en [MJ]	Ahorro de Energía en porcentaje
Base	0.5118	0%
25%	0.3731	27.1%
30%	0.2802	45.0%
35%	0.2027	60.4%

Tabla 4.3 Ahorro de Energía en forma porcentual

De la tabla 4.3 y Fig. 4.7 se puede concluir lo siguiente:

- El estudio presentado en esta tesis logro obtener de forma cualitativa y cuantitativa la cantidad de energía cinética que se pierde al transferir la energía eléctrica en una red estresada.
- Partiendo de las condiciones de análisis para los Caso Base, la transferencia de energía cinética se observa que cambia de forma significativa después de aplicar las G_{KPSS} adecuadas en los modos de análisis.
- Se muestra que la aplicación de los dispositivos de control reducen la energía cinética del OMIB y con ello, el fenómeno inter-área
- Se comprueba que entre mejor es sintonizado el control en línea, mayor es el amortiguamiento del sistema y por lo tanto, el ahorro de energía es mayor. (en este punto es necesario considerar las capacidades físicas de cada dispositivo de control).
- El PSS variante en el tiempo permite reducir la magnitud de las oscilaciones resultantes.
- La técnica de coordinación variante en el tiempo hace que las oscilaciones inter-área disminuyan gradualmente, haciendo el sistema más robusto. El modelo variante en el tiempo al ser coordinado por medio de funciones de energía logra amortiguar la dinámica de las variaciones previsibles [10,11].

4.6 REFERENCIAS.

- [1] A. A. Fouad, Vijay Vittal, “*Power system transient stability analysis using the transient energy function method*”. Ed. Prentice Hall, 1992, pp. 16-18.
- [2] A. Visioli, “*Tuning of PID controllers with fuzzy logic*”, Proc. Inst. Elect. Eng. Contr. Theory Applicant, vol. 148, no. 1, pp. 1-8, January. 2001.
- [3] G. Rogers, “*Power System Oscillations*”, Kluwer’s Power Electronic and Power Systems Series, Series Editor: M.A. Pai, Canada. 2000.
- [4] Mania Pavella “*Generalized One-Machine Equivalent in Transient Stability Studies*”, IEEE Power Engineering Review, January 1998.
- [5] R. Castellanos, A.R. Messina, H. Sarmiento, “*Robust stability analysis of large power systems using the structured singular value theory*”, Electrical Power & Energy Systems, Elsevier, 2005, vol. 27, no.5- 6, pp. 389-397.
- [6] R. Castellanos , J. G. Calderon G., D. Olguin S., H. Sarmiento U., A. R. Messina, “*Use of power system stabilizers for damping inter-area oscillations in the south systems of the Mexican electrical grid*”, Electric Power Systems Research, vol. 76, 2006, pp. 169-179.
- [7] C. Juarez, R. Castellanos, A. R. Messina, “*Analysis of Inter-Area Oscillations using Time-Varying One-Machine Infinite Bus Equivalents*”, IEEE Power Engineering Society General Meeting, SF California USA June 2005. ISBN 0-7803-9157-8.
- [8] C. Juarez T., A.R. Messina, D. Ruiz-Vega, “*Analysis and Control of the inter-area mode phenomenon using selective One-machine Infinite Bus dynamic Equivalents*”, Electric Power Systems Research, Volume 76, Issue 4, pp.180-193, January 2006.
- [9] C. Juarez and A.M. Stankovic, “*Contraction analysis of power system dynamics using time-varying OMIB equivalents*”, North American Power Symposium, Sep. 30 – Oct. 2, 2007
- [10] C. Juarez, I. Martinez and Nancy Pacheco, “*Multi-Swing Trajectory Analysis using Time-Varying One-Machine Infinite Bus Equivalents*”, 6th International Conference on Electrical Engineering, Computing Science and Automatic Control, Toluca, Mexico, 2009.
- [11] N. Pacheco M, C. Juárez T, I. Martinez C. “*Análisis y Control de la Energía Cinética Transferida en el Modo Inter-área usando una Representación Maquina Bus Infinito con PSSs Variantes en el Tiempo*”, 4to Congreso Iberoamericano de Estudiantes de Ingeniería Eléctrica (IV CIBELEC 2010), Mérida-Venezuela, 2010.

Capítulo 5

Conclusiones Generales y Trabajos Futuros.

5.1 CONCLUSIONES GENERALES

El trabajo presentado, se orientó al análisis y obtención de un método numérico directo que por medio de índices cuantitativos nos mostró las pérdidas de energía cinética que se presenta en el estudio de los Sistemas Eléctricos de Potencia cuando estos son conducidos a diferentes escenarios de operación.

Con la aplicación de la metodología presentada, se calculan los mejores parámetros porcentuales de los estabilizadores, con el fin de incrementar el amortiguamiento de las oscilaciones de origen electromecánico que causan la inestabilidad en el sistema.

Las propiedades que presenta la técnica son:

- Un ahorro considerable de la energía disipada, de acuerdo a la coordinación de los generadores en estudio, utilizando un sistema variante en el tiempo.
- La obtención de un método para el análisis de la estabilidad transitoria el cual utiliza un control variante en el tiempo.
- El analizar la estabilidad transitoria, utilizando el enfoque de la energía cinética transferida.
- Lograr la incorporación del control del PSS por medio de su G_{KPSS} , el cual tiene la característica de ser variante en el tiempo y además de ser coordinado por el intercambio de energía cinética.

5.2 TRABAJOS FUTUROS

El principal potencial de esta técnica es la posibilidad de la sincronización de dispositivos “Power Management Unit” (PMUs), para realizar un análisis de la estabilidad transitoria en línea.

Otros aspectos sobresalientes de trabajos futuros son:

- El desarrollo de otras técnicas evolutivas para resolver el problema de la interacción de controles, comparando sus resultados con los de la metodología propuesta en este trabajo.
- Realizar un análisis más profundo basado en el intercambio de energía cinética entre los grupos de generadores coherentes. Vinculado con el despacho económico de las cargas.
- La aplicación directa de la técnica para el análisis de la estabilidad multi-oscilación.

Acrónimos y Símbolos

Acrónimo	Símbolo	Definición
	A_{ac}	Área acelerante
	A_{des}	Área desacelerante
	η	Área total
	δ^o	Ángulo de pre disturbio
	δ^s	Ángulo de cambio de la potencia eléctrica
	δ^u	Ángulo inestable
	δ^r	Ángulo de retorno
	δ_{omib}	Ángulo OMIB
	ω_{omib}	Velocidad OMIB
	M	Constante de inercia
	D	Constante de amortiguamiento
	$E_{1, 2, 3}$	Representan el Intercambios de Energías Transferidas
	E_C	Energía cinética
	P_e	Potencia Eléctrica
	P_m	Potencia Mecánica
	P_a	Potencia Acelerante
	t_r	Tiempo de retorno
	t_u	Tiempo inestable
CI		Centro de inercia
CAI		Criterio de Áreas Iguales

<i>FA</i>	Factor de Amortiguamiento
<i>G_{KPSS}</i>	Ganancia ajustable para el controlador PSS
<i>LC</i>	Circuito Inductor -Capacitor
<i>LM1</i>	Modo Local uno
<i>LM2</i>	Modo Local dos
<i>S</i>	Zona Sureste
<i>C</i>	Zona Centro
<i>PRD-TUX</i>	Bus Puebla-Texcoco
<i>PLV</i>	Bus Puebla-Laguna Verde
<i>U</i>	Señal de entrada
<i>Y</i>	Señal de salida
<i>T_w</i>	Tiempo constante (del filtro paso-alto)
<i>SEP</i>	Sistema Eléctrico de Potencia
<i>SIM</i>	Sistema Interconectado Mexicano
<i>PID</i>	Controlador Proporcional ,Integral y Diferencial
<i>Clusters</i>	Análisis de agrupaciones
<i>Analysis</i>	
<i>IAM</i>	Modo Inter-Área por sus siglas en ingles Mode Inter-Área
<i>IEEE</i>	Instituto de Ingeniería Eléctrica y Electrónica de sus siglas en inglés Institute of Electrical and Electronics Engineers
<i>PM_{us}</i>	Unidades de Administración y/o Control de Energia de sus siglas en ingles Power Management Unit
<i>OMIB</i>	Máquina Bus infinito, de las siglas en inglés One Machine Infinite Bus
<i>SIME</i>	Equivalente unimáquina, de las siglas en inglés Single Machine Equivalent
<i>SVC</i>	Compensador Estático de Var, de las siglas en ingles Static Var Control

<i>TSA</i>	Medición de la estabilidad transitoria, de las siglas en inglés Transient Stability Assessment
<i>EAC</i>	Criterio de Áreas Iguales, de las siglas en inglés Equal Area Criterion
<i>EEAC</i>	Criterio Extendido de Áreas Iguales, de las siglas en inglés Extended Equal Area Criterion
<i>PSS</i>	Estabilizadores de sistemas de potencia, de las siglas en inglés Power System Stabilizers

APENDICE A BASE DE DATOS DEL SISTEMA DE DOS ÁREAS DEL IEEE

Datos de la topología de la red utilizada en el capítulo tres, (ver figura 3.5).

```

bus = [
1 1.03 18.5 7.00 1.61 0.00 0.00 0.00 0.00 1 99.0 -99.0 22.0 1.1 .9;
2 1.01 8.80 7.00 1.76 0.00 0.00 0.00 0.00 2 5.0 -2.0 22.0 1.1 .9;
3 0.9781 -6.1 0.00 0.00 0.00 0.00 0.00 0.00 3 0.0 0.0 230.0 1.5 .5;
4 0.95 -10 0.00 0.00 9.76 1.00 0.00 0.00 3 0.0 0.0 115.0 1.05 .95;
10 1.0103 12.1 0.00 0.00 0.00 0.00 0.00 0.00 3 0.0 0.0 230.0 1.5 .5;
11 1.03 -6.8 7.16 1.49 0.00 0.00 0.00 0.00 2 5.0 -2.0 22.0 1.1 .9;
12 1.01 -16.9 7.00 1.39 0.00 0.00 0.00 0.00 2 5.0 -2.0 22.0 1.1 .9;
13 0.9899 -31.8 0.00 0.00 0.00 0.00 0.00 0.00 3 0.0 0.0 230.0 1.5 .5;
14 0.95 -38 0.00 0.00 17.67 1.00 0.00 0.00 3 0.0 0.0 115.0 1.05 .95;
20 0.9876 2.1 0.00 0.00 0.00 0.00 0.00 0.00 3 0.0 0.0 230.0 1.5 .5;
101 1.05 -19.3 0.00 8.00 0.00 0.00 0.00 0.00 2 99.0 -99.0 230.0 1.5 .5;
110 1.0125 -13.4 0.00 0.00 0.00 0.00 0.00 0.00 3 0.0 0.0 230.0 1.5 .5;
120 0.9938 -23.6 0.00 0.00 0.00 0.00 0.00 0.00 3 0.0 0.0 230.0 1.5 .5];

Bus data format
% bus:
% col1 number
% col2 voltage magnitude (pu)
% col3 voltage angle (degree)
% col4 p_gen (pu)
% col5 q_gen (pu)
% col6 p_load (pu)
% col7 q_load (pu)
% col8 G_shunt (pu)
% col9 B_shunt (pu)
% col10 bus_type
% bus_type = 1, swing bus
% = 2, generator bus (PV bus)
% = 3, load bus (PQ bus)
% col11 q_gen_max. (pu)
% col12 q_gen_min (pu)
% col13 v_rated (kv)
% col14 v_max. (pu)
% col15 v_min pu

line = [...
1 10 0.0 0.0167 0.00 1.0 0.0 0.0 0.;
2 20 0.0 0.0167 0.00 1.0 0.0 0.0 0.;
3 4 0.0 0.005 0.00 1.0 0.12 0.8 0.05;
3 20 0.001 0.0100 0.0175 1.0 0.0 0.0 0.;
3 101 0.011 0.110 0.1925 1.0 0.0 0.0 0.;
3 101 0.011 0.110 0.1925 1.0 0.0 0.0 0.;
10 20 0.0025 0.025 0.0437 1.0 0.0 0.0 0.;
11 110 0.0 0.0167 0.0 1.0 0.0 0.0 0.;
12 120 0.0 0.0167 0.0 1.0 0.0 0.0 0.;
13 14 0.0 0.005 0.00 1.0 0.12 0.8 0.05;
13 101 0.011 0.11 0.1925 1.0 0.0 0.0 0.;
13 101 0.011 0.11 0.1925 1.0 0.0 0.0 0.;
13 120 0.001 0.01 0.0175 1.0 0.0 0.0 0.;
110 120 0.0025 0.025 0.0437 1.0 0.0 0.0 0.];

Line data format
% line:
% col1 from bus
% col2 to bus
% col3 resistance (pu)
% col4 reactance (pu)
% col5 line charging (pu)
% col6 tap ratio
% col7 tap phase
% col8 tap max
% col9 tap min
% col10 tap size

Machine data format
% 1. Machine number,
% 2. Bus number,
% 3. Base mva,
% 4. Leakage reactance x_l (pu),
% 5. Resistance r_a (pu),
% 6. d- axis synchronous reactance x_d (pu),
% 7. d- axis Transient reactance x'_d (pu),
% 8. d- axis subtransient reactance x''_d (pu),
% 9. d- axis open-circuit time constant T'_do (sec),
% 10. d- axis open-circuit subtransient time constant
% T''_do (sec),
% 11. q-axis synchronous reactance x_q (pu),
% 12. q-axis Transient reactance x'_q (pu),
% 13. q-axis subtransient reactance x''_q (pu),
% 14. q-axis open-circuit time constant T'_qo (sec),
% 15. q-axis open circuit subtransient time constant
% T''_qo (sec),
% 16. inertia constant H (sec),
% 17. Damping coefficient d_o (pu),
% 18. Damping coefficient d_l (pu),
% 19. Bus number

mac con = [ ...
1 1 900 0.200 0.00 1.8 0.30 0.25 8.00 0.03...
1.7 0.55 0.24 0.4 0.05...
6.5 0 0 1 0.0654 0.5743;
2 2 900 0.200 0.00 1.8 0.30 0.25 8.00 0.03...
1.7 0.55 0.25 0.4 0.05...
6.5 0 0 2 0.0654 0.5743;
3 11 900 0.200 0.00 1.8 0.30 0.25 8.00 0.03...
1.7 0.55 0.24 0.4 0.05...
6.5 0 0 3 0.0654 0.5743;
4 12 900 0.200 0.00 1.8 0.30 0.25 8.00 0.03...
1.7 0.55 0.25 0.4 0.05...
6.5 0 0 4 0.0654 0.5743;

```