

GUIA PARA MODELADO DE ESTABILIDAD EN SISTEMAS DE POTENCIA



Guillermo Alfonso Palacios

**UNIVERSIDAD DE LA SALLE
FACULTAD DE INGENIERÍA
PROGRAMA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA
BOGOTÁ D.C.
2017**

GUIA PARA MODELADO DE ESTABILIDAD EN SISTEMAS DE POTENCIA

Guillermo Alfonso Palacios

**Trabajo de grado presentado como requisito parcial para optar al título de
Ingeniero Eléctricista**

Director

**Fabián Salazar, Master Ingeniería Eléctrica
Profesor**

**UNIVERSIDAD DE LA SALLE
FACULTAD DE INGENIERÍA
PROGRAMA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA
BOGOTÁ D.C.
2017**

Nota de Aceptación:

Firma del presidente del jurado

Firma del jurado

Firma del jurado

Bogotá D.C., Enero de 2017.

***Dedico este trabajo a Danna Español,
Quien siempre me apoyo y confió en mí.***

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo es resultado del apoyo de todas esas personas que con su tiempo y dedicación permitieron hacer esto posible. Un agradecimiento especial para mi madre, el ingeniero Fabián Salazar y Adrián Correa que me guiaron en este proceso, para hacer de este documento posible.

ÍNDICE GENERAL

	Pág.
I. INTRODUCCIÓN.....	12
II. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA	13
III. METODOLOGÍA	14
IV. RESULTADOS.....	15
V. CONCLUSIONES.....	15
VII. Referencias	16
ANEXO A	17
I. OBJETIVO	17
II. INTRODUCCION	17
III. CONCEPTOS TEORICO Y METODOS ANALISIS DE CRITERIOS AREAS	17
IV. METODOLOGIA	30
V. EJEMPLO	31
VI. RESULTADOS.....	31
VII. ANÁLISIS DE RESULTADOS	38
VIII. EJERCICIO.....	38
IX. REFERENCIAS	39
ANEXO B	40
I. OBJETIVO	40
II. INTRODUCCION	40
III. CONCEPTOS TEORICO Y METODOS ANALISIS DE VALORES PROPIOS	40
IV. METODOLOGIA	61
V. EJEMPLO	62
VI. RESULTADOS.....	63
VII. ANÁLISIS DE RESULTADOS	68
VIII. EJERCICIO.....	68
IX. REFERENCIAS	69
ANEXO C	70
I. OBJETIVO	70
II. INTRODUCCION	70
IV. EJEMPLO.....	71
V. METODOLOGIA	71
VII. ANÁLISIS DE RESULTADOS	86
VIII. EJERCICIO.....	87
IX. REFERENCIAS	87

ÍNDICE DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Matriz de priorización según indicadores propios. (Kundur, 1994)	29
Tabla 2. Datos de curva de oscilación para fallo permanente.....	36
Tabla 3. Datos de curva de oscilación para fallo aislado en 0,05 segundos.	37
Tabla 4. Datos de curva de oscilación para fallo aislado en 0,075 segundos	37
Tabla 5. Matriz de participación	67
Tabla 6. Parámetros principales	72
Tabla 7. Parámetros de los nodos del ejemplo tratado.....	74
Tabla 8. Parámetros de la máquina síncrona.....	74
Tabla 9. Parámetros del Generador.....	75
Tabla 10. Parámetros del transformador	76
Tabla 11. Parámetros de la línea	76
Tabla 12. Parámetros del breaker.....	77
Tabla 13. Parámetros de la falla.....	77
Tabla 14. Parámetros del barraje infinito.....	78
Tabla 15. Valores propios del SEP	80
Tabla 16. Factores de participación del SEP.....	80
Tabla 17. Parámetros del AVR	81
Tabla 18. Valores propios del SEP con AVR	83
Tabla 19. Valores de participación del SEP con AVR	83
Tabla 20. Parámetros del AVR	84
Tabla 21. Valores propios del SEP con AVR+PSS	85
Tabla 22. Valores de participación del SEP con AVR+PSS.....	85

ÍNDICE DE FIGURAS

	Pág.
<i>Figura 1. Clasificación de análisis de estabilidad</i>	14
Figura 2. Conexión en anillo y radial	18
Figura 3. Diagrama de máquina síncrona de rotor cilíndrico	18
Figura 4. Diagrama circuital y fasorial de máquina síncrona de rotor cilíndrico	18
Figura 5. Diagrama circuital y fasorial	19
Figura 6. Diagrama fasorial de potencia del generador	20
Figura 7. Diagrama de una línea.....	22
Figura 8. Límites del ángulo de potencia.....	24
Figura 9. Análisis de áreas en la variación de la potencia mecánica	24
Figura 10. Análisis de sistema estable mediante el criterio de áreas	25
Figura 11. Criterio de igualdad de áreas con aislamiento de la falla.	25
Figura 12. Sistema de potencia	31
Figura 13. Circuito del sistema antes de la falla	32
Figura 14. Circuito de potencia eléctrica antes de la falla	33
Figura 15. Circuito del sistema durante la falla	33
Figura 16. Circuito del sistema en falla (1)	33
Figura 17. Circuito del sistema en falla (2)	34
Figura 18. Circuito del sistema en falla (3)	34
Figura 19. Curva de oscilación en falla	34
Figura 20. Circuito del sistema después de la falla.....	35
Figura 21. Curvas del criterio de áreas	36
Figura 22. Escenarios de la curva de oscilación.....	38
Figura 23. Curvas de oscilación ejercicio propuesto	39
Figura 24. Análisis de estabilidad por valores propios.....	44
Figura 25. Modelo clásico de SEP	47
Figura 26. Ley de Faraday	48
Figura 27. Circuito de acople magnético	49
Figura 28. Densidad de flujo en los polos	50
Figura 29. Ejes cuadratura y directo en la máquina.....	50
Figura 30. Diagrama fasorial de ejes	50
Figura 31. Diagrama fasorial de la máquina de polos saliente	51
Figura 32. Diagrama de ángulo de potencia máquina de polos salientes	52
Figura 33. Diagrama de ángulo de potencia máquina síncrona de polos salientes.....	53
Figura 34. Ilustración del movimiento de las fases de una máquina síncrona.....	53
Figura 35. Curva de saturación de máquinas síncrona	54

Figura 36. Circuitos de flujo de cuadratura	55
Figura 37. Diagrama de bloques del sistema de prueba	60
Figura 38. Diagrama unifilar de sistema de potencia	62
Figura 39. Circuito del sistema después de la falla.....	63
Figura 40. Diagrama de bloques con AVR y PSS	68
Figura 41. Ventana de comandos.....	71
Figura 42. Ventana principal	72
Figura 43. Ventana de la librería	73
Figura 44. Ventana simulación	73
Figura 45. Conectores y tipos de barrajes.....	73
Figura 46. Circuito nodal	74
Figura 47. Máquinas eléctricas	74
Figura 48. Circuito nodal incluyendo el generador	75
Figura 49. Librería de flujo de potencia	75
Figura 50. Circuito de generación.....	76
Figura 51. Circuito de alimentación	76
Figura 52. Líneas de transmisión.....	77
Figura 53. Librerías de tipo de fallas	77
Figura 54. Circuito de falla	78
Figura 55. Circuito del ejemplo	78
Figura 56. Valores propios del ejemplo considerado	79
Figura 57. Simulación de tensión del SEP.....	80
Figura 58. Librería de controladores.....	81
Figura 59. SEP con AVR.....	82
Figura 60. Gráfica de los valores propios del SEP con AVR.....	82
Figura 61. Simulación de tensión con AVR	83
Figura 62. SEP con AVR+PSS.....	84
Figura 63. Gráfica de los valores propios del SEP con AVR+PSS	84
Figura 64. Simulación de tensión con AVR+PSS	85
Figura 65. Ventana de reporte.....	86
Figura 66. Ventana de gráficas	86

LISTADO DE VARIABLES

V_s	Voltaje de salida del generador
A	Constate adimensional de las líneas eléctricas
V_R	Voltaje de recibo en la carga
B	Constate en ohm de las líneas eléctricas
I_R	Corriente de recibo
I_S	Corriente de envío a la carga
C	Constate en ohm de las líneas eléctricas
D	Constate adimensional de las líneas eléctricas
P_R	Potencia de recibo
E_g	Tensión del generador
E_m	Tensión del motor o carga
X	Reactancia del sistema
P	Potencia activa
P_{max}	Potencia máxima del generador
J	Momento de inercia del generador
dt	Derivada con respecto al tiempo
T_a	Torque de aceleración
T_m	Torque mecánico
T_e	Torque eléctrico
W_n	Velocidad nominal del rotor
H	Constante inercial del generador
w_{0m}	Velocidad angular inicial de la máquina
VA_{base}	Potencia base
w_r	Velocidad angular del rotor
δ	Ángulo de potencia o deslizamiento
w_0	Velocidad angular inicial
δ_0	Ángulo de potencia inicial
p_s	Potencia suministrada
X_f	Impedancia del sistema durante la falla
r_1	Relación entre la impedancia de falla y pre-falla
δ_x	Ángulo de potencia durante la falla si se estabiliza
x_p	Impedancia de sistema después de la falla
r_2	Relación entre la impedancia de falla y pos-falla
δ_i	Ángulo donde el sistema se estabiliza
A_1	Área de aceleración
A_2	Área desaceleración
δ_c	Ángulo crítico
δ_{max}	Ángulo máximo de potencia sin perder la estabilidad
M	Momento inercial del generador
G	Constante del generador base
P_a	Potencia de aceleración
p_e	Potencia eléctrica
Gr	Grados eléctricos
Δt	Variación de tiempo
$\Delta \delta$	Variación del ángulo de potencia
$\Delta \delta_{ant}$	Variación previa del ángulo de potencia
δ_{on}	Ángulo de potencia inicial
t	Tiempo

t_-	Instante de tiempo anterior
t_+	Instante de tiempo posterior
t_{av}	Instante de tiempo promedio
S_B	Potencia base
V_B	Voltaje base
Q	Potencia reactiva
V_{LT}	Voltaje de lado de baja del transformador
E_B	Tensión del bus
X_T	Impedancia transitoria del transformador
X_G	Impedancia del generador
X_B	Impedancia del bus
x	Ecuaciones diferenciales que rigen el sistema
u	Variables de entrada
u_i	Variables iniciales de entrada
f	Funciones que rigen al sistema
f_i	Función inicial
y	Salida del sistema
g	Funciones de salida del sistema
g_i	Función de salida inicial
u_0	Variables iniciales del sistema
Δu	Variaciones en las variables
X_{i0}	Condiciones iniciales de las ecuaciones diferenciales
Δx_i	Variaciones en las ecuaciones diferenciales
n	Número de ecuaciones y variables del sistema
r	Número de entradas
j	Número de variables de salida
Δy_j	Variaciones en la salida del sistema
∂	Derivada parcial
A	Matriz física del sistema
B	Matriz de control de entrada
C	Matriz de salida
D	Matriz de proporción entre la salida y entrada

GUÍA PARA MODELADO DE ESTABILIDAD EN SISTEMAS DE POTENCIA

Guillermo Alfonso Palacios Cabrera

Universidad de La Salle, Bogotá, Colombia

Resumen— El presente trabajo muestra el proceso de la realización de una serie de guías, además de la metodología para tener la información necesaria y comprender la estabilidad, partiendo desde conocimientos básicos de circuitos y física, en estas guías se encuentra como conocer la estabilidad del sistema y como poder realizar la compensación del mismo. Con el método de criterio de áreas iguales se encuentra el tiempo de despeje de la falla, a partir del ángulo crítico del sistema. Se debe tener en cuenta más parámetros del sistema para garantizar la estabilidad; se puede implementar el método de valores propios y obtener la matriz de estado, y así conocer la estabilidad del mismo, este método es más real permitiendo implementar dispositivos de compensación para lograr la estabilidad. Es por ello que se realizó de una forma más amigable y con claridad a las inquietudes que se pueden presentar para el estudiante.

Palabras clave— Estabilidad, metodología, sistemas de potencia, amigable.

Abstract — The one that is in the presence of a series of Works for the Sample The Process of Guide, in addition to the Stability Needed for the Information to have the Understanding Methodology, with the Basic Knowledge of Circuits and Physics, SE system Find In these How to know the stability guides and how to make the compensation of the same. For the case of the criterion method of clearing areas Same Fault Time, a critical angle starting from the EL system. More Parameters yes You can take into account for the case of the systems, own and can be implemented to obtain the values of the method of the State Matrix, stability, so to know the same, this method of compensation is more devices to achieve stability Allowing real implementation. It is by what is done in a more friendly and with which you can PRESENT clarity for the student of the concerns

Keywords— Stability, methodology, power systems, friendly.

I. INTRODUCCIÓN

La estabilidad de un sistema de potencia, es la capacidad del mismo de volver a unas condiciones iniciales de operación, retornando a un estado de operación aceptable luego de experimentar una perturbación (cortocircuitos, salida de líneas/ transformadores, pérdida de generación, pérdida o aumento de demanda), debido a las grandes variaciones que se

pueden presentar en los sistemas potencia es necesario el estudio de estabilidad. Las características SEP (sistemas eléctricos de potencia) son variantes en el tiempo y oscilatorios, donde las ecuaciones diferenciales que los rigen son no lineales. Para poder conocer la estabilidad se requiere utilizar modelos complejos como Lyapunov, para la solución de ecuaciones no lineales. Existen métodos de aproximación para la solución de estas ecuaciones diferenciales, mediante la linealización de las ecuaciones del sistema.

La estabilidad se puede también definir como la capacidad de toda máquina síncrona de mantener el sincronismo aun cuando se presente una perturbación. [6]

Otra forma de explicar la estabilidad del sistema de potencia, es explicar cómo sus propiedades le permiten permanecer en un estado de equilibrio operativo, en condiciones normales de operación y recuperar un estado aceptable de equilibrio después de ser sometido a una perturbación. [7]

La inestabilidad del sistema afecta principalmente los generadores, a pesar de la actuación de los elementos de protección, los cambios que pueden causar la variación del rotor. Existen dispositivos o controladores encargados de realizar la compensación. [5]

Los efectos que se pueden tener con la pérdida de estabilidad o inestabilidad, en el sistema de potencia o en la máquina síncrona de generación, se puede clasificar de distintas formas. Si se analiza el generador como una máquina síncrona que oscila en un punto de equilibrio, se está hablando de que esta máquina es estable. Pero cuando la máquina sufre un cambio en su carga, puede causar un desequilibrio, dependiendo si la modificación es excesiva o brusca, ya que puede causar la pérdida del sincronismo y sobrepasar los límites de estabilidad. [1]

En caso de que el sistema pueda recuperarse ante la presencia de una perturbación mientras el sistema no supere los límites de estabilidad del mismo, el sistema puede oscilar en otro punto

de equilibrio, mientras esté dentro de los rangos aceptables de tensión, ángulo y frecuencia. [4]

Superar este límite de estabilidad puede presentarse en cualquier instante del tiempo. La clasificación puede ser en régimen transitorio o estacionario. La estabilidad estacionaria para una condición operativa particular, se da, si después de una pequeña perturbación alcanza una condición de operación estable idéntica o muy cerca de la condición operativa que existía antes de la perturbación. Un sistema de potencia tiene estabilidad transitoria para una condición operativa particular y para una perturbación particular si después de la perturbación alcanza una condición de operación estable. [2]

Una de las clasificaciones para el análisis de estabilidad, es el tipo de perturbación. Las perturbaciones que se pueden presentar en el sistema son pequeñas o grandes. Cuando se habla de una pequeña perturbación se habla de que el sistema puede garantizar el flujo de potencia entre la generación y la demanda. Para el caso de una gran perturbación se presenta un desbalance entre la potencia generada y la demanda. [3]

Los estudios o documentos de estabilidad son bastante complejos, debido a la gran cantidad de información previa necesaria para su entendimiento. Cuando se realiza un estudio de estabilidad se debe entender el porqué de las formulaciones planteadas para el estudio, para lograr su entendimiento debido a que dependiendo el enfoque estas pueden ser diferentes. La motivación para la realización de esta guía es tomar el ejemplo planteado del SMIB, para seguir una línea de estudio y explicar la relación que habría para los métodos utilizados en cada una de las guías. El objetivo es compartir esta información dando bases que permitan al estudiante realizar sus propios estudios de estabilidad, en otros sistemas de potencia.

La realización de las guías contiene un ejemplo sencillo de un generador conectado a un barraje infinito mediante una línea en paralelo (SMIB- System Machine Infinite Bus), el cual permite analizar la estabilidad debido a la presencia de una falla en una de las líneas, garantizando el flujo de potencia, pero teniendo efecto en el sincronismo del generador. El planteamiento de la guía uno del criterio de áreas iguales, se realiza mediante circuitos sencillos, relacionando la fórmula de momento inercial del generador síncrono. La guía dos se caracteriza por utilizar una mayor cantidad de parámetros para la estabilidad en los sistemas de potencia implementando el método de valores propios, debido a la complejidad se hace un enfoque más teórico para el entendimiento del estado en el que se encuentra, para esto se realiza unos planteamientos desde lo más básico de circuitos y física, hasta estabilidad. Como complemento en la tercera guía se muestra una explicación de forma sencilla sobre la implementación del software PSAT, mediante simulaciones del sistema de potencia. Las tres guías anexas se realizan en

formato similar a un informe IEEE; las guías están compuestas por las siguientes secciones: I. Resumen de la guía, II. Marco teórico el cual contiene el desarrollo necesario para la implementación del método, III. Resultado con el ejemplo SMIB para realizar el estudio de estabilidad, IV. Análisis que expone lo más relevante de los resultados obtenidos y V. La bibliografía (en normas APA) de los textos guías para los estudios realizados.

II. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

Los sistemas eléctricos de potencia constan de una amplia interconexión de elementos, como generadores, líneas de transmisión, cargas, subestaciones, elementos de control, entre otros, los cuales permiten la transformación de energía de recursos primarios (recursos hidráulicos, térmicos, eólicos) a energía eléctrica, el transporte de esta energía desde los centros de generación hasta los grandes centros de consumo, y la distribución de la energía eléctrica transportada a cada uno de los usuarios conectados a las redes primarias y secundarias para su consumo final [8], se debe garantizar el buen funcionamiento de los generadores. Esto implica satisfacer la demanda después de un evento, manteniendo los valores adecuados de tensión y frecuencia.

La pérdida de estabilidad en un sistema de potencia tiene una o varias de las siguientes manifestaciones:

- Pérdida de sincronismo entre los generadores ante un evento de cortocircuito y pérdida de capacidad en la red.
- Oscilaciones no amortiguadas con posterior pérdida de sincronismo entre los generadores.
- Caída o aumento incontrolado de tensiones.
- Caída o aumento incontrolado de frecuencia.

Todas estas manifestaciones conllevan a la actuación de los dispositivos de protección/control y si no se toman las medidas necesarias (operación coordinada de los mismos) hay un colapso general.

La estabilidad se puede clasificar en tres tipos: ángulo, frecuencia y tensión.

La estabilidad de ángulo, se puede estudiar de acuerdo al tipo de perturbación en régimen transitorio (corto plazo). Para el caso de una pequeña perturbación se presenta como leves cambios en el ángulo del rotor que se pueden analizar de forma lineal y no lineal. Cuando se presenta una gran perturbación, se presentan grandes variaciones en el ángulo del rotor que ocasionan la no periodicidad en la señal del sistema.

La estabilidad de tensión, se puede analizar cuando los niveles de voltaje en los nodos son aceptables después de someterse a

una perturbación, esta se puede analizar en régimen transitorio o estacionario (largo plazo). Para el caso de pequeña señal es necesario linealizar las ecuaciones de tensión, cuando es grande una perturbación no se podrá linealizar.

Estabilidad de frecuencia. El cambio de la carga, implica una variación inversa de la frecuencia; cuando la carga aumenta la frecuencia disminuye, debido a la ecuación de momento inercial del generador esta se puede analizar en régimen transitorio o estacionario. Los efectos de la perturbación pequeña o grande es similar para ambos casos.

El garantizar el sincronismo de la máquina depende del tipo de perturbación grande o pequeña; el tiempo de análisis para el estudio de estabilidad, es tiempo corto (régimen transitorio) o largo (régimen permanente). Como se puede observar en la figura 1.

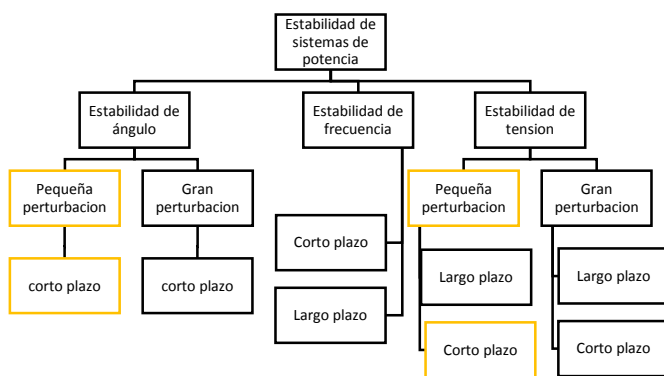


Figura 1. Clasificación de análisis de estabilidad

La necesidad de implementar estas guías, es facilitarle al estudiante el entendimiento de la estabilidad de pequeña señal, y sus efectos en los sistemas de potencias. La aplicación de este método de mayor número de nodos, arroja una mayor cantidad de información en los resultados, por ello la necesidad de implementar una herramienta computacional amigable para la investigación.

El análisis de estabilidad se puede comprender de una forma más fácil para el caso de pequeña señal, debido a la dificultad que se presenta para gran perturbación donde se necesita implementar ecuaciones no lineales para conocer la estabilidad del sistema. Debido a esto en las guías se planteó un alcance al estudio de tensión y ángulo, para perturbaciones de pequeña señal.

La implementación de software para los estudios de estabilidad permite obtener los resultados de los valores propios del sistema, permitiendo analizar de una forma directa la estabilidad del circuito. Debido a que la mayoría de sistemas son bastante grandes, se debe simplificar estos datos obtenidos, buscar una herramienta adicional puede ser muy útil para la compensación de los sistemas. El PSAT permite trabajar estos

datos en MATLAB o Excel, otros programas como DIGSILENT tiene unos resultados más precisos pero dificulta la importación de esta información.

III. METODOLOGÍA

El análisis de estabilidad en sistemas de potencia para perturbaciones de pequeña señal, requiere métodos de estudio bastante complejos. Las técnicas planteadas se implementan para un sistema simple como es el SMIB. El método de criterio de áreas permite comprender el efecto de la estabilidad de una forma sencilla. Los valores propios permiten comprender el funcionamiento del sistema y los parámetros que afectan la estabilidad. Estos cálculos se pueden realizar mediante programas como PSAT, el cual muestra los resultados de una forma más completa.

Las guías están compuestas de la misma forma que un artículo IEEE, con el objetivo hacer entender al lector de una forma agradable el documento, pero teniendo un contenido extenso, explicando de una forma más detallada la información necesaria para entender el ejemplo que contiene la guía.

Entre las partes encontramos: **Resumen**, en el resumen ejecutivo es no mayor a 150 palabras sobre el contenido de la guía. **Índice de términos**, Los cinco términos más importantes dentro de la guía. **Marco teórico**, Contiene todos los conceptos, formulación y teoría. **Resultados**, Contiene un ejemplo sencillo con las explicación detalla para su solución. **Análisis de resultados**, Como menciona su título, se expone lo que implica cada uno de los valores obtenidos. **Referencias**, las citas bibliográficas para la realización de la guía.

Criterio de áreas y curva de oscilación, para una máquina con respecto a una barra infinita, el criterio de áreas iguales que se plantea en esta guía, va enfocado en el análisis de estabilidad y sincronismo del generador ante la presencia de una falla trifásica a tierra, ocasionando oscilaciones no amortiguadas como se muestra en las curva de oscilación.

Análisis modal para sistema SMIB. Esta guía implementa el método de valores propios; es una continuación de la guía anterior teniendo en cuenta las manifestaciones del método anterior, adicionando parámetros como la variación de tensión y el ángulo del generador.

Implementación de psat para simulación dinámica de sistemas de potencia, esta guía tiene en cuenta las manifestaciones anteriores, el cual es refuerzo de la información anterior. Pero con una característica que tiene en cuenta mayor cantidad de parámetros. Esta herramienta muestra los resultados en Matlab, haciendo más fácil el trabajar o modificar los resultados para su entendimiento.

IV. RESULTADOS

El documento muestra de una forma detallada de donde se obtuvo toda la información necesaria para entender los conceptos básicos de ingeniería. Además explica de una forma clara como se obtiene y se puede realizar una simulación de estabilidad de pequeña señal y como estos resultados obtenidos por este programa tiene relación con los cálculos realizados en las guías anteriores.

En la primera guía se encuentra un ángulo crítico o límite de estabilidad del sistema, este valor a su vez permite conocer el tiempo máximo de despeje de la falla sin llegar a causar la pérdida del sincronismo, teniendo en cuenta el ángulo de potencia o llamado como deslizamiento del rotor. Debido a que se presentan más parámetros o variables en los sistemas de potencia para un análisis más completo con el objetivo de garantizar la estabilidad se implementan dispositivos de compensación, logrando así obtener el valor de la ganancia para avalar la estabilidad del sistema, permitiendo que el estudiante pueda realizar unos estudios más avanzados en el tema de estabilidad como gran perturbación o análisis de estabilidad de frecuencia. Se plantea una guía sobre el manejo de una herramienta computacional que permita realizar este tipo de estudios. Donde el ejemplo planteado sea similar al de guías anteriores haciendo más fácil el entendimiento de los resultados que se obtienen, ya que estos son similares a la guía anterior y refuerzan la teoría planteada.

Las guías comprenden la estabilidad de pequeña señal, donde las ecuaciones que rigen el estado del sistema pueden ser linealizadas mediante aproximaciones. Pero el caso de análisis de grandes perturbaciones no se puede linealizar. Los métodos planteados se limitan únicamente a pequeña señal; en el caso de querer trabajar con grandes perturbaciones es necesario implementar métodos como Lypunov o Deslastre para solucionar problemas de inestabilidad que no están dentro del alcance de este documento.

El ejemplo planteado de SMIB en las guías, es un sistema de una máquina conectada a un bus, que no se usa para múltiples máquinas. Este documento contiene las bases para realizar cálculos cuando se tiene múltiples generadores y obtener la matriz de estado del sistema.

La práctica para estas guías sólo se limitaría a la simulación en software que tenga sistemas de potencias dinámicos. Para realizar de una forma más práctica implicaría la utilización de Labview y recreación de sistemas de potencia, para el análisis de estabilidad.

El desarrollo de este tema teórico y de cálculo contiene ecuaciones bastante complejas muy aproximadas al modelo

real. El entendimiento del por qué el sistema debe ser linealizado, de donde nace el planteamiento y la relación que existen entre cada una de estas ecuaciones es uno de los retos más grandes para el entendimiento de la temática, además del funcionamiento de los dispositivos de compensación para el sistema.

Para el desarrollo de estas guías se debe tener un mínimo de conocimientos en los siguientes temas:

- ✓ Circuitos eléctricos y sistema por unidad
- ✓ Conocimientos en física electromagnética
- ✓ Análisis de señales
- ✓ Movimiento armónico simple
- ✓ Variable compleja
- ✓ Ecuaciones diferenciales, ecuaciones lineales y no lineales
- ✓ Líneas eléctricas

Como se menciona anteriormente esta guía abarca información específica y necesaria para el entendimiento de la estabilidad en los sistemas de potencia. Las mayores ventajas que se pueden obtener con relación a otros documentos, es el trabajo realizado especificando donde se plantea y obtienen cada una de las ecuaciones, permitiendo al estudiante relacionar con otras materias o temas, como las ecuaciones de líneas de transmisión o el manejo de los números complejos.

Una forma de poder complementar este trabajo, es con la implementación de ejercicios para el análisis de estabilidad en sistemas robustos. Estos documentos permitirán al estudiante estudiar la estabilidad no sólo para pequeñas sino también grandes perturbaciones.

Este documento sirve de complemento a los estudiantes de ingeniería eléctrica que quieran profundizar en el tema, debido a que muestra de forma precisa cada uno de los parámetros que se deben tener en cuenta, también permiten la realización de cálculos y el mejoramiento de simulación del sistema de potencia de prueba en el laboratorio.

V. CONCLUSIONES

Se logró plantear tres documentos que permiten dar las bases para el entendimiento básico de la estabilidad de sistema de potencia ante la presencia de una pequeña perturbación.

Si se desea hacer un análisis rápido sobre la estabilidad del sistema se puede implementar una técnica como el criterio de áreas teniendo la ecuación de ángulo de potencia, el cual

permitirá conocer de una forma rápida el límite de estabilidad del sistema. En el caso de que se quiera realizar un estudio teniendo algunos parámetros complementarios se pueden implementar el método de valores propios. Si el sistema de potencia es complejo se puede implementar un programa de psat que permite obtener de una forma rápida la estabilidad del sistema como se muestra en la guía III.

La cantidad de información recopilada para la elaboración de las guías y el planteamiento de las fórmulas, requirió de un gran número de ecuaciones justificadas para cada una de las temáticas utilizadas.

El estudio realizado es para perturbación de pequeña señal en régimen transitorio, debido a que son de mayor efecto sobre el sistema, durante estos instantes de tiempo está expuesta la falla y su correspondiente despeje.

La implementación de una herramienta computacional permite verificar y corroborar la estabilidad del sistema, así como la compensación que se puede realizar para garantizar esta. Debido a que muchas de estas ecuaciones no son suministradas por el diseñador se observa una cantidad mayor de parámetros haciendo difícil corroborar los valores obtenidos, se debe tener un resultado similar entre los cálculos realizados y el simulado.

VII. REFERENCIAS

- [1] McGRAW-HILL, Análisis de sistemas eléctricos de potencia, William D. Stevenson, 1979, pp. 333.
- [2] Universidad de Zulia, Análisis de sistemas de potencia, Maulio Rodríguez, 1979, pp. 545.
- [3] <http://fglongatt.org/>, Estabilidad de sistemas de potencia, Francisco M. Gonzales, 2006, pp 1.
- [4] Universidad Industrial de Santander, Estudio de estabilidad en sistemas de potencia: Metodología para la evaluación de la estabilidad de tensión mediante la aplicación de inteligencia artificial, Álvaro Gómez Ruiz, 2010, pp. 20.
- [5] Escuela politécnica nacional, Análisis de estabilidad transitorio del sistema nacional interconectado del ecuador, 2007, pp. 15-16.
- [6] Universidad nacional mayor de San Marcos, estabilidad de los sistema de potencia, Luis M. Lousaunau, 2002, pp. 1.
- [7] McGraw-Hill, Power system stability and control, Prabha Kundur, 1993, pp. 17.

- [8] Universidad Tecnológica de Pereira, Análisis de estabilidad de tensión considerando sistemas de monitoreo de área amplia y características de cargas mixtas, Luis F. Rodríguez, 2004, pp. 1.

ANEXO A

GUIA I “CRITERIO DE ÁREAS Y CURVA DE OSCILACIÓN, PARA UNA MÁQUINA CON RESPECTO A UNA BARRA INFINITA”

PALACIOS, GUILLERMO

Resumen—La presente guía de trabajo contiene los cálculos para analizar el comportamiento de estabilidad de un circuito que sufre una falla, además de los diferentes escenarios mediante los cuales se aísla la falla. Para lograr lo anterior se implementó el método de criterio de áreas, se obtiene las ecuaciones durante, antes y después de la falla y así poder encontrar el ángulo crítico del sistema. También se determinan las curvas de deslizamiento angular para los tres escenarios con una falla permanente, una falla aislada en los segundos 0.5 y 0.75; se observara si esta conserva su estabilidad.

Índice de Términos—estabilidad, falla, ángulo crítico, curva de oscilación, falla aislada.

I.OBJETIVO

Analizar e identificar el modelo criterio de áreas iguales, para la determinar el ángulo crítico del sistema de Sistem Machine Infinite Bus (SMIB), el cual sufre una falla. Además de obtener la curva de ángulo del rotor para la presencia de fallas en sistema de potencia.

II.INTRODUCCION

El análisis de estabilidad de un sistema de potencia (SEP), está enfocado en lograr entender el comportamiento del sistema ante una perturbación, para poder comprender qué efectos tiene y así llegar a la conclusión sobre la continuidad en operación del sistema. Existen diversos métodos de análisis para comprender las consecuencias de los efectos en SEP ante diferentes tipos de perturbaciones. El método mostrado en esta guía es un método simplificado, el cual busca mostrar el efecto de una perturbación como una falla trifásica cortocircuito a tierra, en un SEP consiste en un generador conectado a un barraje infinito mediante dos líneas en paralelo, donde la falla ocurra en una sola línea, para garantizar el flujo de potencia. El método de análisis es estático en régimen transitorio con análisis en diferentes instantes de tiempo para comprender la estabilidad del sistema. El análisis se complementa con un método gráfico bastante simple para poder observar, en el tiempo, el efecto de una falla en el sistema.

III.CONCEPTOS TEORICO Y METODOS ANALISIS DE CRITERIOS AREAS

ESTABILIDAD

Los sistemas de potencia cumplen la función de garantizar el suministro de energía eléctrica demandada, garantizando los niveles de operación requeridos en cuanto a tensión, frecuencia y forma de onda. Cualquier perturbación que se presente en el sistema puede causar la pérdida del sincronismo de los generadores y la pérdida de estabilidad del sistema.

Las perturbaciones en el sistema de potencia se pueden producir bien sea por un cambio repentino o una secuencia de cambios en uno o varios parámetros, como cambios de tensión, corriente o impedancia. Las perturbaciones anteriores afectan los generadores causando su aceleración o desaceleración.

“Los sistemas que están interconectados tienen una mayor reserva de potencia que un sistema que trabaja sólo. De hecho, un sistema grande es más capaz de soportar una gran perturbación y, por consiguiente, es inherentemente más estable”. (Wildi, 2007)

Considérese tres generadores, conectados a sus respectivas cargas R_1 , R_2 y R_3 como se muestra en la figura 2 (b). Como los sistemas no están interconectados, cada uno puede operar a su propia frecuencia, y una perturbación en uno de ellos no afecta a los demás. Sin embargo, es preferible interconectar los sistemas entre ellos, porque mejora la estabilidad total, proporciona una mejor continuidad de servicio y es más económico. La figura 2 (a) muestra cuatro líneas de transmisión de interconexión, que vinculan tanto las plantas de generación como las regiones que reciben el servicio.

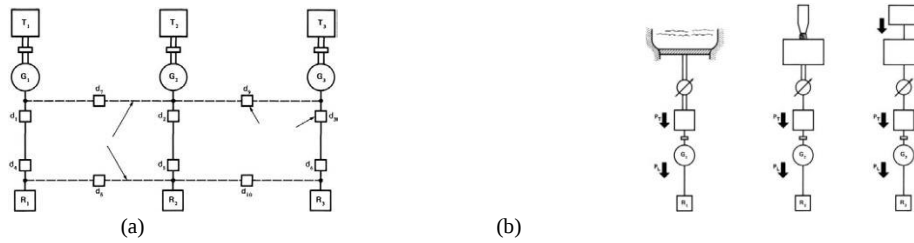


Figura 2. Conexión en anillo y radial (Wildi, 2007)

Lo anterior se puede observar en los sistemas en anillo, donde se garantizan los niveles de operación de tensión debido a que los equipos se conectan en paralelo como muestra la figura 2 (a). Para el caso en que deje de operar un generador, los demás suplen la demanda del sistema. Un sistema en anillo, después de una perturbación, se retorna más fácil a condiciones aceptables de tensión y frecuencia.

“The stability of a power system is its ability to remain in an operating equilibrium when subjected to the disturbances that are inevitable in any network made up of generating plant supplying loads. The disturbance may be small (e.g. caused by changes in load) or large (e.g. due to fault). After the disturbance a stable system returns to a condition of acceptable voltages and power flows throughout the system”. (Weedy, System Stability, 2012)

MÁQUINA SÍNCRONA DE ROTOR CILÍNDRICO

Las máquinas se pueden clasificar por su rotor en dos tipos: de polos salientes y cilíndrica (lisa). Las cilíndricas son utilizadas en centrales térmicas a vapor o gas, las cuales manejan velocidades muy altas en el rotor.

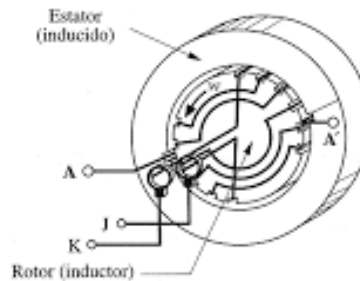


Figura 3. Diagrama de máquina síncrona de rotor cilíndrico (Martin, s.f.)

Estas piezas presentan una gran ventaja en el modelamiento del rotor cilíndrico debido a que son bastante simples con respecto a las de polos salientes ya que su geometría es completamente simétrica. Esto permite establecer las relaciones para los voltajes generados respecto de las inductancias mutuas del rotor y estator, las cuales son constantes.

Los generadores tienen una reactancia (X) debido al bobinado que se encuentra en la armadura, teniendo una resistencia óhmica (R) el bobinado. Si V es el voltaje en los terminales y el voltaje generado internamente en la máquina es E, debido a ésta impedancia se produce un ángulo, el cual se conoce como ángulo de deslizamiento del generador o ángulo de potencia (δ).

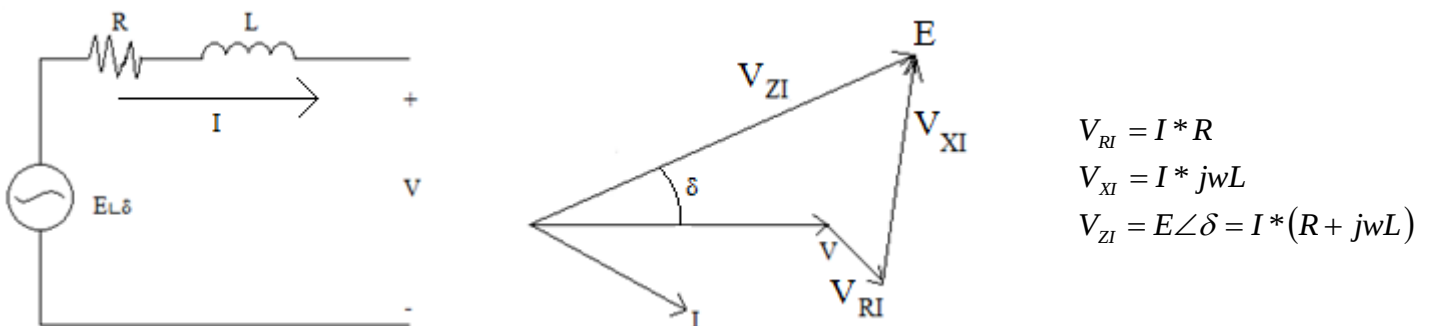


Figura 4. Diagrama circuital y fasorial de máquina síncrona de rotor cilíndrico

La conexión de una máquina a un generador síncrono, altera el voltaje interno en el generador (E), para poder garantizar la tensión en las terminales (V) de la máquina. Es por lo anterior que se puede asumir que el generador está interconectado con un barraje infinito, lo cual permite decir que se tiene una tensión constante y un ángulo de referencia en estos puntos, como se puede observar en la figura 4. Además de tener en cuenta las impedancias de los elementos que están siendo conectados al generador, como son los transformadores o cargas Z_G , Z_X , Z_Y y Z_m , para el caso de las líneas de transmisión se debe tener en cuenta el modelo general de una línea de transmisión Z_L .

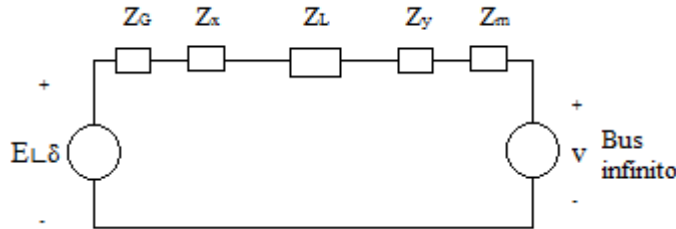


Figura 5. Diagrama circuital y fasorial

Para el caso de Z_L se debe partir de las ecuaciones de tensión y corriente de salida. Son las ecuaciones generales de una línea transmisión:

$$V_s = AV_R + BI_R \quad I_s = CV_R + DV_R$$

Ecuación 1. Modelo general de una línea de transmisión

Estas son constantes generalizadas **ABCD**, números complejos, expresiones de circuitos lineales bilaterales, donde tiene dos terminales uno de salida y otro de entrada. Las constantes **B** y **C** están dadas en ohm; **A** y **D** son adimensionales.

De la ecuación de voltaje de salida se despeja la corriente de recibo

$$I_R = \frac{V_s - AV_R}{B}$$

Ecuación 2. Corriente de recibo

Los coeficientes se pueden expresar de la siguiente forma

$$A = |A| \angle \alpha \quad B = |B| \angle \beta \quad V_R = |V_R| \angle 0^\circ \quad V_s = |V_s| \angle \delta$$

Ecuación 3. Coeficientes de una línea de transmisión

Remplazando los coeficientes en la ecuación de corriente de recibo se tiene:

$$I_R = \frac{[V_s]}{B} \angle (\delta - \beta) - \frac{|A| \cdot [V_R]}{B} \angle (\alpha - \beta)$$

Ecuación 4. Corriente de recibo con constantes generales

Como se había establecido anteriormente se busca es llegar a conocer la estabilidad, la cual está relacionada con la potencia y el ángulo de potencia (δ). Partiendo de las anteriores ecuaciones se puede plantear el diagrama fasorial de potencia.

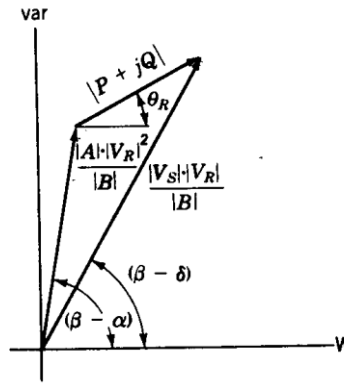


Figura 6. Diagrama fasorial de potencia del generador (Stevenson, Análisis de sistemas eléctricos de potencia, 1985)

Se puede expresar la potencia aparente con las expresiones anteriores:

$$P_R + jQ_R = \frac{[V_S] \cdot [V_R]}{B} \angle(\beta - \delta) - \frac{|A| \cdot [V_R]^2}{B} \angle(\beta - \alpha)$$

Ecuación 5. Potencia de recibo

Como sólo interesa la potencia activa, ya que es la potencia que se debe garantizar:

$$P_R = \frac{[V_S] \cdot [V_R]}{B} \cos(\beta - \delta) - \frac{|A| \cdot [V_R]^2}{B} \cos(\beta - \alpha)$$

Ecuación 6. Potencia activa suministrada por un generador a la carga modelo general

Las constantes de redes (A, B, C y D), para la mayoría de casos de estudios en una línea que desprecia la parte resistiva y capacitiva de las líneas, corresponden a un modelo de línea directo como se muestra en la figura 5:

$$A = 1 \angle 0^\circ \quad B = |X| \angle 90^\circ \quad C = 0 \quad D = 1 \angle 0^\circ$$

Ecuación 6. Constante de modelo de línea serie

Donde se obtiene, la ecuación 7

$$P_R = P_e = \frac{|E_g| * |E_m|}{|X|} \text{sen} \delta$$

Ecuación 7. Potencia Recibida simplificada de línea en serie.

Esta potencia se puede expresar de una forma más clara de acuerdo a la potencia máxima que puede suministrar el generador:

$$P_{\max} \text{sen} \delta = \frac{|E_g| * |E_m|}{|X|} \text{sen} \delta$$

Ecuación 8. Potencia máxima suministrada por un generador.

Si la potencia de salida del generador se eleva en pequeños aumentos y no se altera la tensión que se suministra a la carga, se presenta una variación en el ángulo de potencia (δ). Esta condición se conoce como límite de estabilidad estática. Otro límite de estabilidad se produce debido a una alteración brusca y repentina de las condiciones como la producida en una falla. En este caso el rotor puede oscilar más allá de 90° un cierto número de veces y se conoce como límite de estabilidad transitoria. Si las oscilaciones disminuyen la máquina vuelve a parámetros estables.

Como se puede observar en la ecuación 8, la potencia suministrada por un generador es sinusoidal, donde δ es el ángulo de la potencia y es variable, y los parámetros de tensión e impedancia son constantes y limitan el funcionamiento de la máquina. Esto quiere decir que para un suceso o cambio en el generador, el que varía es δ , donde el máximo valor de potencia que se puede obtener es cuando éste valga 90° , haciendo el seno igual a 1. Esto se ve reflejado en una variación en la velocidad o frecuencia del generador, donde el volverá a su punto de operación o equilibrio, logrando el sincronismo con la red. Se habla de pérdida del sincronismo cuando el generador puede generar la potencia necesaria pero no puede volver a su punto de equilibrio.

En el caso de la pérdida del sincronismo también se puede llegar a afectar la frecuencia nominal e incluso causar la incapacidad del generador de volver al punto de equilibrio, ocasionando la caída del sistema o pérdida del sistema, debido a que se sobrepasan los límites de velocidad de la máquina. Estos cambios o alteraciones son debido al desbalance entre la potencia generada y la demandada y afecta el ángulo de deslizamiento del generador. Si la potencia demandada aumenta puede llevar al límite angular $\delta=90^\circ$. Cuando esto sucede el generador no vuelve a recuperar la frecuencia nominal y se debe desconectar de la red debido a la gravedad del daño. Al aumentar la potencia demandada y producirse la pérdida de un generador se acentúa el desbalance de potencia. El no aislar el equipo dañado puede causar la salida de más generadores y, por consiguiente, se podría producir una desconexión en un área extensa.

EQUIVALENCIA DE IMPEDANCIA

La dificultad en el análisis de sistemas de potencia se presenta en el análisis de los nodos debido a las ecuaciones que se obtienen en cada uno de estos. Para ello se usan una serie de técnicas que permiten simplificar estas ecuaciones y el análisis. Para la guía de estudio, la técnica de equivalencia de impedancia resulta bastante útil, debido al cambio de la topología de la línea por la presencia de una falla. La forma más fácil de mostrar este cambio es con la conversión delta-estrella.

Transformación de triángulo-estrella.

El número de ecuaciones necesarias para la resolución de una red se reduce por la eliminación de los nodos, que son las uniones formadas cuando dos o más elementos puros (R , L o C , o una fuente ideal de tensión o de corriente), se conectan entre sí por sus terminales. La eliminación de nodos da lugar a una reducción de información sobre la red, conservando la tensión de entrada y salida del sistema, siendo estos los parámetros a calcular en el sistema. Cuando la resistencia y la inductancia están en serie, se eliminan, frecuentemente, de forma tácita, el nodo intermedio si no se está interesado en conocer la tensión en dicho punto. (Stevenson, 1985).

Si se observa la figura 7 (a), se puede ver el modelo mas común de análisis de falla (dos líneas en paralelo), pero este modelo hace complejo los análisis, por ello se hace un modelo equivalente que permita simplificar los cálculos, como se puede observar en la imagen (b) para poder entender como se hace una equivalencia de impedancia se tiene la figura 7.

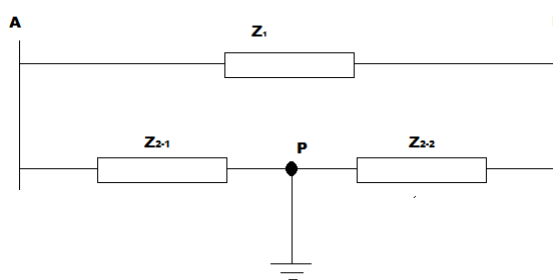


Figura 7 (a)

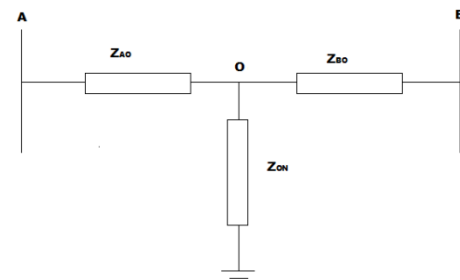


FIGURA 7 (b)

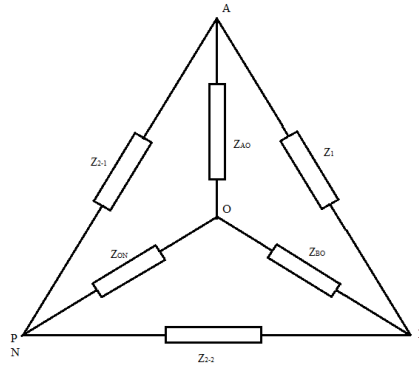


Figura 7. Diagrama de una línea en delta (a), estrella (b). Relación de impedancia entre delta-estrella

A continuación, se plantea una serie de ecuaciones que permiten realizar la equivalencia de impedancia entre triángulo y estrella:

ECUACIÓN DE EQUIVALENCIA DE IMPEDANCIA

Transformación de triángulo-estrella.

Como se puede observar en la ecuación 9 y observando la figura 7 se puede pasar de configuración triángulo a estrella, también para el caso contrario.

$$\begin{aligned} Z_{AO} &= \frac{Z_1 \times Z_{2-2}}{Z_1 + Z_{2-1} + Z_{2-2}} & Z_1 &= \frac{Z_{AO} \times Z_{BO} + Z_{BO} \times Z_{ON} + Z_{AO} \times Z_{ON}}{Z_{ON}} \\ Z_{BO} &= \frac{Z_1 \times Z_{2-1}}{Z_1 + Z_{2-1} + Z_{2-2}} & Z_{2-1} &= \frac{Z_{AO} \times Z_{BO} + Z_{BO} \times Z_{ON} + Z_{AO} \times Z_{ON}}{Z_{BO}} \\ Z_{ON} &= \frac{Z_{2-1} \times Z_{2-2}}{Z_1 + Z_{2-1} + Z_{2-2}} & Z_{2-2} &= \frac{Z_{AO} \times Z_{BO} + Z_{BO} \times Z_{ON} + Z_{AO} \times Z_{ON}}{Z_{AO}} \end{aligned}$$

Ecuación 9. Transformación triángulo-estrella

CRITERIO DE ÁREAS IGUALES

El criterio de áreas evita el análisis del modelo dinámico de la máquina para analizar la estabilidad, manipulando el modelo del generador para poder conocer si éste aumenta indefinidamente u oscila en un punto de equilibrio el ángulo de potencia. Primero se debe partir de la ecuación de oscilación de un generador, como se muestra en la ecuación.

$$\begin{aligned} J \frac{dw_n}{dt} &= T_a = T_m - T_e \quad [N \cdot m] \\ [J] &: kg \cdot m^2 \quad ; \quad [w_m] : rad \cdot mec / s \end{aligned}$$

Ecuación 10. Ecuación de oscilación

Donde la oscilación del generador está dada por la diferencia entre el torque mecánico y eléctrico de la máquina, o también de la variación en la velocidad del rotor por la constante de inercia de la máquina, con la cual se puede encontrar la constante inercial del generador:

$$H = \frac{1}{2} \frac{J w_{0m}^2}{VA_{base}}$$

Ecuación 11. Constante inercial

De esta ecuación se puede despejar la constate del generador y reemplazarla en la ecuación de oscilación:

$$J = \frac{2H}{w_{0m}^2} VA_{base}$$

$$2H \frac{\partial w_{r-pu}^2}{\partial t} = T_{m-pu} - T_{e-pu} \quad [pu]$$

Ecuación 12. Ecuación de oscilación

También se sabe que el ángulo del rotor del generador se puede expresar de acuerdo a la variación en la velocidad angular, y así expresar la ecuación de oscilación en una máquina, como se puede observar:

$$\frac{d^2 \delta}{dt} = w_0 \frac{dw_{r-pu}}{dt}$$

$$\frac{2H}{w_0} \frac{d^2 \delta}{dt} = T_{m-pu} - T_{e-pu} \quad [pu] = P_{m-pu} - P_{e-pu} \quad [pu]$$

Ecuación 13. Ecuación de ángulo de potencia

Para este caso sólo se está considerando la potencia mecánica y eléctrica. Como se había encontrado anteriormente, la potencia eléctrica suministrada por un generador a una máquina (ecuación 8), para simplificar se asume la potencia mecánica en el generador es constante para simplificar los cálculos, entonces:

$$\frac{2H}{w_0} \frac{d^2 \delta}{dt} = P_{m-pu(constante)} - \frac{|E_g| * |E_m|}{|X|} \text{sen} \delta \quad [pu]$$

Ecuación 14. Ecuación de oscilación de una máquina

La estabilidad en régimen transitorio puede ser determinada implementando las ecuaciones de oscilación para el criterio de áreas. Este método permite entender el comportamiento de las máquinas interconectadas entre sí, las cuales sufren un cambio brusco en el sistema. El objetivo es comparar el sistema en diferentes momentos de tiempo de una forma estática (sin tener en cuenta el tiempo), comparando la variación eléctrica del sistema.

PUNTO DE EQUILIBRIO DE SISTEMA ELÉCTRICO DE POTENCIA

Antes de cualquier suceso o perturbación el sistema como se sabe, es estable o se encuentra en el punto de equilibrio. Esto ocurre cuando la potencia mecánica y eléctrica son iguales.

$$P_{m-pu(constante)} = \frac{|E_g| * |E_m|}{|X|} \text{sen} \delta \quad [pu]$$

Ecuación 15. Potencia transferida

“La resolución de la ecuación de oscilación, con las hipótesis usuales de Pm (potencia mecánica) constante, red puramente reactiva y tensión constante de la reactancia transitoria, demuestra que oscila alrededor del punto de equilibrio con amplitud constante, si no sobrepasa el límite de estabilidad del régimen transitorio”. (Stevenson, 1985)

Para poder observar de una forma más clara el punto de equilibrio del cual parte el sistema, ver figura 8, la cual muestra la potencia eléctrica y mecánica, donde el punto de equilibrio es donde estas dos funciones se encuentran por primera vez.

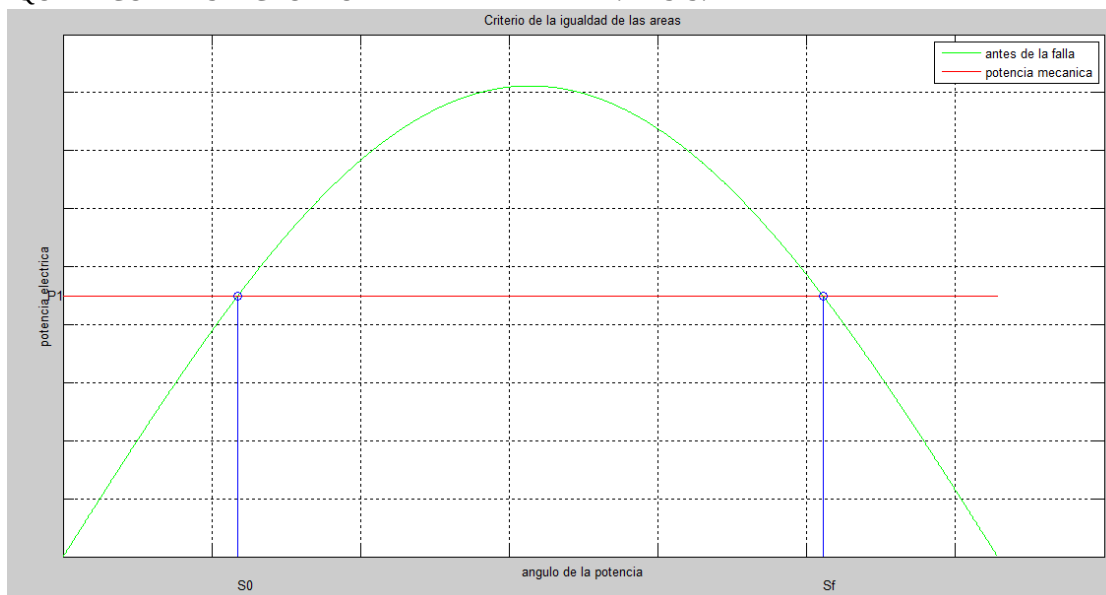


Figura 8. Límites del ángulo de potencia

También se puede observar el ángulo de potencia inicial (P_1), o el ángulo de potencia (δ_0) inicial al cual se encuentra el generador. Se debe tener en cuenta que el sistema también tiene un límite para el incremento del ángulo de potencia donde se garantiza la potencia mecánica del sistema (δ_f). En el caso de que se supere este ángulo el generador perdería el sincronismo.

Cuando se produzca una perturbación en el SEP se va a presentar un cambio en el mismo, el cual se va a ver reflejado en la variación de velocidad del rotor hasta lograr que las potencias mecánica y eléctrica sean iguales logrando volver al punto de equilibrio. Para el caso de no lograrlo la máquina puede acelerarse o frenarse hasta perder el generador. El cambio puede presentarse ya bien sea por un cambio en la potencia mecánica o eléctrica. En el caso de que se presente un cambio en la potencia mecánica el generador debe buscar generar esta potencia mecánica mediante energía cinética en el rotor como se puede observar en la figura 9. El sistema parte de una potencia inicial (P_1) con un ángulo de potencia (δ_0), el cual sufre un cambio en la potencia mecánica (P_2). Para poder generar esta nueva potencia el generador lo hace mediante la energía cinética del rotor creando una aceleración del mismo y a su vez cambiando su ángulo. Esta aceleración y energía se almacena en el rotor como un área de aceleración (A_1). Para que el sistema mantenga el sincronismo con la red debe presentar una desaceleración igual o área (A_2).

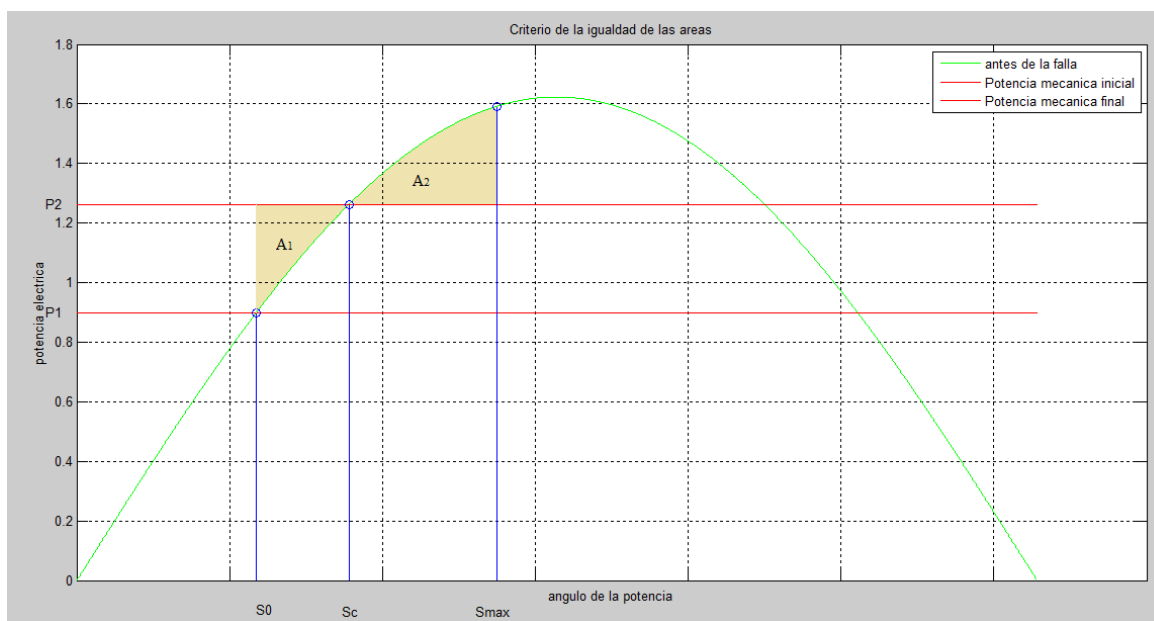


Figura 9. Análisis de áreas en la variación de la potencia mecánica

“suponga que la potencia mecánica de entrada se aumenta bruscamente. La barra infinita no puede absorber cualquier cambio de potencia eléctrica mientras el voltaje permanezca constantes. La diferencia entre la potencia mecánica y potencia eléctrica; es decir, la potencia

de aceleración, es almacenada en el rotor en forma de energía cinética. Esto hace que el rotor acelere, aumentando la velocidad y el ángulo de potencia desde δ_0 .” (Rodríguez, 1992)

Para lograr mantener el sincronismo, las áreas de aceleración y desaceleración deben ser iguales, cumpliendo el parámetro de que la potencia eléctrica debe ser igual o superior a la potencia mecánica. Volviendo a la ecuación 6, la potencia mecánica se puede asumir como constante, y las variaciones en la potencia son debidas a los cambios en la potencia eléctrica o perturbaciones en SEP. Estas se ven reflejadas en la impedancia equivalente del sistema. Esto implicaría un cambio en la ecuación de potencia del generador o ecuación 15. Para poder realizar el análisis de estabilidad de éste, se debe plantear un modelo variante en el tiempo, o simplemente para cada cambio una fórmula de potencia, lo cual implica que se debe encontrar una relación entre las dos. Esta relación (r) se debe encontrar con respecto a la impedancia equivalente, la cual determina la capacidad del sistema de poder suplir la demanda del sistema. Para poder determinar la estabilidad se debe garantizar, además, el sincronismo del generador, para ello se debe realizar el criterio de áreas como se observa en la figura 10. En ángulo de límite (δ_f) cambia dependiendo de la ecuación del generador de acuerdo a los parámetros de estudio.

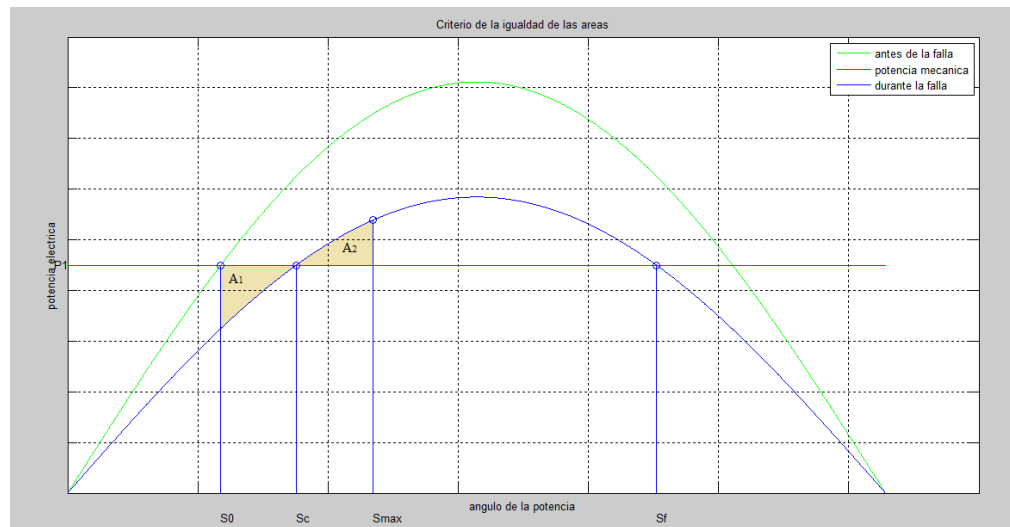


Figura 10. Análisis de sistema estable mediante el criterio de áreas

Básicamente, el criterio de áreas, planteado consiste en comparar la potencia eléctrica en diferentes instantes de tiempo o diferentes escenarios, como sería el caso del antes, durante y después de una falla. Para ello ahora se habla de un cambio después de la falla el cual implica un nuevo cambio de la impedancia y a su vez una nueva fórmula. Esto se debe tener en cuenta, ya que en la mayoría de los casos el sistema durante la falla no puede suplir la demanda, por ello se debe corregir. Al igual que en los anteriores casos se debe garantizar la potencia y el sincronismo mediante el criterio de áreas como se observa en la figura 11.

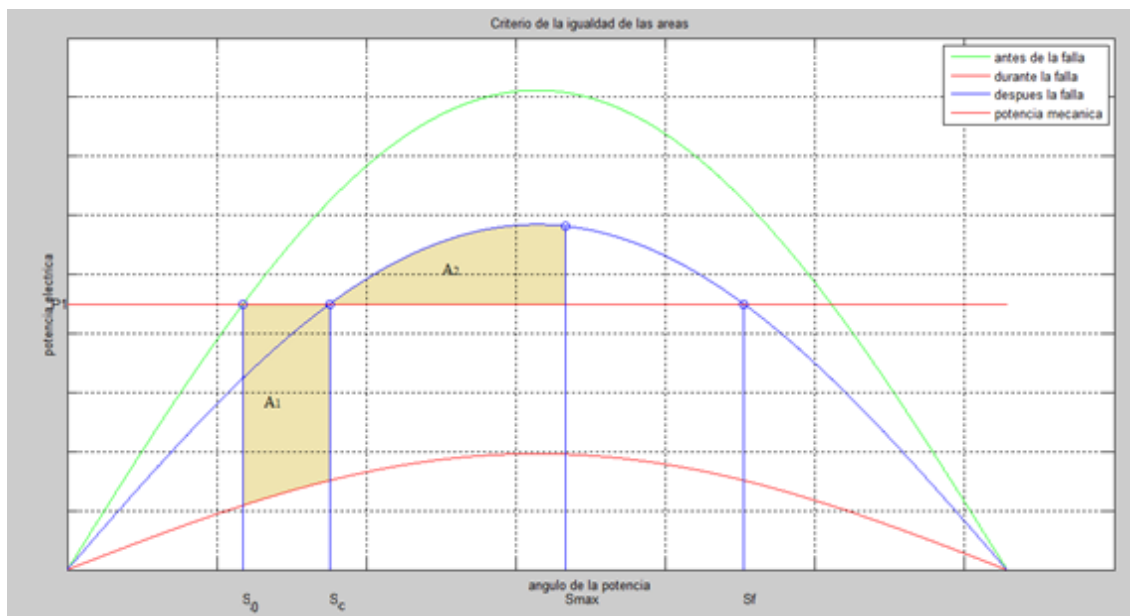


Figura 11. Criterio de igualdad de áreas con aislamiento de la falla.

La función, antes de la falla representa el estado estable de un sistema ya que estas se encuentra con la potencia demandada en el ángulo de potencia inicial (δ_0). Si se presenta una alteración grave en el sistema no va a haber punto de encuentro entre la potencia del generador y la potencia demandada como se puede observar en la función roja. Otro caso es cuando se logra aislar la falla antes de la pérdida total del sistema, se obtiene la potencia demandada en otro ángulo pero en caso de requerirse una mayor puede ser que el sistema no logre satisfacer la nueva demanda.

Para poder obtener estos valores se debe partir de la ecuación 1, y de las diferenestes ecuaciones de antes, durante y despues de la falla se obtienen las costantes para determinar la estabilidad del sistema.

Ecuación para pre-falla

De esta parte básicamente interesan los datos iniciales, que serán la potencia máxima y el ángulo de potencia inicial. Estas se obtienen de la ecuación 15, donde se obtuvieron las siguientes ecuaciones:

$$\delta_0 = \sin^{-1}\left(\frac{P_s}{P_{\max}}\right) ; \quad P_{\max} = \frac{|E_g| * |E_m|}{X}$$

Ecuación 16. Ecuación de potencia máxima

Esta parte permite tener la información a la que opera el sistema.

Ecuación para falla

Partiendo de la ecuación 8, se busca obtener una relación entre la potencia durante la falla y antes de la falla, esto permite determinar si el sistema puede o no suplir la demanda del sistema:

$$\begin{aligned} r_1 P_{\max} \sin \delta &= \frac{|E_g| * |E_m|}{|X_f|} \sin \delta = \left(\frac{|X|}{|X_f|}\right) \frac{|E_g| * |E_m|}{|X|} \sin \delta \\ r_1 P_{\max} &= \frac{|E_g| * |E_m|}{|X_f|} \\ r_1 &= \frac{|X|}{|X_f|} ; \quad \delta_x = \sin^{-1}\left(\frac{P}{P_{\max}}\right) \end{aligned}$$

Ecuación 17. Ecuación de falla, relación de impedancia equivalente entre falla y antes de la falla.

Cuando el valor de la relación por la potencia máxima sea menor a la potencia demandada por el sistema no se puede suplir la demanda y se debe realizar un aislamiento para intentar volver al punto de equilibrio, en caso contrario el sistema es capaz de suplir la demanda. En este caso, hay que saber si el sistema puede volver al punto de equilibrio, para ello hay que implementar el criterio de áreas, para encontrar el ángulo crítico.

Ecuación para pos-falla

Al igual que la anterior ecuación de pre-falla, hay que partir de la ecuación 8 para encontrar la relación entre las impedancias antes de la falla y durante la falla:

$$r_2 P_{\max} \sin \delta = \frac{|E_g| * |E_m|}{|X_p|} \sin \delta = \left(\frac{|X|}{|X_p|}\right) \frac{|E_g| * |E_m|}{|X|} \sin \delta$$

$$r_2 P_{\max} = \frac{|E_g| * |E_m|}{|X_p|}$$

$$r_2 = \frac{|X|}{|X_p|} \quad \delta_i = \sin^{-1} \left(\frac{P_s}{r_2 P_{\max}} \right)$$

Ecuación 18. Ecuación de pos-falla, relación de impedancia equivalente entre después y antes de la falla.

Esta relación (r_2) busca saber si el aislamiento de la falla permite suplir la demanda del SEP. Cuando la relación por la potencia máxima sea mayor a la potencia demanda éste será capaz de suplirla, de otra forma se presentará inestabilidad. El ángulo de potencia o ángulo crítico, no debe ser inferior al ángulo inicial (δ_i) o superior al ángulo máximo de potencia, el cual se obtiene de la siguiente forma:

$$\delta_{\max} = \pi - \delta_i \quad [rad]$$

Ecuación 19. Ecuación de límite angular

En el caso de superarlo se estará hablando de que se pierde el sincronismo. Para calcular el ángulo crítico, se debe primero encontrar la ecuación del ángulo crítico.

ECUACIÓN PARA ÁNGULO CRÍTICO

El ángulo crítico básicamente es el punto máximo al cual se puede aislar la falla sin perder el sincronismo. Es el punto en el cual el área de aceleración máximo del rotor puede desacelerarse sin perder el sincronismo. Para poder obtener el ángulo crítico primero se debe hallar el ángulo inicial (δ_0) y el ángulo en el cual opera el sistema después de la falla ($\delta_{\max}$). Estos ángulos se obtienen a partir de la potencia del generador antes de la falla y posterior a la presencia de la falla.

IGUALDAD DE ÁREAS

Este método consiste simplemente en comparar la energía almacenada en el rotor del generador, causado por la aceleración de la máquina, con respecto a la energía necesaria, y se busca dispararla para poder volver al punto de equilibrio.

Caso 1 (comparación entre antes y durante la falla)

Se calcula el área de aceleración A_1 y la A_2 que sería la desaceleración máxima. Si se llega a producir que el Área 2 sea igual o mayor al área 1, el sistema sería estable sin necesidad de aislamiento de la falla, por lo que existirá un ángulo crítico.

$$A_1 \leq A_2$$

$$P(\delta_i - \delta_0) - \int_{\delta_0}^{\delta_i} r_1 P_{\max} \sin(\delta) d\delta = \int_{\delta_i}^{\delta_c} r_2 P_{\max} \sin(\delta) d\delta - P(\delta_c - \delta_i)$$

Ecuación 20. Ecuación de criterio de áreas

Caso 2 (comparación entre antes y después de la falla)

Para garantizar la potencia ante una variación de impedancia, el sistema debe modificar el ángulo de potencia y garantizar que el área bajo la curva es la misma en los diferentes escenarios. Si esto no se llega a cumplir, se habla de una pérdida de sincronismo. Al comparar estas áreas mediante la integración de la potencia se puede llegar a un ángulo límite que puede garantizar la estabilidad del sistema. Este método de igualdad de áreas es necesario para encontrar la ecuación de ángulo crítico.

$$A_1 = A_2$$

$$\begin{aligned}
 P(\delta_c - \delta_0) - \int_{\delta_0}^{\delta_c} r_1 P_{\max} \sin(\delta) d\delta &= \int_{\delta_c}^{\delta_{\max}} r_2 P_{\max} \sin(\delta) d\delta - P_s (\delta_{\max} - \delta_c) \\
 P(\delta_c - \delta_0) + P_s (\delta_{\max} - \delta_c) &= P_{\max} \int_{\delta_c}^{\delta_{\max}} r_2 \sin(\delta) d\delta + P_{\max} \int_{\delta_0}^{\delta_c} r_1 \sin(\delta) d\delta \\
 P(\delta_c - \delta_0 + \delta_{\max} - \delta_c) &= P_{\max} \left(r_2 \int_{\delta_c}^{\delta_{\max}} \sin(\delta) d\delta + r_1 \int_{\delta_0}^{\delta_c} \sin(\delta) d\delta \right) \\
 \left(\frac{P_s}{P_{\max}} \right) (\delta_{\max} - \delta_0) &= r_2 [-\cos(\delta)]_{\delta_c}^{\delta_{\max}} + r_1 [-\cos(\delta)]_{\delta_0}^{\delta_c} = r_2 [-\cos(\delta_{\max}) + \cos(\delta_c)] + r_1 [-\cos(\delta_c) + \cos(\delta_0)] \\
 \frac{\left(\frac{P_s}{P_{\max}} \right) (\delta_{\max} - \delta_0) + r_2 \cos(\delta_{\max}) - r_1 \cos(\delta_0)}{(r_2 - r_1)} &= \cos(\delta_c)
 \end{aligned}$$

Ecuación 21. Comparación de áreas en los escenarios

Después de desarrollar la integral para la comparación del criterio de áreas, se puede encontrar la Ecuación 22 del ángulo crítico:

$$\delta = \cos^{-1} \left(\frac{\left(\frac{P_s}{P_{\max}} \right) (\delta_{\max} - \delta_0) + r_2 \cos(\delta_{\max}) - r_1 \cos(\delta_0)}{(r_2 - r_1)} \right)$$

Ecuación 22. Ecuación de ángulo crítico.

Esta ecuación permitirá encontrar el ángulo que satisfaga el criterio de áreas, más no necesariamente que satisfaga la demanda del sistema. En pocas palabras, se puede presentar el caso de encontrar un ángulo el cual presente una potencia inferior a la demandada por el sistema.

CURVA DE OSCILACIÓN

El ángulo de potencia se puede graficar en función del tiempo, a fin de obtener la curva de oscilación de la misma. El ángulo δ se calcula en un periodo suficientemente largo para determinar si el ángulo se incrementa hasta el límite o logra un máximo y comienza a disminuir. Para poder realizar la curva hay que tener ciertos parámetros como el momento inercial del generador (M), la potencia de aceleración (Pa), los grados eléctricos del rotor (Gr), ángulo inicial del generador (δ_0), la variación del ángulo en el tiempo ($\Delta\delta$).

$$M = \frac{GH}{180f}; \quad P_a = P - P_e; \quad Gr = \frac{(\Delta t)^2}{M} P_a; \quad \Delta\delta = \Delta\delta_{ant} + Gr; \quad \delta_{0_n} = \Delta\delta + \delta_0$$

Ecuación 23. Ecuación de parámetros de la curva de oscilación.

Para poder crear la curva de oscilación hay que tener en cuenta varias cosas, por ejemplo el usar las ecuaciones de antes, durante y después de la falla en el tiempo, además cuando ocurre la falla.

Básicamente, para realizar esta curva se debe tener cuidado cuando se produce un cambio entre una ecuación a otra en el tiempo. Cuando se habla de la ecuación antes de la falla es en relación al tiempo antes de la falla (tf), para el caso durante el tiempo de la falla (tf), entre antes y la reparación (tr) o aislamiento de la falla. Para el caso después de la falla sería después del tiempo de reparación.

Uno de los temas a tener en cuenta es analizar cuando en los tiempos exactos de falla y reparación se debe hacer una comparación entre antes (t-) y después (t+), se realiza un promedio para este punto. A continuación se explicará de una forma más simple como realizar estos cálculos:

Cuando $t < t_f$ (cuando se estén dando valores en tiempo antes de que ocurra la falla se aplican las siguientes ecuación)

$$t_- \rightarrow P_e = P \quad P_a = 0 \quad Gr = 0 \quad \Delta\delta = 0 \quad \delta_{0_n} = \delta_0$$

Ecuación 24. Condiciones iniciales de la curva

Cuando $t = t_f$ (cuando se estén dando valores durante la falla se aplica las siguientes ecuación)

$$\begin{aligned} t_- \rightarrow P_e &= P; \quad P_a = 0; \quad Gr = 0; \quad \Delta\delta = 0; \quad \delta_{0_n} = \delta_0 \\ t_+ \rightarrow P_e &= r_1 P_{\max} \sin(\delta_0); \quad P_a = P - P_e; \quad Gr = 0; \quad \Delta\delta = 0; \quad \delta_{0_n} = \delta_0 \\ t_{av} \rightarrow P_e &= 0; \quad P_a = \frac{P_{t-} - P_{t+}}{2}; \quad Gr = \frac{(\Delta t)^2}{M} P_a; \quad \Delta\delta = Gr; \quad \delta_{0_n} = \delta_0 + \Delta\delta \end{aligned}$$

Ecuación 25. Fórmulas para calcular el ángulo en falla

Cuando $t_f < t < t_r$ (cuando se estén dando valores en tiempo después de que ocurra la falla y antes de aislarla se aplican las siguientes ecuaciones)

$$t \rightarrow P_e = r_1 P_{\max} \sin(\delta_0); \quad P_a = P - P_e; \quad Gr = \frac{(\Delta t)^2}{M} P_a; \quad \Delta\delta = Gr + \Delta\delta_{ant}; \quad \delta_{0_n} = \Delta\delta + \delta_0$$

Ecuación 26. Fórmulas para calcular el cambio del ángulo después de la falla y antes de la reparación

Cuando $t = t_r$ (cuando se estén dando valores en tiempo, en el instante de aislamiento la falla se aplican las siguientes ecuaciones)

$$\begin{aligned} t_- \rightarrow P_e &= r_1 P_{\max} \sin(\delta_0); \quad P_a = P - P_e; \quad Gr = 0; \quad \Delta\delta = 0; \quad \delta_{0_n} = \delta_0 + \Delta\delta \\ t_+ \rightarrow P_e &= r_2 P_{\max} \sin(\delta_0); \quad P_a = P - P_e; \quad Gr = 0; \quad \Delta\delta = 0; \quad \delta_{0_n} = \delta_0 \\ t_{av} \rightarrow P_e &= 0; \quad P_a = \frac{P_{t-} - P_{t+}}{2}; \quad Gr = \frac{(\Delta t)^2}{M} P_a; \quad \Delta\delta = Gr; \quad \delta_{0_n} = \delta_0 + \Delta\delta \end{aligned}$$

Ecuación 27. Fórmulas para calcular el ángulo en reparación de la falla

Cuando $t > t_r$ (cuando se estén dando valores en tiempo después de la falla se aplican las siguientes ecuaciones)

$$t \rightarrow P_e = r_2 P_{\max} \sin(\delta_0); \quad P_a = P - P_e; \quad Gr = \frac{(\Delta t)^2}{M} P_a; \quad \Delta\delta = Gr + \Delta\delta_{ant}; \quad \delta_{0_n} = \Delta\delta + \delta_0$$

Ecuación 28. Fórmulas para calcular el cambio del ángulo después de la reparación de la falla

Constante de inercia H

La constante de inercia se define como los megajulios de energía almacenada por una máquina a la velocidad sincrónica por megavoltios-amperios de régimen de la máquina. El rango de valores es relativamente corto y depende de la potencia y velocidad de la máquina, tiene unidades [MJ/MVA], como se muestra en la tabla 1:

Type of generating unit	H
Thermal unit	
(a) 3600 r/min (2-pole)	2.5 to 6.0
(b) 1800 r/min (4-pole)	4.0 to 10.0
Hydraulic unit	2.0 to 4.0

Tabla 1. Matriz de priorización según indicadores propios. (Kundur, 1994)

Constante por unidad del generador G

Régimen de la máquina en megavoltios-amperios [MVA]

IV.METODOLOGIA

En esta guía llamada Criterio de áreas y curva de oscilación, se analiza la estabilidad en el sistema de potencia, se encuentra el ángulo crítico para determinar el tiempo máximo de despeje de la falla antes de que se presente la pérdida total del generador y se observa la oscilación de ángulo. Además el método de criterio de áreas permite simplificar el tema de sincronismo, analizando la energía almacenada en la maquina eléctrica e implementando las ecuaciones de aceleración y deseleración del rotor de la maquina síncrona. Este método reduce los cálculos a una sola ecuación, y se puede simplificar el análisis de una forma circuital para el estudio de la falla en el tiempo.

El tema de estabilidad en los sistemas de potencia es importante para la formación de los ingenieros eléctricos, ya que en los sistemas reales se deben hacer este tipo de estudios aunque con un grado mayor de dificultad y este documento sirve a los estudiantes como referencia de estudio para futuros trabajos de investigación.

El método de criterio de áreas es directo, de sencilla aplicación, la ecuacion es lineal, hace mas simple la realización de los cálculos, y a su vez sirve como introducción al tema de estabilidad.

Además de los conceptos y definiciones contenidas en este documento se desarrolló un ejercicio en el cual se escogió como sistema de prueba el SMIB, el cual será utilizado para analizar la estabilidad de ángulo con una pequeña perturbación en régimen transitorio. Para observar de una forma mas clara el efecto que tiene la falla sobre la maquina se presentaron tres escenarios; antes, durante y despues de la falla; lo que permitio conocer la estabilidad del sistema. Posteriormente se planteó un ejercicio para que sea resuelto por quienes se interesen en este tema.

Los estudios realizados de estabilidad por algunos autores como Stevenson, Maulio Rodriguez, Francisco Gonzales; parten del metodo de criterio de areas empleando el sistema SMIB. Los resultados obtenidos por parte de estos autores muestran que el mantener el flujo entre el generador y el bus infinito y el cambio en la topologia del sistema causa la perdida del sincronismo del generador. Pero en todos ellos y en este documento se comprueba que es posible volver al punto de equilibrio del sistema, siempre que sea despejada la falla sin superar el limite de estabilidad.

Este metodo tiene las siguientes ventajas: es directo, simple para este tipo de estudios, puede ser implementado para dos maquinas, tambien permite observar el comportamiento de la potencia y su ángulo, en el tiempo. Siendo por ello una de los metodos mas implementados para el entendimiento del sincronismo y estabilidad.

Para la implementacion de este metodo debemos tener los siguientes datos del sistema:

- Impedancias del sistema (y reactancia del generador)
- Frecuencia del sistema
- Voltajes nodales (tension del generador y su angulo inicial)
- Potencia demanda o generada
- Potencia y tensión base (puede ser elegida)
- Parametros de la falla y de aislamiento.
- Constante inercial del generador (y su base para sistema por unidad)

Despues de tener esta informacion podemos realizar el siguiente proceso:

1. Impedancia equivalente del sistema en operación. Donde podemos obtener los parametros de potencia y su angulo inicial.
2. Relación entre la falla y pre-falla (implementar la ecuacion 17). Con este parametro multiplicado por la potencia maxima, conoceremos si el sistema puede satisfacer la demanda del sistema si la demanda es menor al resultado de la multiplicacion. (en el caso de cumplir no es necesario los siguientes paso el sistema es estable)
3. Relación entre la pos-falla y pre-falla (utilizar la ecuacion 18). Con este parametro verificamos si el sistema puede garantizar la potencia demanda.
4. Ángulo critico (implementar la ecuacion 22). Con este parametro conoceremos si es posible que el sistema pueda estabilizarse, para ello este angulo no debe superar el angulo maximo (utilizar la ecuacion 19).

5. Función de angulo potencia u oscilación del generador (curva de oscilación, paginas 28-29). Este tema se muestra paso a paso en la parte de curva de oscilación, se debe tener en cuenta los tiempo de falla y de despeje de falla. Con esta funcion observamos si está superando el ángulo crítico, que garantiza la estabilidad.

V.EJEMPLO

DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

En el diagrama unifilar de la figura 12, se representa un generador conectado a un barraje infinito, mediante dos líneas en paralelo. Los valores están dados en unidad. Ante la presencia de falla en punto P, en la mitad de la línea, se debe determinar el ángulo crítico para el generador. Crear las curvas de oscilación para aislamiento de fallos en diferentes ciclos y sin eliminación de la falla.

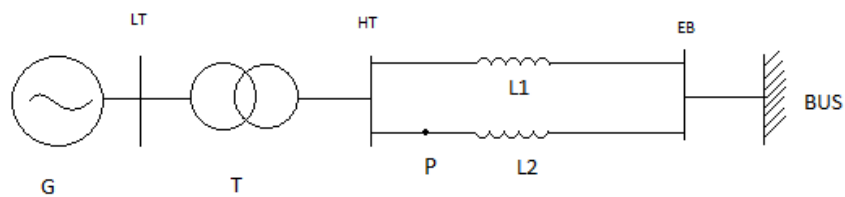


Figura 12. Sistema de potencia

Datos del sistema

Parámetros base

$$S_B = 2220 \text{ MVA} \quad V_B = 24 \text{ KV}$$

Valores del sistema

$$P = 0,9 \quad Q = 0,3 \quad V_{LT} = 1 \angle 36^\circ \quad E_B = 0,995 \angle 0^\circ \quad X'_T = 0,16$$

$$X_G = 0,28 \quad X_{L1} = X_{L2} = 0,24 \quad X_B = 0,16$$

Parámetros del generador

$$H = 3 \text{ MJ/MVA} \quad G = 1 \text{ MVA}$$

Criterios para la curva

Los tiempos para el aislamiento de la falla son en el ciclo 3, el ciclo 4,5 y además del caso de un fallo sin aislar.

VI. RESULTADOS

Se van a utilizar las ecuaciones de pre falla, falla y pos falla. Para luego implementar el criterio de áreas y conocer la estabilidad del sistema.

PRIMERA PARTE

Análisis del sistema antes de que ocurra la falla trifásica a tierra (cortocircuito a tierra). Para esta parte se busca encontrar la potencia de operación en condiciones estables, siendo esta la potencia máxima del sistema.

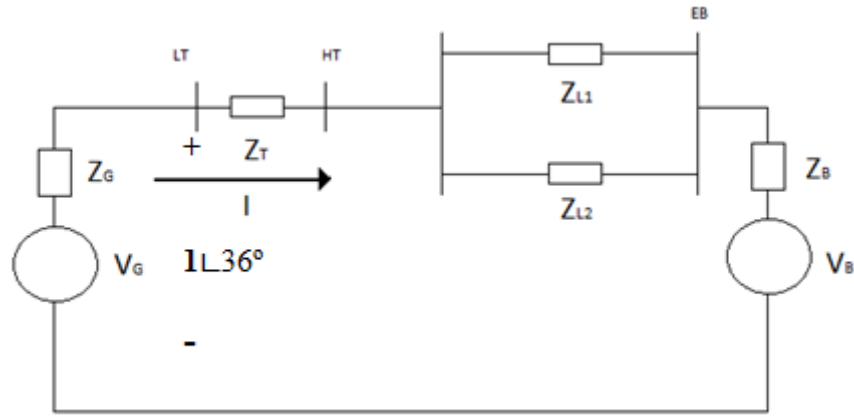


Figura 13. Circuito del sistema antes de la falla

Cálculo de la impedancia equivalente entre la salida y la entrada, del sistema de potencia, la cual se llamara Z_1 .

$$Z_1 = Z_G + Z_T + (Z_{L1} \parallel Z_{L2}) + Z_B = Z_G + Z_T + \left(\frac{Z_{L1} * Z_{L2}}{Z_{L1} + Z_{L2}} \right) + Z_B$$

$$Z_1 = 0,28j + 0,16j + \left(\frac{0,24j * 0,24j}{0,24j + 0,24j} \right) + 0,16j$$

$$Z_1 = 0,72j$$

Para poder conocer la potencia máxima que puede entregar el sistema durante su operación, se debe conocer primero la tensión en las máquinas del sistema. Como la tensión en el barraje ya se conoce, sólo falta la tensión en el generador, la cual se puede calcular a partir de la corriente de sistema:

$$I = \left[\frac{S}{V} \right]^* = \left[\frac{0,9 + 0,3j}{1 \angle 36^\circ} \right]^* = 0,9487 \angle 18^\circ \text{ pu}$$

$$I = \frac{-1 \angle 36^\circ + V_G}{0,28j} \Rightarrow V_G = (0,9487 \angle 18^\circ * 0,28j) + 1 \angle 36^\circ$$

$$V_G = 1,1129 \angle 49^\circ \text{ pu}$$

Teniendo los parámetros se puede calcular la potencia máxima durante el sistema en operación antes de que ocurra la falla, además que con esto se puede observar la curva de potencia del sistema.

$$P_{\max} = \frac{1,1129 \times 1}{0,72} = 1,5457$$

La función de la potencia eléctrica que puede suministrar el generador se puede obtener de la ecuación 1:

$$P_{elec-pos} = 1,54 \sin(\delta)$$

A partir de ella también se puede obtener el ángulo inicial:

$$\delta_0 = \sin^{-1}\left(\frac{0,9}{1,546}\right)$$

$$\delta_0 = 35,61^\circ$$

En la figura 14, se visualiza la potencia eléctrica antes de la falla con su ángulo de potencia inicial (δ_0)

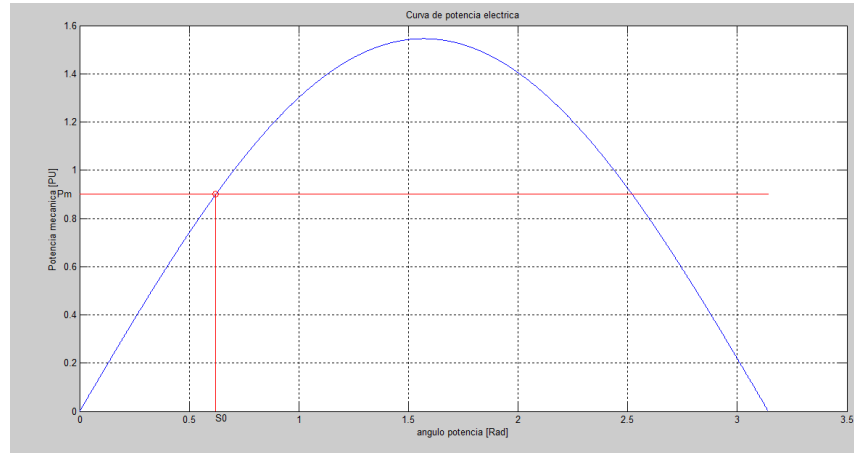


Figura 14. Circuito de potencia eléctrica antes de la falla

SEGUNDA PARTE

Análisis del sistema durante la falla. En esta parte se busca la relación entre la impedancia equivalente durante la falla y antes de la falla.

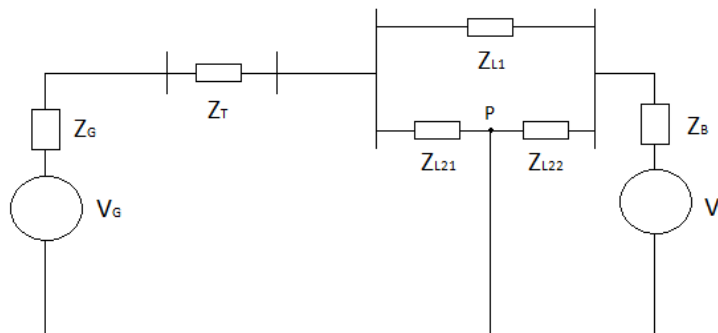


Figura 15. Circuito del sistema durante la falla

Se calcula la impedancia equivalente entre la salida y la entrada. Utilizando el método de transformación de delta a estrella para sumar las impedancias en serie de las líneas y volviendo a transformar de estrella a delta para encontrar la impedancia equivalente.

$$Z_{AO} = \frac{j0,24 \times j0,12}{j0,24 + j0,12 + j0,12} = j0,06$$

$$Z_{BO} = \frac{j0,24 \times j0,12}{j0,24 + j0,12 + j0,12} = j0,06$$

$$Z_{ON} = \frac{j0,12 \times j0,12}{j0,24 + j0,12 + j0,12} = j0,03$$

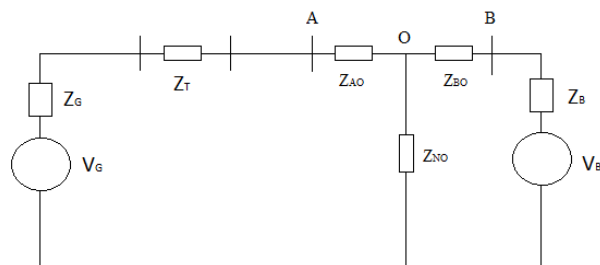


Figura 16. Circuito del sistema en falla (1)

$$Z_{AO}' = Z_{AO} + X_T + Z_G = j0,06 + j0,16 + j0,28 = j0,5$$

$$Z_{BO}' = Z_{AO} + Z_B = j0,06 + j0,16 = j0,22$$

$$Z_{ON}' = j0,03$$

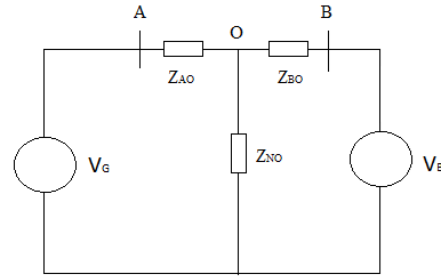


Figura 17. Circuito del sistema en falla (2)

$$Z_{L1} = \frac{j0,5 \times j0,22 + j0,5 \times j0,03 + j0,22 \times j0,03}{j0,03} = j4,3867$$

$$Z_{L2-1} = \frac{j0,5 \times j0,22 + j0,5 \times j0,03 + j0,22 \times j0,03}{j0,22} = j0,5982$$

$$Z_{L2-2} = \frac{j0,5 \times j0,22 + j0,5 \times j0,03 + j0,22 \times j0,03}{j0,5} = j0,2632$$

$$X_f = Z_{L1} = j4,3867$$

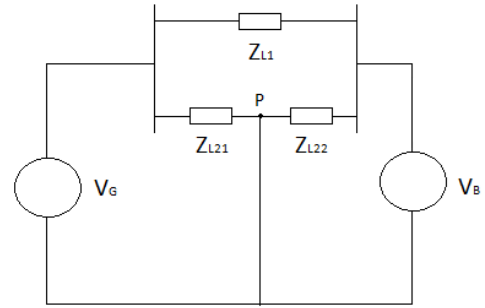


Figura 18. Circuito del sistema en falla (3)

Relación falla-pre falla

$$r_1 = \frac{0,72}{4,3867} = 0,1641$$

La potencia eléctrica

$$P_{elec-pos} = 0,1641 * 1,54 \sin(\delta)$$

Teniendo la función de potencia se puede graficar la curva de pre-falla.

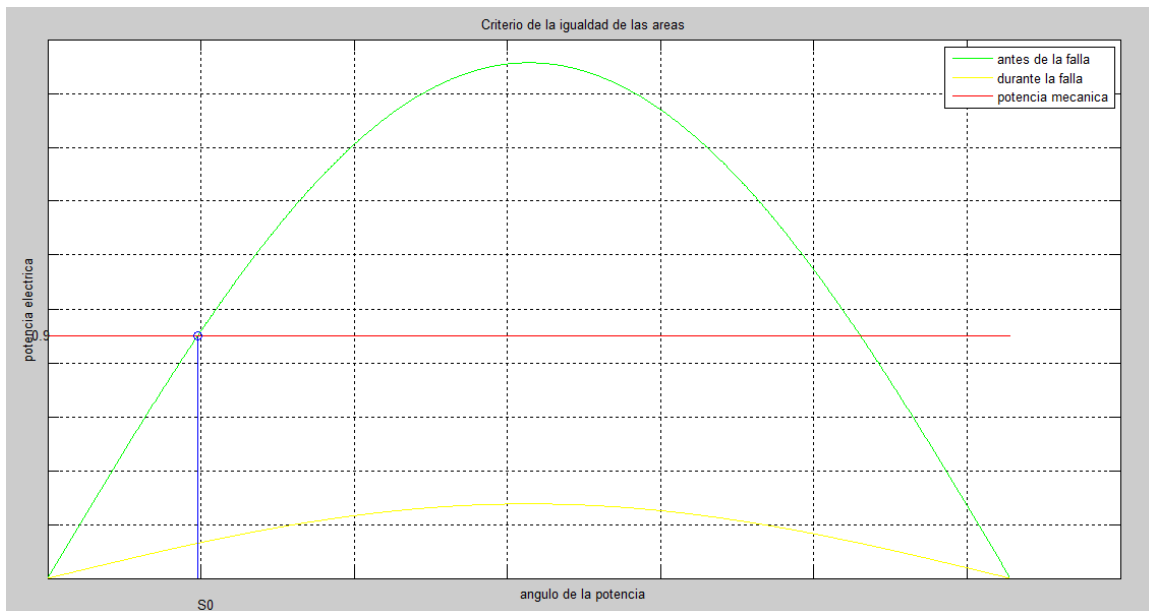


Figura 19. Curva de oscilación en falla

TERCERA PARTE

Análisis del sistema después de la falla. En esta parte se debe encontrar la relación de impedancias, entre la impedancia equivalente antes de la falla y después de la falla.

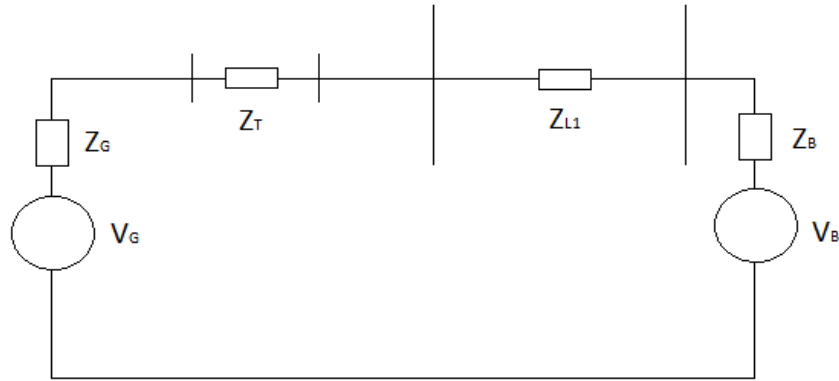


Figura 20. Circuito del sistema después de la falla

$$\begin{aligned} Z_3 &= Z_G + Z_T + Z_{L1} + Z_B \\ Z_3 &= j0,28 + j0,16 + j0,24 + j0,16 \\ Z_3 &= j0,84 \end{aligned}$$

Se calcula la relación pos falla- pre falla

$$r_2 = \frac{0,72}{0,84} = 0,8571$$

CUARTA PARTE

En esta parte se busca encontrar el ángulo crítico.

$$\begin{aligned} \delta_{\max} &= 180 - \sin^{-1} \left(\frac{0,9}{0,857 * 1,546} \right) \\ \delta_{\max} &= 137,21^\circ \\ \delta_c &= \cos \left(\frac{\left(\frac{0,9}{1,546} \right) (137,21^\circ - 35,61^\circ) \cos(137,21^\circ) - r_1 \cos(35,61^\circ)}{(0,857 - 0,164)} \right) \end{aligned}$$

El ángulo crítico del sistema es:

$$\delta_c = 67,07^\circ$$

El tiempo máximo de despeje será:

$$\begin{aligned} t_{\max} &= (\delta_c - \delta_0) = (67,07^\circ - 35,61^\circ) * \left(\frac{1}{60Hz} * \frac{1}{360^\circ} \right) \\ t_{\max} &= 1,46 \text{ ms} \end{aligned}$$

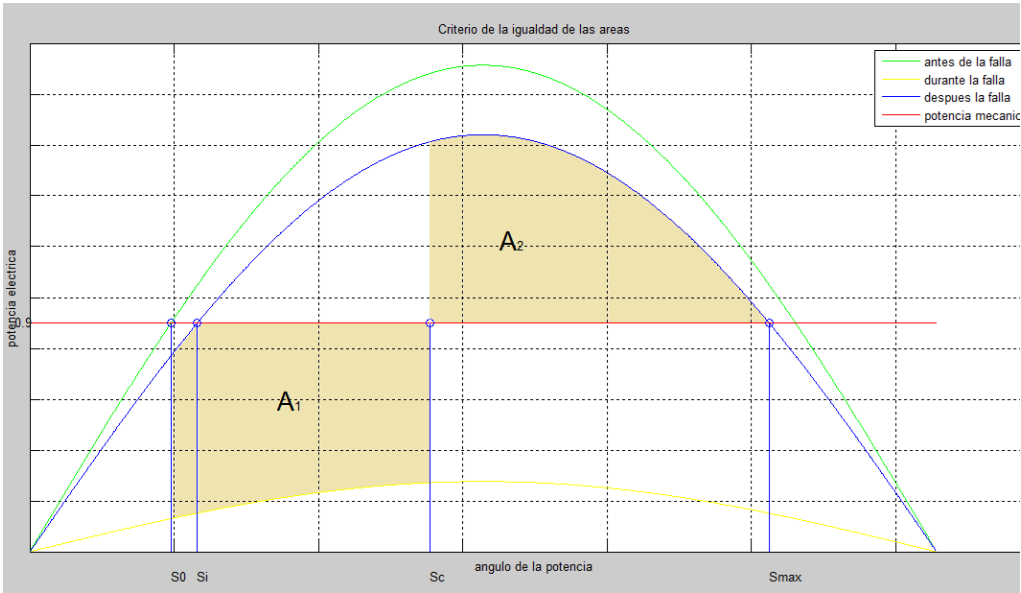


Figura 21. Curvas del criterio de áreas

CURVA DE OSCILACIÓN

Con los parámetros anteriores, además de los coeficientes del generador, se determina los valores de la curva de oscilación para los tres escenarios: una falla permanente, una asilada en $t=0,05$ y una aislada en $t=0,075$.

Para fallo permanente

Se observa en la figura 22 que está representada de color rojo y muestra el ángulo potencia del generador si no se aísla la falla. Para este caso se usa la formula $t=t_f$ (instante de la falla) para el instante 0 segundos. Para los valores mayores se usan las formulas del caso de $t_f < t < t_r$.

tiempo (segundos)	δ (ángulo de potencia en grados)
0	35,200
0,05	38,592
0,1	48,660
0,15	65,113
0,2	87,595
0,25	115,896
0,3	150,242
0,35	191,556
0,4	241,427
0,45	301,403
0,5	11,428 (1 ciclo)
0,55	89,100 (1 ciclo)
0,6	172,590 (1 ciclo)
0,65	263,884 (1 ciclo)
0,7	5,550 (2 ciclo)

Tabla 2. Datos de curva de oscilación para fallo permanente

Para fallo aislado en 0,05 segundos

Si se observa, la figura 22 está representada en color azul. Para este ciclo se usa la formula $t=t_f$ para el instante 0 y $t=t_r$ cuando $t=0.05s$.
 Para los valores mayores 0.05 se usan las fórmulas del casos de $t > t_r$.

tiempo (segundos)	δ (ángulo de potencia en grados)
0,00	35,20
0,05	38,59
0,05	38,59
0,05	38,59
0,10	45,65
0,15	52,29
0,20	57,59
0,25	60,92
0,30	61,94
0,35	60,53
0,40	56,84
0,45	51,27
0,50	44,49
0,55	37,46
0,60	31,28
0,65	27,01
0,70	25,42

Tabla 3. Datos de curva de oscilación para fallo aislado en 0,05 segundos.

Para fallo aislado en 0,075 segundos

Si se observa la curva en la figura 22, está representa de color verde, En este ciclo usa la fórmula $t=t_f$ para el instante 0 no se usa $t=t_r$ (debido a que no está en los intervalos). Para los valores mayores 0,05 se usan las fórmulas de $t > t_r$.

tiempo (segundos)	δ (ángulo de potencia en grados)
0,00	35,20
0,05	38,59
0,10	48,66
0,15	57,87
0,20	65,09
0,25	69,59
0,30	71,02
0,35	69,27
0,40	64,47
0,45	57,01
0,50	47,65
0,55	37,57
0,60	28,33
0,65	21,52
0,70	18,45

Tabla 4. Datos de curva de oscilación para fallo aislado en 0,075 segundos

Los resultados de los tres escenarios se pueden observar en la figura 22. En ella se puede observar que el sistema sólo es inestable en el caso de no aislar la falla, para los otros dos casos se estabiliza. La gráfica muestra el efecto de la falla, la cual inicia en el instante cero y como ésta causa el incremento del ángulo de potencia (el par eléctrico del generador y la referencia del barraje infinito).

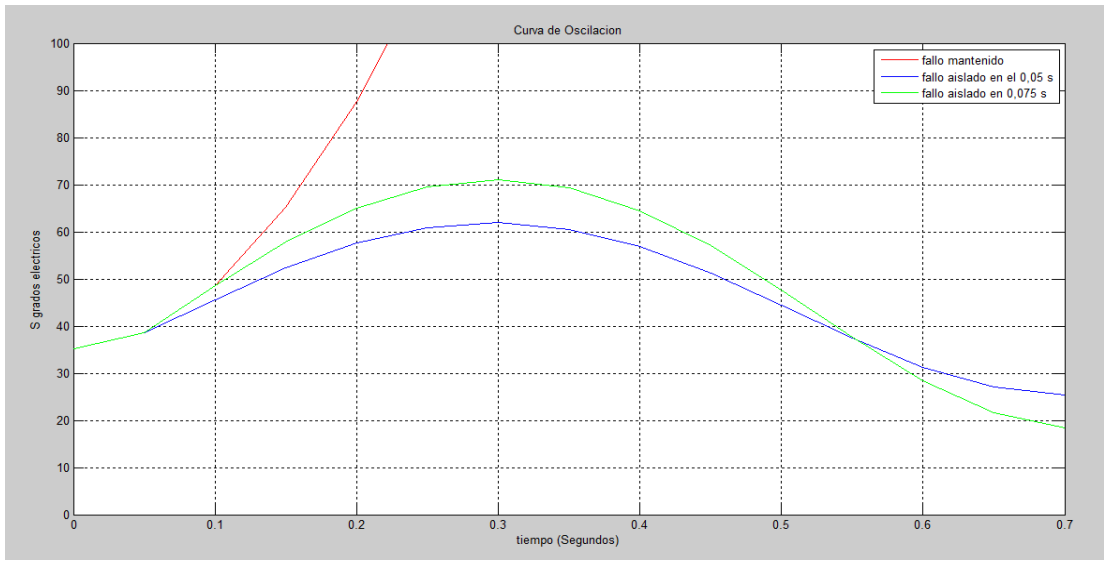


Figura 22. Escenarios de la curva de oscilación

VII.ANÁLISIS DE RESULTADOS

El valor de la relación de potencia en los escenarios de falla y pos-falla arrojó resultados muy dispersos; para el caso de la falla disminuye la potencia demasiado y para el caso de pos-falla se puede observar que es mayor el valor con relación al de falla.

El ángulo crítico arrojó un valor inferior a 90°, permitiendo que el sistema tenga la capacidad de suplir una demanda mayor de potencia. Además de ser un valor que no es inferior al ángulo inicial (δ_i) o superior al valor límite (δ_{max}), simboliza la estabilidad del sistema.

Cuando se determinaron las curvas de oscilación de los tres casos (fallo permanente, aislado en 0.05 y 0.075 segundos), el aislar la falla permitió al sistema estabilizarse y el no aislar la falla hace que éste no sea estable. Así mismo se observa que el aislamiento de la falla de mayor tiempo tiene una variación de ángulo mayor.

A pesar de que el comportamiento de la gráfica muestra que el sistema supera el ángulo crítico esto no simboliza que el sistema no sea estable. La inestabilidad se presentaría cuando supera el ángulo límite.

VIII.EJERCICIO

Una generadora conectada al sistema nacional, mediante una línea de transmisión de circuito doble, aguas abajo se conecta mediante transformador. Los valores están dados en por unidad de los elementos. Se presenta una falla en punto P, pero se desconoce el punto de falla. Encontrar el punto de falla mediante un código en Matlab que mejor se aproxime a la figura 23:

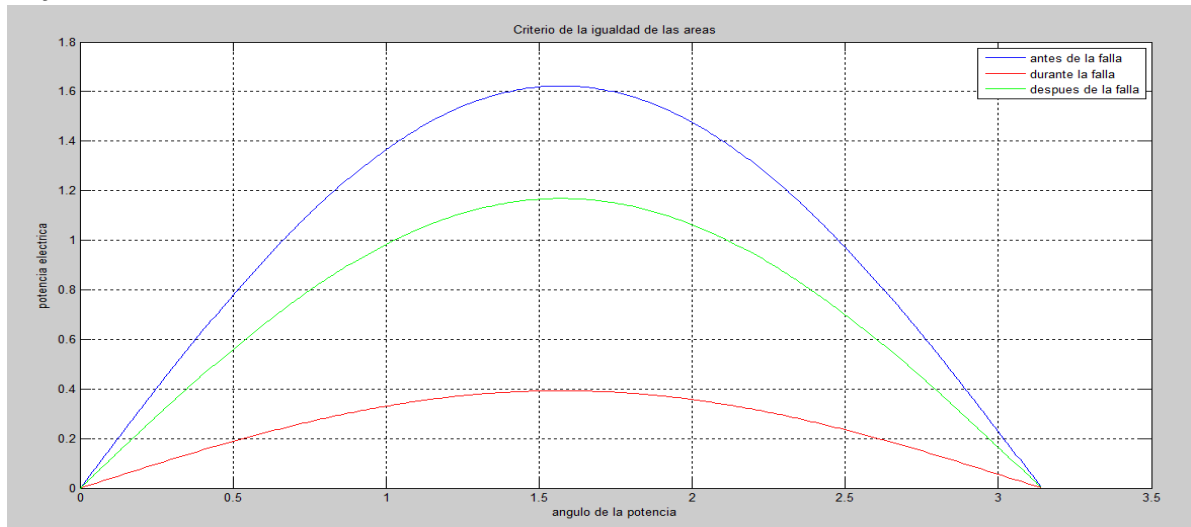


Figura 23. Curvas de oscilación ejercicio propuesto

Datos del sistema

Parámetros bases

$$S_B = 500 \text{ MVA} \quad V_B = 220 \text{ kV}$$

Valores del sistema en por unidad

$$P = 0,85 \quad Q = 0,2 \quad V_{LT} = 1 \angle 25^\circ \quad E_B = 1 \angle 0^\circ \quad X'_T = 0,15 \quad X_G = 0,25 \quad X_{L1} = X_{L2} = 0,24 \quad X_B = 0,14$$

Parámetros del generador

$$H = 3 \text{ MJ / MVA} \quad G = 1 \quad \text{MVA}$$

IX.REFERENCIAS

- Kundur, P. (1994). Power System Stability and Control. En P. Kundur, *Power System Stability and Control* (pág. 134). Toronto: McGraw-Hill.
- Martin, D. S. (s.f.). <http://ocw.uc3m.es/>. (D. I. Eléctrica, Ed.) Recuperado el 17 de mayo de 2016, de www.uc3m.es:https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/b/b6/Máquinas_sincronicas.pdf
- Montoya, A. A. (2013). Estabilidad. En A. A. Montoya, *Análisis de Sistemas de Potencia* (pág. 90). Pereira: Tecnológica de Pereira.
- Rodríguez, M. (1992). Estabilidad en los sistemas de potencia. En M. Rodríguez, *Análisis de Sistemas de Potencia* (pág. 545). Maracaibo: Universidad de Zulia.
- Stevenson, W. (1985). Análisis de sistemas eléctricos de potencia. En W. Stevenson, *Análisis de sistemas eléctricos de potencia* (pág. 103). Mexico: Mc Graw-Hill.
- Stevenson, W. (1985). Estabilidad de Sistema. En W. Stevenson, *Análisis de Sistemas Eléctricos de Potencia* (pág. 333). Mexico: McGraw-Hill.
- Weedy, M. (1982). Funcionamiento de un generador trabajando sobre unas barras de potencia infinita. En M. Weedy, *Sistemas Eléctricos de Gran Potencia* (pág. 49). Barcelona: Reverte.
- Weedy, M. (2012). System Stability. En M. Weedy, *Electric Power System* (pág. 281). Chichester: John Wiley & Sons Ltd.
- Wildi, T. (2007). Ventaja de los sistemas interconectados. En T. Wildi, *Máquinas eléctricas y sistemas de potencia* (pág. 670). Mexico: Pearson.

ANEXO B

GUIA II “ANÁLISIS MODAL PARA SISTEMA SMIB”

PALACIOS, GUILLERMO

Resumen— La presente guía de trabajo contiene los cálculos para analizar la estabilidad de un circuito que sufre una falla. Para ello hay que implementar las ecuaciones de velocidad angular del rotor, ángulo del rotor, sincronización del generador, corriente de excitación en el generador y compensador PSS, los cuales rigen al sistema de prueba, de esta manera obtener la matriz de estado del sistema, así como los parámetros de compensación.

Índice de Términos—estabilidad, falla, valores propios, estabilidad de pequeña señal.

I.OBJETIVO

Identificar los valores propios del sistema SMIB de prueba, para analizar la estabilidad. Realizar la compensación del ángulo del rotor, tensión y flujo inducido del generador; implementando los dispositivos AVR y PSS.

II.INTRODUCCION

Para el análisis de estabilidad de un sistema, hay que partir de conocer la estabilidad del mismo. Como se sabe los sistemas de potencia son dinámicos, debido a las ecuaciones diferenciales de las máquinas. Para poder conocer el estado del sistema existen los métodos lineales (Lyapunov, estabilidad de pequeña señal por valores propios) y no lineales (Lyapunov, método directo, usando funciones definidas en el espacio). El método aquí planteado es el de valores propios y vectores propios. Para ello se debe tener la matriz del funcionamiento del sistema. Esta matriz es el resultado de la linealización del sistema en su punto de operación por las ecuaciones diferenciales del sistema las cuales involucran variables como deslizamiento, frecuencia, sincronización, excitación del generador y PSS. Para poder entender cómo realizar esta compensación, primero hay que comprender como funciona las pequeñas perturbaciones y el efecto que éstas tiene sobre el sistema.

III.CONCEPTOS TEORICO Y METODOS ANALISIS DE VALORES PROPIOS

ESTABILIDAD DE PEQUEÑAS SEÑALES DE PERTURBACIÓN

La estabilidad de pequeña señal es la capacidad del sistema de mantener el sincronismo cuando se somete a pequeñas perturbaciones, las cuales se pueden diferenciar de una gran perturbación porque considera la dinámica de los generadores con la presencia de una variación en la carga. En este contexto, una perturbación se considera pequeña si las ecuaciones que describen la respuesta resultante del sistema pueden ser linealizadas con el propósito de análisis. Esto permite lograr una simplicidad a la hora de realizar los cálculos.

Otro de los inconvenientes es debido a la creciente demanda y la misma robustez de los sistemas de potencia. Estos análisis requieren de la implementación de modelos computacionales para simplificar los cálculos, así como la sintonización para la compensación sobre los generadores del sistema de potencia. Se requiere de un análisis de estabilidad del sistema de potencia y así determinar el comportamiento de éste.

El propósito es el de tener en cuenta los parámetros que ocasionan la inestabilidad del sistema, tales como las oscilaciones; son la causa de las variaciones en el ángulo del rotor, frecuencia y tensión. El análisis de oscilaciones determinará el tipo de atenuaciones o prevención que se debe realizar. Como estas ecuaciones son no lineales, se habla de sistema variante o dinámico.

ESTABILIDAD DINÁMICA

Los sistemas de potencia son sistemas dinámicos en el tiempo, es por ello que se habla de una estabilidad dinámica, la cual es susceptible a diversas variaciones. Debido a sus características pueden ser alterados en sus condiciones normales de operación. El obtener los niveles

Los sistemas de potencia son variantes en el tiempo, donde los parámetros de entrada del ángulo, velocidad y voltaje conforman ecuaciones diferenciales que rigen el comportamiento dinámico del sistema. Para los casos de variaciones leves o variaciones despreciables se puede decir que estos sistemas pueden ser linealizadas con el propósito de simplicidad. Se habla de un análisis del sistema invariante en el tiempo.

Cuando se habla de linealización, se dice que es un análisis local dinámico que muestra el comportamiento transitorio del sistema en una vecindad. Esto ayudando a omitir las ecuaciones diferenciales que rigen al sistema.

Espacio de estados

Los sistemas de potencia tienen comportamientos dinámicos, los cuales son expresados por ecuaciones diferenciales no lineales ordinarias de primer grado:

$$\dot{x}_i = f_i(x_1, x_2, \dots, x_n; u_1, u_2, \dots, u_r; t) \quad i = 1, 2, \dots, n$$

Ecuación 1.

Estas ecuaciones que rigen al sistema contienen un (**n**) orden, lo que a su vez se puede traducir a las mismas las ecuaciones diferenciales expresadas por las variables (x), igualmente de variables de entrada (u) también tiene (r) número de entradas.

Estas variables pueden ser representadas de forma vectoriales:

$$x = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_n \end{bmatrix} \quad u = \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ \vdots \\ u_r \end{bmatrix} \quad f = \begin{bmatrix} f_1 \\ f_2 \\ \vdots \\ f_n \end{bmatrix}$$

Ecuación 2.

Para el caso de las salidas se expresan mediante otras ecuaciones independientes a las anteriores. Estas son expresiones no lineales por lo tanto son estáticas en el tiempo:

$$y = g(x, u)$$

$$y = \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \vdots \\ y_n \end{bmatrix} \quad g = \begin{bmatrix} g_1 \\ g_2 \\ \vdots \\ g_n \end{bmatrix}$$

Ecuación 3.

Las ecuaciones diferenciales no lineales son de bastante complejas de resolver y existen pocos métodos para resolverlos de forma exacta. Estas ecuaciones pueden ser aproximadas a lineales en los casos de ecuaciones oscilatorias armónicas para pequeñas amplitudes de oscilación

Ecuaciones diferenciales lineales

La ecuación 1 puede ser expresada como una ecuación diferencial lineal, debido a que los SEP son oscilatorios y para el caso donde estos tengan una variación o perturbación pequeña ($\Delta \dot{x}_i$) puede ser linealizada, partiendo del punto de equilibrio de la ecuación ($\dot{x}_{i0}$).

$$\dot{x}_i = f_i[(x_0 + \Delta x), (u_0 + \Delta u)] = \dot{x}_{i0} + \Delta \dot{x}_i$$

Ecuación 4.

Las ecuaciones diferenciales son expresadas en los puntos de equilibrios (X_0, U_0), donde se representa con una pequeña desviación (Δ).

La ecuación 4 puede ser expresada mediante la serie de Taylor (ecuación 5). Esta permite representar una función mediante una serie de potencias o términos de la serie.

$$\sum_{n=0}^{\infty} \frac{f^n(a)}{n!} (x-a)^n$$

Ecuación 5.

La serie de Taylor permite descomponer las ecuaciones diferenciales de primer orden del sistema, para su aproximación al sistema no lineal; y así lograr que una señal que sufre una perturbación, se separe en la perturbación y su función fundamental (condición de equilibrio).

El punto de equilibrio no debe ser alterado y la variación se puede expandir mediante series de Taylor:

$$\dot{x}_{i0} = f_i(x_0, u_0) \quad \Delta \dot{x}_i = \left(\frac{\partial f_i}{\partial x_1} \Delta x_1 + \dots + \frac{\partial f_i}{\partial x_n} \Delta x_n \right) + \left(\frac{\partial f_i}{\partial u_1} \Delta u_1 + \dots + \frac{\partial f_i}{\partial u_n} \Delta u_n \right)$$

Ecuación 6.

Estas expansiones se aplican para todas las ecuaciones del sistema, donde varían con respecto a i haciendo de estar una forma matricial. Para el caso de las entradas aplican de la misma forma mediante la expansión en series de Taylor

$$\Delta y_j = \left(\frac{\partial g_j}{\partial x_1} \Delta x_1 + \dots + \frac{\partial g_j}{\partial x_n} \Delta x_n \right) + \left(\frac{\partial g_j}{\partial u_1} \Delta u_1 + \dots + \frac{\partial g_j}{\partial u_n} \Delta u_n \right)$$

Ecuación 7.

De forma matricial, las ecuaciones de entrada y salida estarían expresadas de la siguiente manera

$$\begin{aligned} \Delta \dot{x} &= A \Delta x + B \Delta u \\ \Delta y &= C \Delta x + D \Delta u \end{aligned}$$

Ecuación 8.

Donde la matriz A es la matriz física del sistema, B la de control de la entrada, C es la matriz de salida y D es la proporción entre la salida y la entrada.

Una ecuación es lineal cumplen los principios de superposición:

- Aditividad $y(u + x) = y(x) + y(u)$
- Homogeneidad $y(kx) = ky(x)$

Como se mencionaba anteriormente, se tienen dos tipos de ecuaciones diferenciales, las lineales y no lineales. Para la solución de estas se deben implementar métodos totalmente diferentes. Las no lineales pueden ser solucionadas por el método de Lyapunov, para el caso de las lineales se puede utilizar el método de coeficientes constante aquí planteado.

Ecuaciones diferenciales lineales con coeficientes constantes

El método de coeficiente constante simplifica las ecuaciones diferenciales. En casos donde se tiene sistemas matriciales, se emplea los valores propios para la reducción de las ecuaciones de primer orden, estas ecuaciones pueden ser expresadas de la siguiente forma:

$$\Delta x_i(t) = x_1(t) + \dots + x_n(t)$$

$$\Delta x_i(t) = \phi_{i1} c_1 e^{\lambda_1 t} + \dots + \phi_{in} c_n e^{\lambda_n t}$$

Ecuación 9.

En las raíces del polinomio característico (valores propios) puede presentarse casos en los que resulten raíces reales y complejas conjugadas:

- **Reales:** Estas respuestas corresponden a funciones no oscilatorias. Un valor negativo de valor propio representa la disminución en la perturbación, decreciendo en el tiempo. Una respuesta de valores propios positivos implica una función no periódica inestable.

$$y_n(x) = \phi_n e^{\lambda_n t}$$

Ecuación 10.

- **Complejas conjugadas:** En el caso de presentarse una respuesta compleja conjugada en los valores propios, la cual estará representado por una parte real y parte imaginaria. La constante (C) está asociada a un vector propio por lo que tendrá también un valor complejo:

$$y_n(x) = [a \pm ib] e^{(\sigma \pm i\omega)t}$$

Ecuación 11.

Estos valores propios ocurren en pares conjugados por lo cual se pueden simplificar estos:

$$e^{(\sigma - j\omega)t} [a + ib] + e^{(\sigma + j\omega)t} [a - ib]$$

$$e^{\sigma t} \sin(\omega t + \theta)$$

Ecuación 12.

Con estos valores se puede determinar el comportamiento del estado del sistema, además de comprender si el sistema es estable. La parte real (σ) representa la amortiguación donde si este valor es positivo será una oscilación incrementando la amplitud y un valor negativo de amortiguación de la oscilación, la parte imaginaria (ω) representa la frecuencia de oscilación.

Polinomio característico y valores propios

La estabilidad de pequeñas perturbaciones puede asumirse como un sistema lineal, a partir de un punto de operación de equilibrio dinámico. A través de la matriz de funcionamiento del sistema se pueden encontrar unos valores propios del mismo para conocer su estabilidad.

Para comprender la estabilidad del sistema hay que determinar los valores propios del sistema, partiendo de la ecuación 6:

$$X = \begin{bmatrix} x_1 \\ \vdots \\ x_n \end{bmatrix} \quad \dot{X} = \begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \vdots \\ \dot{x}_n \end{bmatrix}$$

Ecuación 13.

La variación que existe que se puede presentar en sistema esta relaciona con la matriz A:

$$\dot{X} = AX$$

Ecuación 14.

Se puede expresar la entrada de una ecuación diferencial lineal con coeficiente constante así como su derivada, donde ϕ es la constante de integración del polinomio característico o simplemente como el punto inicial de la señal:

$$X = \phi e^{\lambda t}$$

Ecuación 15.

Donde la derivada de esta función está dada por

$$\dot{X} = \lambda e^{\lambda t} \phi$$

Ecuación 16.

La relación que existe entre estas ecuaciones es:

$$\lambda e^{\lambda t} \phi = A e^{\lambda t} \phi$$

$$\phi(A - \lambda I) = 0$$

Ecuación 17.

A es una matriz física del sistema, la matriz identidad (I) y un vector propio (ϕ), los cuales permiten determinar los valores propios del mismo (λ), mediante el determinante de la ecuación:

$$\det(A - \lambda I) = 0$$

Ecuación 18.

Esto permite encontrar los valores propios los cuales tendrán una cantidad correspondiente al orden del sistema.

Dependiendo de estos valores se puede conocer la estabilidad del sistema. Estos valores son números complejos, donde básicamente lo que garantiza que el sistema sea estable es una parte real; y la parte imaginaria no tiene implicación sobre el sistema. En la figura 24 se observa los casos de valores propios que se pueden encontrar

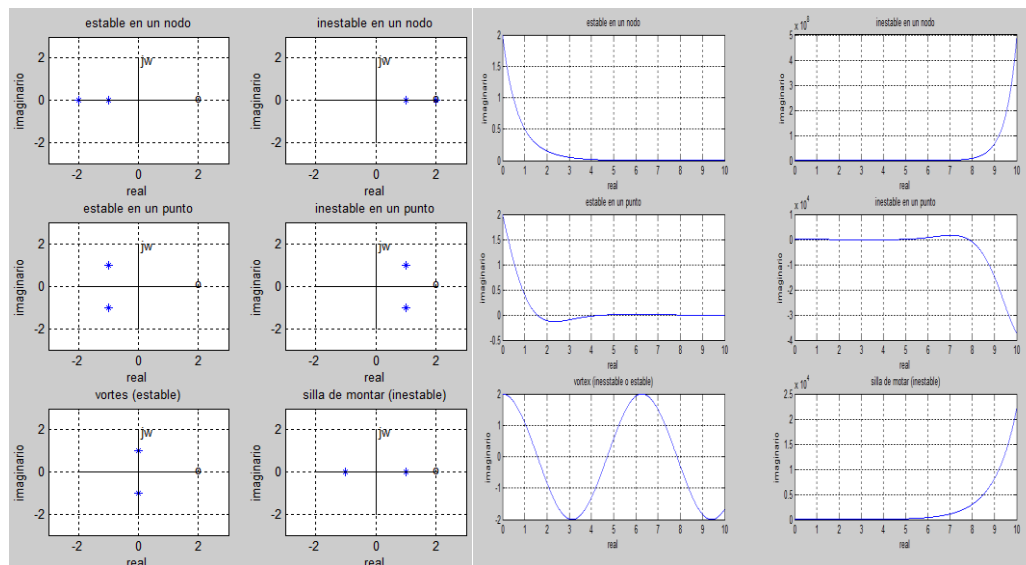


Figura 24. Análisis de estabilidad por valores propios. La gráfica de la izquierda corresponde a valores propios y la derecha su dominio en el tiempo

Vectores propios

A partir de la matriz de los valores propios se puede analizar de una forma más particular el comportamiento de cada una de las variables del sistema, así como obtener la ecuación que rige a las variables del sistema, y observar el comportamiento de éste en el tiempo.

Este vector está asociado a los valores propios del sistema de la matriz A, por lo cual se tiene un vector de n columnas. Estos arreglos vectoriales asociados a los valores propios pueden ser expresados como una multiplicación vectorial que se efectúa ya sea a la izquierda o derecha de la matriz del sistema, la cual es igual a la multiplicación del vector por los valores propios. Para el caso del vector de la derecha:

$$A\phi_i = \lambda_i \phi_i \quad i=1,2,\dots,n$$

Ecuación 19.

Por lo que su forma vectorial

$$\phi = \begin{bmatrix} \phi_{1i} \\ \phi_{2i} \\ \vdots \\ \phi_{ni} \end{bmatrix}$$

Ecuación 20.

Para el caso del vector de la izquierda su expresión es similar al de la derecha, como se mencionó sólo se cambia el orden de la multiplicación:

$$\psi_i A = \lambda_i \psi_i \quad i=1,2,\dots,n$$

Ecuación 21.

La forma vectorial

$$\psi = \begin{bmatrix} \psi_{1i} \\ \psi_{2i} \\ \vdots \\ \psi_{ni} \end{bmatrix}$$

Ecuación 22.

Expresa la relación entre estas dos matrices de acuerdo a las propiedades de estos de que son ortogonales entre sí, por lo cual al multiplicar estos se obtendrá una matriz identidad.

$$\psi \phi = I \quad \psi = \phi^{-1}$$

Ecuación 23.

El problema de los vectores propios no permite conocer la información necesaria de forma individual. El vector de la izquierda (ψ) suministra la información de la relación y el vector derecho (ϕ) las formas o modos del estado. Estas matrices cumplen la función determinar la matriz de participación de los valores propios, para realizar un análisis más exacto la incidencia que tiene cada uno de los valores en la estabilidad del sistemas. Además, permite entender cuáles valores puede permitir la estabilidad del sistema.

$$P_i = \begin{bmatrix} P_{1i} \\ P_{2i} \\ \vdots \\ P_{ni} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \phi_{1i} \psi_{i1} \\ \phi_{2i} \psi_{i2} \\ \vdots \\ \phi_{ni} \psi_{in} \end{bmatrix}$$

Ecuación 24.

Soluciones Fundamentales

Los elementos de valores y vectores propios se obtienen a partir de la matriz A (estado del sistema), estas se pueden expresar como combinaciones lineales, a partir de estos elementos propios se puede conseguir la función de la variación de la entrada (Δx_i). Para ello se debe obtener las constantes asociadas a los valores propios (C_i), la forma de calcularla

$$\begin{bmatrix} C_1 \\ \vdots \\ C_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \psi_{11} & \cdots & \psi_{1i} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \psi_{i1} & \cdots & \psi_{ii} \end{bmatrix} [\Delta x_i(0)]$$

Ecuación 25.

Se debe conocer las condiciones iniciales del sistema, para conocer la respuesta del sistema

$$\left[\Delta x_j(t) \right] = \sum_{n=1}^i \left[\psi_{j1} \quad \cdots \quad \psi_{jn} \right] \begin{bmatrix} c_1 \\ \vdots \\ c_n \end{bmatrix} e^{\lambda_n t}$$

Ecuación 26.

En esta forma se puede obtener la respuesta para cada una de las variables que se estén teniendo en cuenta en la matriz A o en la estabilidad del sistema.

REPRESENTACION DEL MODELO CLASICO

Para analizar la estabilidad hay que poder plantear las ecuaciones del sistema de la matriz A. Para ello primero se deben obtener los parámetros del SEP:

Las ecuaciones que se necesitan analizar para la estabilidad del sistema son la de variación de frecuencia y ángulo de potencia en el generador:

$$P = T_e = \frac{E'E_B}{X_T} \sin(\delta)$$

$$\Delta T_e = \frac{E'E_B}{X_T} \cos(\delta_0) * (\Delta \delta) = \frac{\partial T_e}{\partial \delta} \Delta \delta$$

$$K_s = K_1 = \frac{E'E_B}{X_T} \cos(\delta_0)$$

Ecuación 27.

Ecuación de variación de ángulo de potencia

Partiendo de la ecuación de movimiento del generador y teniendo en cuenta la ecuación de amortiguación del sistema:

$$\frac{d}{dt} \Delta w_r = \frac{1}{2H} (T_m - T_e - K_D \Delta w_r)$$

$$\frac{d}{dt} \delta = w_0 \Delta w_r + 0 \Delta \delta + 0 \Delta T_m$$

Ecuación 28.

Ecuación de variación de frecuencia

Linealización de la ecuación

$$\frac{d}{dt} \Delta w_r = \frac{1}{2H} [\Delta T_m - K_s \Delta \delta - K_D \Delta w_r]$$

Ecuación 29.

Espacio de estado del sistema:

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \Delta w_r \\ \Delta \delta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{K_D}{2H} & -\frac{K_s}{2H} \\ w_0 & 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{2H} \\ 0 \end{bmatrix} \Delta T_m \Rightarrow A = \begin{bmatrix} \frac{K_D}{2H} & -\frac{K_s}{2H} \\ w_0 & 0 \end{bmatrix}$$

Ecuación 30.

Primero hay que tener los parámetros del sistema, la tensión de la carga o barraje (E_B) y fuente (E'), además de la impedancia del equivalente del sistema (X_T).

Para calcular la impedancia equivalente del sistema, se debe sumar la impedancia del sistema (X_E) con la impedancia del generador (X'_d):

$$X_T = X'_d + X_E$$

Ecuación 31.

La tensión del barraje es la tensión base del sistema por simplicidad, para calcular la tensión del generador

$$I_t = \frac{E' \angle 0^\circ - E_B \angle -\delta}{jX_T} = \frac{E' - E_B (\cos(\delta) - j \sin(\delta))}{jX_T}$$

$$E' = E_t + jX'_d I_t = E_t + jX'_d \left(\frac{E' \angle 0^\circ - E_B \angle -\delta}{jX_T} \right)$$

Ecuación 32.

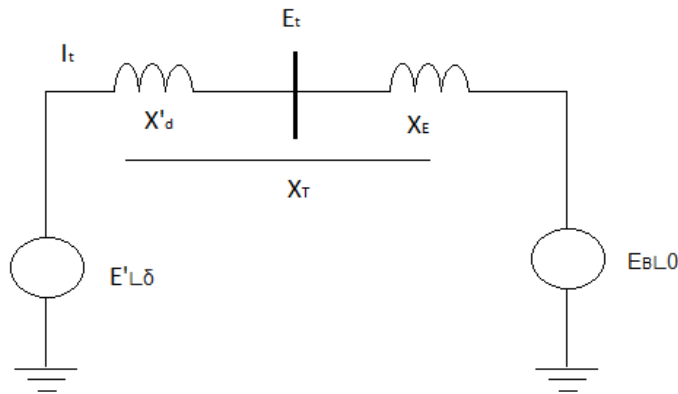


Figura 25. Modelo clásico de SEP

También se puede calcular el factor de amortiguación (ζ), el cual permite conocer el valor de la atenuación y la frecuencia natural de oscilación (w_n) permite conocer el valor donde se obtiene su salida máxima, con las siguientes expresiones:

$$\zeta = \frac{1}{2} \frac{K_D}{2Hw_n} = \frac{1}{2} \frac{K_D}{\sqrt{2HK_S w_0}} \quad w_n = \sqrt{K_S \frac{w}{2H}}$$

Ecuación 33.

Estos coeficientes de amortiguación y frecuencia están asociados al modelo clásico del generador donde se tiene en cuenta los parámetros de velocidad del rotor y ángulo de potencia. Estos coeficientes cambian dependiendo de los parámetros que se desea analizar, en la correspondiente oscilación.

ECUACIONES DE MÁQUINA SÍNCRONA

Las máquinas síncronas son sensibles a las variaciones que se presentan, como se ha estado hablando. El sistema es variante en el tiempo, es por ello que los parámetros de la máquina deben depender de la dinámica del comportamiento del sistema, entonces se debe replantear las ecuaciones dependiendo de la sincronización del sistema.

VOLTAJE DE INDUCIDO

También llamado como fuerza electromotriz, es la diferencia de potencial entre dos puntos de un circuito abierto. La ley de Faraday, para la tensión inducida, en un circuito encerrado, la tensión inducida es producida por el campo magnético que traspasa un elemento ferromagnético en determinado tiempo está dado por la ecuación 34:

$$e_i = \frac{d\psi}{dt}$$

Ecuación 34.

En el caso de circuito eléctrico hay que tener en cuenta la caída de tensión debido a la parte resistiva del material, como se puede observar en la figura 26:

$$e_i = \frac{d\psi}{dt} + ri$$

Ecuación 35.

Para comprender mejor el funcionamiento, el embobinado produce un flujo inducido (ψ) y produce una tensión inducida (e_i) haciendo aparecer una tensión en las terminales (e_1) diferente la presente en la resistencia (r) del circuito:

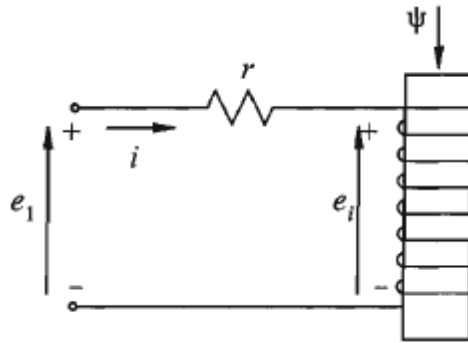


Figura 26. Ley de Faraday

La inductancia se puede expresar en relación al flujo con la corriente del sistema:

$$\psi = Li$$

Ecuación 36.

También se puede expresar el valor de la inductancia como el número de vueltas multiplicada por flujo, sobre la corriente o

$$L = N \frac{\phi}{I}$$

$$= N^2 P$$

Ecuación 37.

De la anterior ecuación se puede despejar el flujo

$$\phi = \text{flujo} = (MMF)P = NiP$$

Ecuación 38.

Circuito acoplado

En el caso de que se tengan dos circuitos acoplados magnéticamente, como se muestra en la figura 27, se presenta una inductancia mutua para cada circuito donde están entrelazados con los enlaces de flujo, como se puede observar en las siguientes ecuaciones:

$$\psi_1 = N_1(\phi_{m1} + \phi_{11}) + N_1\phi_{m2}$$

$$\psi_2 = N_2(\phi_{m2} + \phi_{12}) + N_2\phi_{m1}$$

Ecuación 39.

Ademas, en el caso de la tension de induccion, se puede calcular de forma independiente del flujo, de una forma similiar a la eucacion 35:

$$e_1 = \frac{d\psi_1}{dt} + r_1 i_1$$

$$e_2 = \frac{d\psi_2}{dt} + r_2 i_2$$

Ecuación 40.

La figura 27 ilustra el acople magnético entre dos circuitos. La relación que se presenta es debido al campo magéntico compartido entre ambos en relación con el núcleo del transformador. Vinculando los dos flujos del devanado del circuitos (ψ_1, ψ_2)

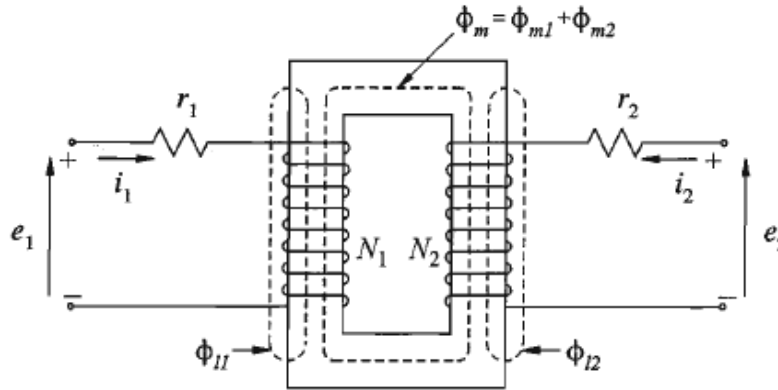


Figura 27. Circuito de acople magnético

Para conocer la indutancia del devanado para cada uno de circuito, este se puede calcular de la siguiente forma:

$$L_{11} = N_1(\phi_{m1} + \phi_{11}) / i_1 \quad L_{11} = L_{m1} + L_{11}$$

$$L_{22} = N_2(\phi_{m2} + \phi_{12}) / i_2 \quad L_{22} = L_{m2} + L_{12}$$

Ecuación 41.

MÁQUINA SÍNCRONICA CON ROTOR DE POLOS SALIENTES

Estos generadores o máquinas son utilizados para velocidades en el rotor inferiores a los 1200 rpm, esto debido a la presencia de grandes masas entre los polos causando fuerzas centrífugas excesivas. Estas máquinas son implementadas para los generadores hidráulicos. Cuando pasa una corriente de excitación por el devanado concentrado en el polo, produciendo una fuerza magnetomotriz con una densidad de flujo de forma sinusoidal y armónica, la cual se puede observar como una media, como muestra en la figura 28.

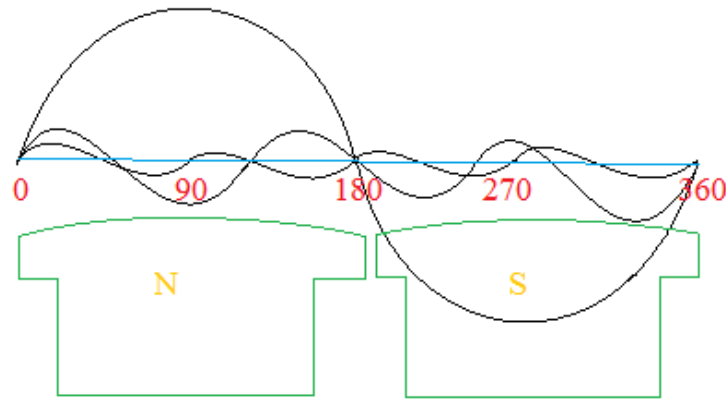


Figura 28. Densidad de flujo en los polos

Este tipo de máquinas son mas complejas que las máquinas cilíndricas o lisas, donde se presentan ejes de directos y de cuadratura como se puede observar en la figura 29, las reluctancias son diferentes la de eje directo y cuadratura debido al diseño del rotor, donde estas eran la misma. Para realizar el cambio de referencia se implementa la transformada de Park.

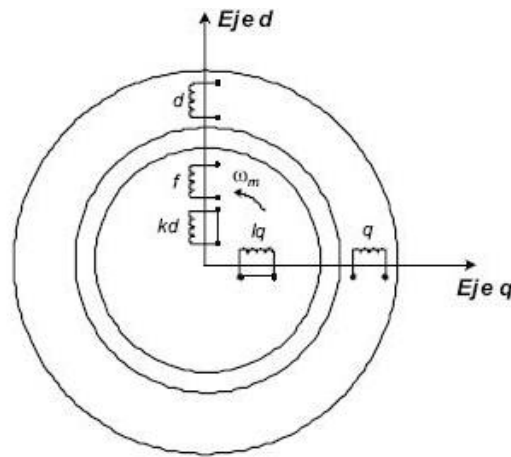


Figura 29. Ejes cuadratura y directo en la máquina.

Transformada de Park

Este metodo permite cambiar el sistema de referencia trifásico a un sistema ortonormal giratorio con un desfase con respecto al eje de referencia. Como se puede observar en la figura 30, el sistema trifásico V_A, V_B, V_C tiene su equivalente en cuadratura como X_d, X_q . Permite calcular la corriente, torque y potencia de las máquinas síncronas de polos salientes de forma general, esto en regimen estacionario y transitorio.

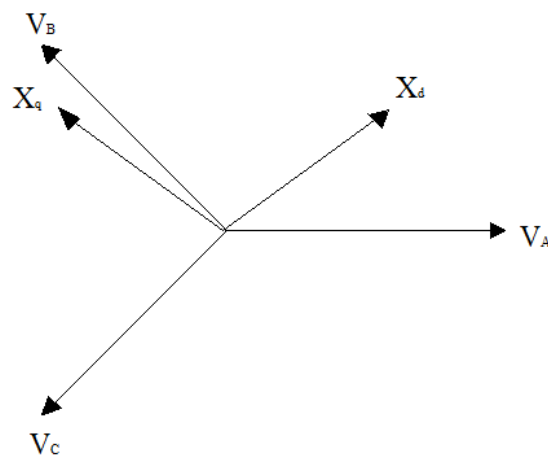


Figura 30. Diagrama fasorial de ejes.

La constante matricial que permite esta transformacion de un sistema de cordenadas a otras es P

$$\begin{bmatrix} V_A \\ V_B \\ V_C \end{bmatrix} = P(\theta) \begin{bmatrix} X_0 \\ X_d \\ X_q \end{bmatrix} \Rightarrow \begin{bmatrix} V_A \\ V_B \\ V_C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} & \cos(\theta) & -\sin(\theta) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_0 \\ X_d \\ X_q \end{bmatrix}$$

Ecuación 42.

Esto lo que hace es descomponer cada una de las fase del sistema en otro de coordenadas giratorias que permite trabajar el sistema de una forma cómoda. Esto tambien aplica para realizar la conversion de sistema giratorio a trifásico. Para ello sólo se debe calcular la matriz inversa de P multiplicada por la matriz de coordenadas giratoria.

Básicamente se estudia un sistema de potencia balanceado, por lo cual no necesita realizar un análisis por fase del sistema. Se utiliza fallas trifasicas en el SEP. Ademas se utiliza un generador de polos salientes partiendo de valores de cuadratura sin necesidad de analizar las fases del sistema.

MODELO DE MÁQUINA SÍNCRONA DE POLOS SALIENTE

Para este estudio de estabilidad lo que básicamente interesa es la tensión (magnitud y ángulo) en el generador que suministra una carga (V), también las caídas de tensión que se presenta (IR) y la respectiva caída de tensión que se produce por la reluctancia de la máquina ($jX_q I_q + jX_d I_d$) donde la corriente se puede descomponer en coordenadas similares a la reluctancia; y la corriente de armadura de eje directo (I_d) y cuadratura (I_q).

$$E = V + RI + jX_d I_d + jX_q I_q$$

Ecuación 43.

De la ecuación 43 se puede encontrar la tensión en el generador obteniendo el ángulo de potencia (δ_0), pero lo que interesa conocer, además de la tensión, es la potencia que está entregando el generador a la carga, en relación a las tensiones y las impedancias del sistemas, las cuales se necesita para entender mejor esta relación mediante el diagrama fasorial, como se puede observar en la figura 31.

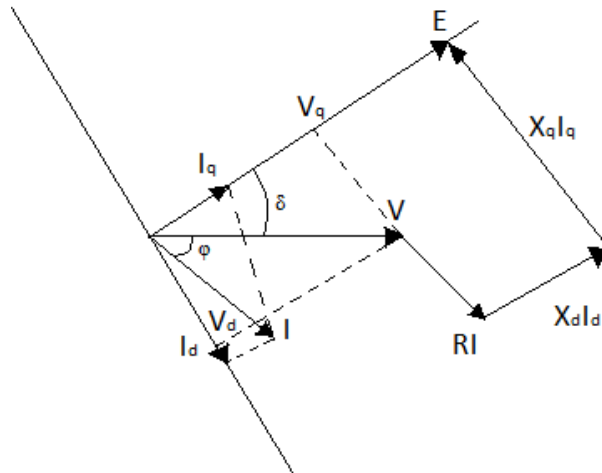


Figura 31. Diagrama fasorial de la máquina de polos saliente

Lo que se debe es expresar la potencia en relación a las tensiones y reactancias del sistema, partiendo de las leyes Kirchhoff de tensión para los dos ejes de cuadratura y eje directo, como se puede observar en la ecuación 44. En la ecuación anterior se expresa la tensión y la corriente en formas sinusoidal, además se despeja la magnitud de tensión del generador en relación de tensión y corriente de eje cuadratura, eje directo y caída de tensión. Como se puede observar en el diagrama fasorial de la figura 31

$$P = |V_d| |I_d| + |V_q| |I_q|$$

$$|V_d| = |V| \sin(\delta) \quad |V_q| = |V| \cos(\delta) \quad |I_d| = \frac{|E| - |V| \cos(\delta)}{X_d} \quad |I_q| = \frac{|V| \sin(\delta)}{X_q}$$

$$P = |V| \sin(\delta) \frac{|E| - |V| \cos(\delta)}{X_d} + |V| \cos(\delta) \frac{|V| \sin(\delta)}{X_q}$$

$$P = \frac{|E||V|}{X_d} \sin(\delta) + |V|^2 \cos(\delta) \sin(\delta) \left(\frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d} \right)$$

$$P = \frac{|E||V|}{X_d} \sin(\delta) + \frac{|V|^2 (X_d - X_q)}{2 X_d X_q} \sin(2\delta)$$

Ecuación 44.

Para observar el comportamiento o la incidencia de que tiene cada uno de los ejes sobre la potencia del generador, de una forma más clara se puede observar en la figura 32, donde el eje directo transmite la mayor cantidad de potencia al sistema y el eje de cuadratura produce una variación de la forma de onda, pero también inyecta potencia al sistema causando amplificación de la señal de potencia.

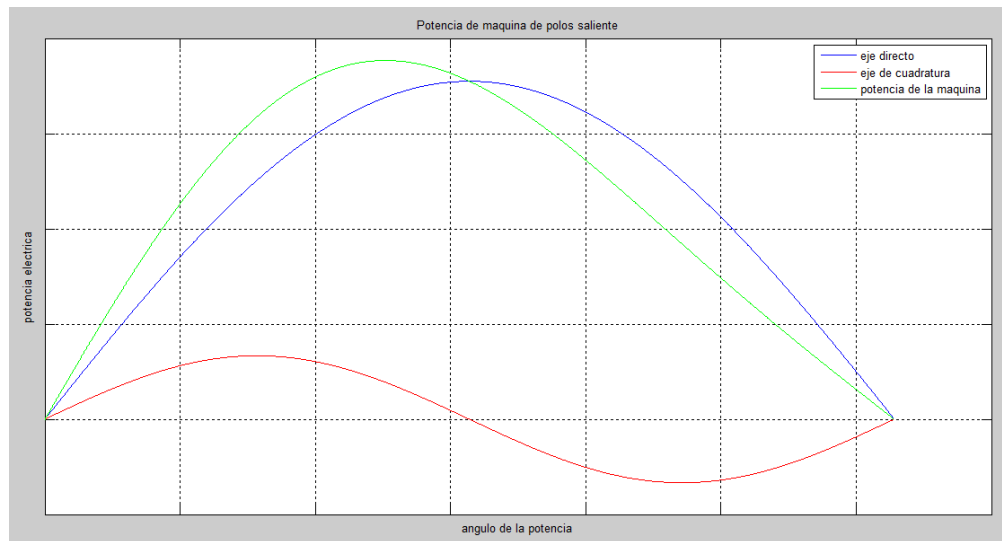


Figura 32. Diagrama de ángulo de potencia máquina de polos salientes

Régimen transitorio

Para esta parte se analiza la máquina en régimen transitorio en estado estable, donde se presenta variaciones en la corriente de armadura y fuerza magnemotriz debido al diseño de la máquina, alterando la reactancia de eje directo X_d . Causando un nuevo valor de reactancia (reactancia transitoria X'_d). Para el caso de cuadratura X_q este es menor al directo y manteniéndose constante. También se presenta un cambio en la tensión en el generador conservando su posición angular.

Las ecuaciones de tensión y potencia en análisis transitorio y en régimen permanente son similares. La única variación es en la reactancia de eje directo:

$$E' = V + jX'_d I_d + jX_q I_q$$

$$P = \frac{|E'| |V|}{X'_d} \text{sen}(\delta_1) + \frac{|V|^2 (X'_d - X_q)}{2 X'_d X_q} \text{sen}(2\delta_1)$$

Ecuación 45.

Una de las característica que hay que tener en cuenta la reactancias transitorias son menor que la transitoria $X_d > X'_d$, además que esta reactancia muchas veces es menor que la cuadratura. Por lo que haría que el segundo término de la ecuación 45 de potencia fuera negativo, causando que la potencia disminuya con relación a la de régimen permanente. Para este tipo de análisis se desprecia la resistencia del sistema. Una de las formas para simplificar los cálculos es hallando la tensión ficticia (E'_i)

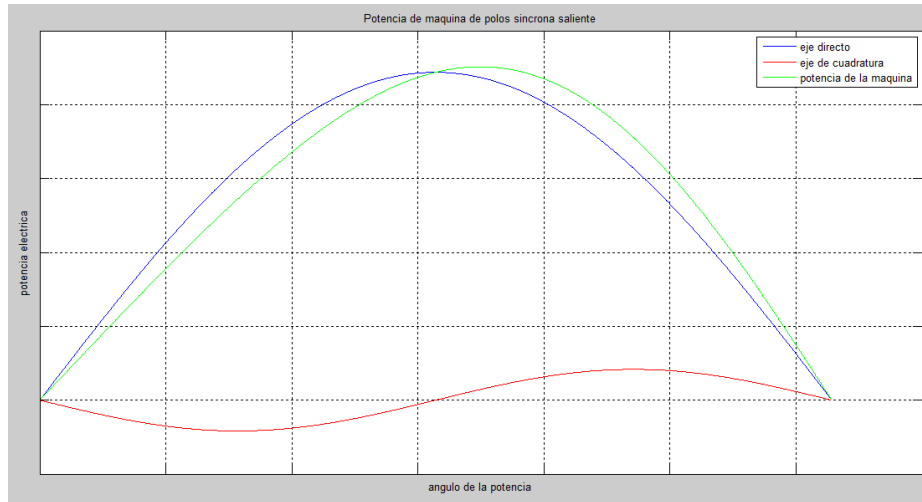


Figura 33. Diagrama de ángulo de potencia máquina síncrona de polos salientes

Esta gráfica muestra la potencia en régimen transitorio, la cual en comparación con el régimen permanente, se presenta un corrimiento del pico de potencia eléctrica con respecto a su ángulo.

MÁQUINA DE POLOS SALIENTES DE FORMA FASORIAL

Las máquinas síncronas de polos salientes están compuestas por sistemas trifásicos (a, b, c), donde cada una de las fases puede ser expresada de forma de ejes (directo [d] y cuadratura [q]), como se puede observar en la figura 34. El como el flujo inducido ($\psi_{(a, b, c)}$) produce tensión inducida ($e_{(a, b, c)}$) en cada una de las fases, provocando también la corriente ($i_{(a, b, c)}$) por cada una de las fases. Podemos expresar el sistema a ejes cuadratura, mediante la transformada de Park. Teniendo la tensión de amortiguación del devanado (e_{fd}) y las corrientes de cuadratura ($i_{kq, kd}$). Los ejes tienen un desfase de ángulo (θ) con respecto a la fase **a**, causado por la inductancia interna del devanado. El sistema está girando a una velocidad angular del sistema (ω_r).

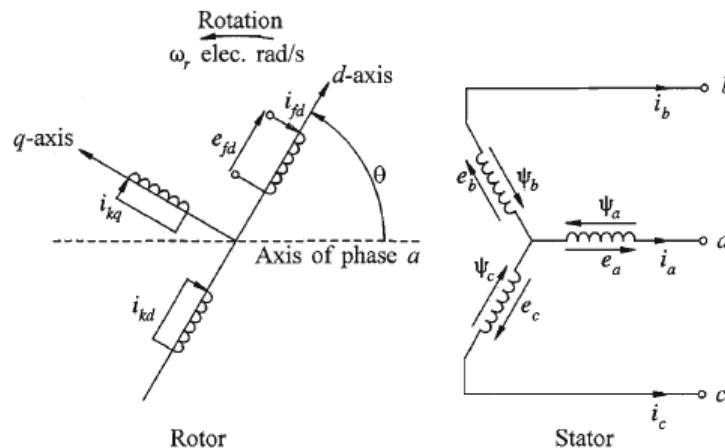


Figura 34. Ilustración del movimiento de las fases de una máquina síncrona (Kundur, 1993)

También hay que tener en cuenta las resistencias de la máquina como el campo (R_{fd}), las de cuadratura (R_{kd} , R_{kq}) y la de armadura (R_a). Las inductancias mutuas (L_{ab} , L_{bc} , L_{ca}) y propias (L_{aa} , L_{bb} , L_{cc}), además de como la campo (L_{fd}) y las de cuadratura (L_{kd} , L_{kq}).

Para conocer la tensión inducida la ecuación 46 para cada una de las fases de la máquina:

$$e_a = \frac{d\psi_a}{dt} - R_a i_a$$

$$e_b = \frac{d\psi_b}{dt} - R_a i_b$$

$$e_c = \frac{d\psi_c}{dt} - R_a i_c$$

Ecuación 46.

Para el caso de la tension de la bobina de campo, se aplica la ecacion 47 para cada tension:

$$e_{fd} = \frac{d\psi_{fd}}{dt} + R_{fd} i_{fd}$$

Ecuación 47.

Una alternativa a las ecuaciones de las máquinas es expresar la tensión en forma proposicional a la inductancia mutua de eje directo con la resistencia de bobina de campo, esta ecuación utiliza valores adimensionales ya que se trabaja en sistema por unidad:

$$E_{fd} = \frac{L_{ad}}{R_{fd}} e_{fd} \quad [pu]$$

Ecuación 48. (Kundur P. , Alternative form of machien equations, 1993) (pg. 180)

Hay que tener en cuenta la saturación magnética, para el cálculo de la inductancia en las máquinas. Primero se debe conocer sus constantes de saturación, ya que esta varía de acuerdo a los niveles de operación de la máquina, como se puede observar en la figura 35:

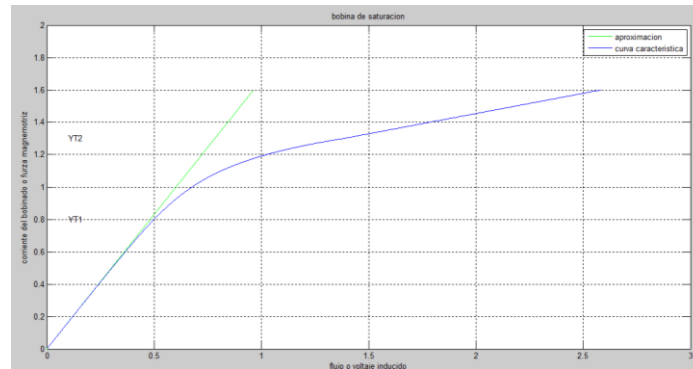


Figura 35. Curva de saturación de máquinas síncrona

Esta puede ser aproximada de mediante una fucion lineal hasta obtener valores aproximados a 88%-90%, y se pueden usar las siguientes ecuaciones:

$$L_{ad} = K_{sd} L_{adu}$$

$$L_{aq} = K_{sq} L_{aqu}$$

Ecuación 49.

Para los casos donde se desprecia la parte resistiva se puede observar

$$x_{ad} = L_{ad} \quad [pu]$$

$$x_{aq} = L_{aq} \quad [pu]$$

Ecuación 50. (Kundur P. , Summary of procedure for formulating the state matrix, 1993) (pg. 746)

De la ecuación 47, de la tension en la bobina de campo, se despeja el flujo inducido y se remplace la tension en la ecuación alternativa 48:

$$\begin{aligned}\frac{d\psi_{fd}}{dt} &= w_0 (e_{fd} - R_{fd} i_{fd}) \\ &= \frac{w_0 R_{fd}}{L_{adu}} E_{fd} - w_0 R_{fd} i_{fd}\end{aligned}$$

Ecuación 51.

Los modelos dinamicos hay que tener en cuenta la inductancia de acople, estos valores son adimensionales ya que se trabaja en sistemas por unidad:

$$\begin{aligned}x_{ad} &= K_{sd} L_{adu} + L_l \quad [pu] \\ x_{aq} &= K_{sq} L_{aqu} + L_l \quad [pu]\end{aligned}$$

Ecuación 52. (Kundur P. , Summary of procedure for formulating the state matrix, 1993) (pg. 746)

Para el caso los flujos de eje directo estos se pueden representar de la siguiente forma circuital:

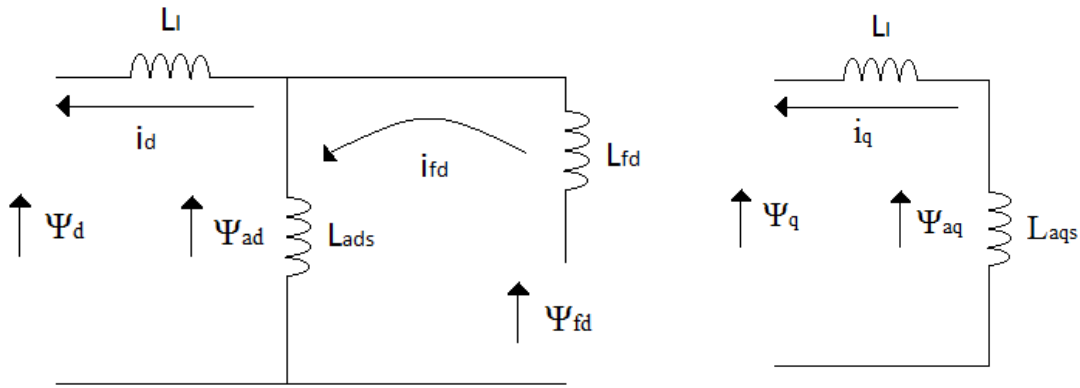


Figura 36. Circuitos de flujo de cuadratura

Ahora se puede obtener el flujo inducido de acople del eje directo de la figura 36:

$$\psi_{ad} = -L_{ads} i_d + L_{ads} i_{fd} = -L_{ads} i_d + L_{ads} \frac{(\psi_{fd} - \psi_{ad})}{L_{fd}}$$

Ecuación 53.

Se puede obtener un valor de inductancia simplificado, realizando el paralelo de las inductancias:

$$L'_{ads} = \frac{1}{\frac{1}{L_{ads}} + \frac{1}{L_{fd}}}$$

Ecuación 54.

Conociendo las inductancias del sistema para cada uno de los ejes de cuadratura y directo, se puede encontrar las corrientes del sistema. Estas expresiones son bastantes extensas, por lo que se simplifican cada las constantes del generador como se puede ver en la ecuación 55, las variables se encuentra en por unidad:

$$i_d = \frac{X_{Tq} \left[\psi_{fd} \left(\frac{L_{ads}}{L_{ads} + L_{fd}} \right) - E_B \cos \delta \right] - R_T E_B \sin \delta}{D} \quad pu$$

$$i_q = \frac{R_T \left[\psi_{fd} \left(\frac{L_{ads}}{L_{ads} + L_{fd}} \right) - E_B \cos \delta \right] + X_{Td} E_B \sin \delta}{D} \quad pu$$

Ecuación 55. (Prabha, Effects of synchronous machine field circuit dynamics, 1993)

Las expresiones de las constantes de la corriente se pueden obtener a partir de las siguientes ecuaciones:

$$R_T = R_a + R_E$$

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

$$X_{Td} = X_E + (L'_{ads} + L_l) = X_E + X'_{ds}$$

$$D = R_T^2 + X_{Tq} X_{Td}$$

Ecuación 56. (Kundur P. , Effects of synchronous machine field circuit dynamics, 1993)

EFFECTOS DEL SINCRONISMO EN LA MÁQUINA DE POLOS SALIENTES DE CIRCUITOS DINÁMICOS

El efecto de sincronismo sobre el generador, es una variable que se debe considerar en la estabilidad. Partiendo de la formulación anterior se puede crear una ecuación de estado más completa sobre el comportamiento del mismo. Esta relación se puede hacer mediante las variaciones de la corriente del sistema y así poder obtener la ecuación de flujo campo inducido.

$$\Delta i_d = m_1 \Delta \delta + m_2 \Delta \psi_{fd}$$

$$\Delta i_q = n_1 \Delta \delta + n_2 \Delta \psi_{fd}$$

Ecuación 57.

Las variaciones de corrientes tienen unas constantes asociadas (m y n)

$$m_1 = \frac{E_B (X_{Tq} \sin \delta_0 - R_T \cos \delta_0)}{D} \quad m_2 = \frac{X_{Tq}}{D} \frac{L_{ads}}{(L_{ads} + L_{fd})}$$

$$n_1 = \frac{E_B (R_T \sin \delta_0 + X_{Td} \cos \delta_0)}{D} \quad n_2 = \frac{R_T}{D} \frac{L_{ads}}{(L_{ads} + L_{fd})}$$

Ecuación 58.

Como bien se mencionó anteriormente la constante de sincronización o amortiguación de la señal del rotor (K_1 0 Ks), está presentando una variación producto del flujo inducido, debido al circuito magnético. El efecto que tiene el flujo sobre el circuito está dado por la constante del ángulo del rotor (K_2)

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

$$K_2 = n_2 (\psi_{ad0} + L_{aqs} i_{d0}) - m_2 (\psi_{aq0} + L'_{ads} i_{q0}) + \frac{L'_{ads}}{L_{fd}} i_{q0}$$

Ecuación 59.

Una de los parámetros propios del sistema en el flujo es la constante del flujo (K_3). Es un valor que no se puede alterar y una expresión que relaciona la variación en el ángulo con el flujo, causando la saturación del generador (K_4)

$$K_3 = \frac{L_{ads} + L_{fd}}{L_{adu}} \frac{1}{1 + \frac{X_{Tq}}{D}(x_d - x'_d)}$$

Ecuación 60.

$$K_4 = L_{adu} \frac{L_{ads}}{L_{ads} + L_{fd}} \frac{E_B}{D} (x_{Tq} \sin \delta_0 - R_T \cos \delta_0)$$

Ecuación 61.

Para analizar el comportamiento del sistema y su estabilidad, hay que analizar las ecuaciones diferenciales del mismo de una forma linealizada con las ecuaciones anteriormente mencionadas (δ , w) y la ecuación del flujo (ψ)

$$\begin{aligned} \Delta \dot{w}_r &= \frac{K_D}{2H} \Delta w_r + \frac{K_1}{2H} \Delta \delta + \frac{K_2}{2H} \Delta \psi_{fd} + \frac{1}{2H} \Delta T_m \\ \Delta \dot{\delta} &= 2\pi f \Delta w_r \\ \Delta \dot{\psi}_{fd} &= \left[\frac{w_0 R_{fd}}{L_{fd}} m_1 L'_{ads} \right] \Delta \delta + \left[\frac{w_0 R_{fd}}{L_{fd}} \left(1 - \frac{L'_{ads}}{L_{fd}} + m_2 L'_{ads} \right) \right] \Delta \psi_{fd} + \frac{w_0 R_{fd}}{L_{adu}} \end{aligned}$$

Ecuación 62.

Con las ecuaciones linealizadas, estas se pueden expresar de forma matricial para poder calcular los valores propios del sistema e inferir acerca de su estabilidad

$$\begin{bmatrix} \Delta \dot{w}_r \\ \Delta \dot{\delta} \\ \Delta \dot{\psi}_{fd} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & 0 & 0 \\ 0 & a_{32} & a_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta w_r \\ \Delta \delta \\ \Delta \psi_{fd} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} b_{11} & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & b_{32} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta T_m \\ \Delta E_{fd} \end{bmatrix}$$

Ecuación 63.

Las constantes de la ecuación de estado son las siguientes:

$$\begin{aligned} a_{11} &= \frac{K_D}{2H} & a_{12} &= \frac{K_1}{2H} & a_{13} &= \frac{K_2}{2H} & b_{11} &= \frac{1}{2H} \\ a_{21} &= w_0 = 2\pi f_0 & a_{32} &= \frac{w_0 R_{fd}}{L_{fd}} m_1 L'_{ads} & a_{33} &= \frac{w_0 R_{fd}}{L_{fd}} m_1 L'_{ads} & b_{32} &= \frac{K_D}{L_{adu}} \end{aligned}$$

Ecuación 64.

EFFECTOS DE LA EXCITACIÓN DEL SISTEMA MEDIANTE AVRS

La producción de perturbaciones en la red o la operación cerca de los límites de estabilidad de las redes, las oscilaciones de potencia activa entre el generador y la red intercambian energía. Estas oscilaciones electromecánicas del rotor pueden ser amortiguadas por la influencia convenientemente modulada sobre la corriente de excitación. (www.abb.com / unitrol, 2013)

Los estudios realizados sobre estabilidad de pequeña señal actualmente tienen un grado de complejidad a la hora del análisis. Los parámetros de compensación buscan garantizar la estabilidad del sistema, mediante dispositivos como AVR y PSS. Uno de los modelos más implementados es el modelo planteado por Kundur para calcular parámetros de dispositivos de compensación. Pero éstas se imitan a pequeña señales de perturbación,

Así como la sintonización de estos dispositivos en un sistema robusto de potencia requiere de una complejidad alta, para ello requieren de técnicas hermeneúticas para limitar los cálculos de compensación, y garantizar una compensación óptima del sistema de potencia.

EFFECTO DE LA EXCITACIÓN DEL SISTEMA

Los AVR son dispositivos de control encargados de producir una tensión de excitación (E_{fd}) en el generador para compensar la caída de voltaje. La tensión del generador está dada por la tensión de cuadratura

$$\tilde{E}_t = e_d + je_q$$

Ecuación 65.

Las pequeñas perturbaciones en el sistema producen variaciones en la tensión

$$E_{t0}\Delta E_t = e_{d0}\Delta e_d + e_{q0}\Delta je_q$$

Ecuación 66.

Las cuales se pueden expresar por cada uno de sus ejes de cuadratura

$$\Delta e_d = -R_a \Delta i_d + L_l \Delta i_q - \Delta \psi_{aq}$$

$$\Delta e_q = -R_a \Delta i_q + L_l \Delta i_d - \Delta \psi_{ad}$$

Ecuación 67.

Para conocer la compensación que dispositivo AVR se necesita (esto lo realiza mediante tiristores) la implementa un transductor con respecto a un voltaje de referencia

$$\Delta E_t = K_5 \Delta \delta + K_6 \Delta \psi_{fd}$$

Ecuación 68.

Esta compensación se realiza en relación al flujo y el deslizamiento del generador

$$K_5 = \frac{e_{d0}}{E_{t0}} \left[-R_a m_1 + L_l n_1 + L_{aqs} n_1 \right] + \frac{e_{q0}}{E_{t0}} \left[-R_a n_1 + L_l m_1 + L'_{ads} m_1 \right]$$

$$K_6 = \frac{e_{d0}}{E_{t0}} \left[-R_a m_2 + L_l n_2 + L_{aqs} n_2 \right] + \frac{e_{q0}}{E_{t0}} \left[-R_a n_2 + L_l m_2 + L'_{ads} \left(\frac{1}{L_{fd}} - m_2 \right) \right]$$

Ecuación 69.

Este dispositivo tiene efecto sobre el flujo de campo del generador adicionando un nuevo término a la ecuación diferencial lineal

$$\frac{d\Delta \psi_{fd}}{dt} = a_{31} \Delta w_r + a_{32} \Delta \delta + a_{33} \Delta \psi_{fd} + \frac{w_0 R_{fd}}{L_{adu}} K_A \Delta v_1$$

Ecuación 70.

La tensión del dispositivo se deberá tener en cuenta para la ecuación de estado, donde la ecuación para este dispositivo está dada por la ecuación siguiente:

$$\frac{d\Delta v_1}{dt} = (0) \Delta w_r + \frac{K_5}{T_R} \Delta \delta + \frac{K_6}{T_R} \Delta \psi_{fd} + \frac{1}{T_R} \Delta v_1$$

Ecuación 71.

La velocidad angular de referencia (w_r) del rotor no se presenta variaciones.

La ecuación de estado para este sistema con el AVR es la siguiente

$$\begin{bmatrix} \Delta \dot{w}_r \\ \Delta \dot{\delta} \\ \Delta \dot{\psi}_{fd} \\ \Delta \dot{v}_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & 0 \\ a_{21} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & a_{32} & a_{33} & a_{44} \\ 0 & a_{42} & a_{43} & a_{44} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta w_r \\ \Delta \delta \\ \Delta \psi_{fd} \\ \Delta v_1 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} b_1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \Delta T_m$$

Ecuación 72.

Y los coeficientes que se encontraron son los siguientes:

$$a_{41} = 0 \quad a_{42} = \frac{K_5}{T_R} \quad a_{43} = \frac{K_6}{T_R} \quad a_{44} = \frac{1}{T_R}$$

Ecuación 73.

La ganancia de excitación que se realiza se puede expresar como una constante (K_A)

$$G_{ex}(s) = K_A$$

Ecuación 74.

POWER SYSTEM STABILIZER

Las variaciones o inestabilidad del sistema, se producen por variaciones en la demanda y fallas del sistema, entre otros cambios en el mismo. Éstas pueden ser controladas de forma óptima para garantizar la correcta operación del sistema. Para ello se debe buscar y analizar en los sistemas de potencia posibles inconvenientes que perjudiquen la estabilidad del sistema. Los dispositivos como los PSS permiten lograr una compensación de la frecuencia y los AVR compensación de tensión, dando una garantía del funcionamiento del sistema. Estos dispositivos requieren de parámetros para garantizar la atenuación, conociendo la amortiguación necesaria de la señal.

La modelacion de estos sistemas hace parte importante del análisis para la compensación del dispositivos de tension y ángulo de rotor, para los PSS, AVR y dispositivos de excitacion. Los parámetros de compensación requieren de cálculos bastante extensos debido a que cada generador cuenta con sus dispositivo de compensación. Hallar los parametros para mitigar la perturbación hace de este un tema complejo que requiere tecnicas de optimizacion.

Para el caso del PSS se puede encontrar una tensión de ganancia (V_s) al igual que AVR, la cual está compuesta por tensiones internas del filtro. Esta tensión tiene la siguiente expresión:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \Delta v_2}{\partial t} &= K_{STAB} \left[a_{11} \Delta w_r + a_{12} \Delta \delta + a_{13} \Delta \psi_{fd} + \frac{1}{2H} \Delta T_m \right] - \frac{1}{T_w} \Delta v_2 \\ &= a_{51} \Delta w_r + a_{52} \Delta \delta + a_{53} \Delta \psi_{fd} + a_{55} \Delta v_2 + \frac{K_{STAB}}{2H} \Delta T_m \end{aligned}$$

Ecuación 75.

Para la tensión del dispositivo PSS su ecuación lineal es la siguiente

$$\frac{\partial \Delta v_s}{\partial t} = a_{61} \Delta w_r + a_{62} \Delta \delta + a_{63} \Delta \psi_{fd} + a_{64} \Delta v_1 + a_{65} \Delta v_2 + a_{66} \Delta v_s + \frac{T_1}{T_2} \frac{K_{STAB}}{2H} \Delta T_m$$

Ecuación 76.

La tensión que produce el PSS produce un efecto sobre el flujo del generador produciendo un nuevo término en la ecuación

$$\frac{\partial \Delta \psi_{fd}}{\partial t} = a_{32} \Delta \delta + a_{33} \Delta \psi_{fd} + a_{34} \Delta v_1 + a_{36} \Delta v_s$$

Ecuación 77.

Una forma fácil de entender el funcionamiento del PSS y el AVR, sobre un modelo de generador clásico, es observando el diagrama de bloque; como muestra la figura 37. En este se va analizar la variación en el ángulo de potencia del generador ($\Delta\delta$).

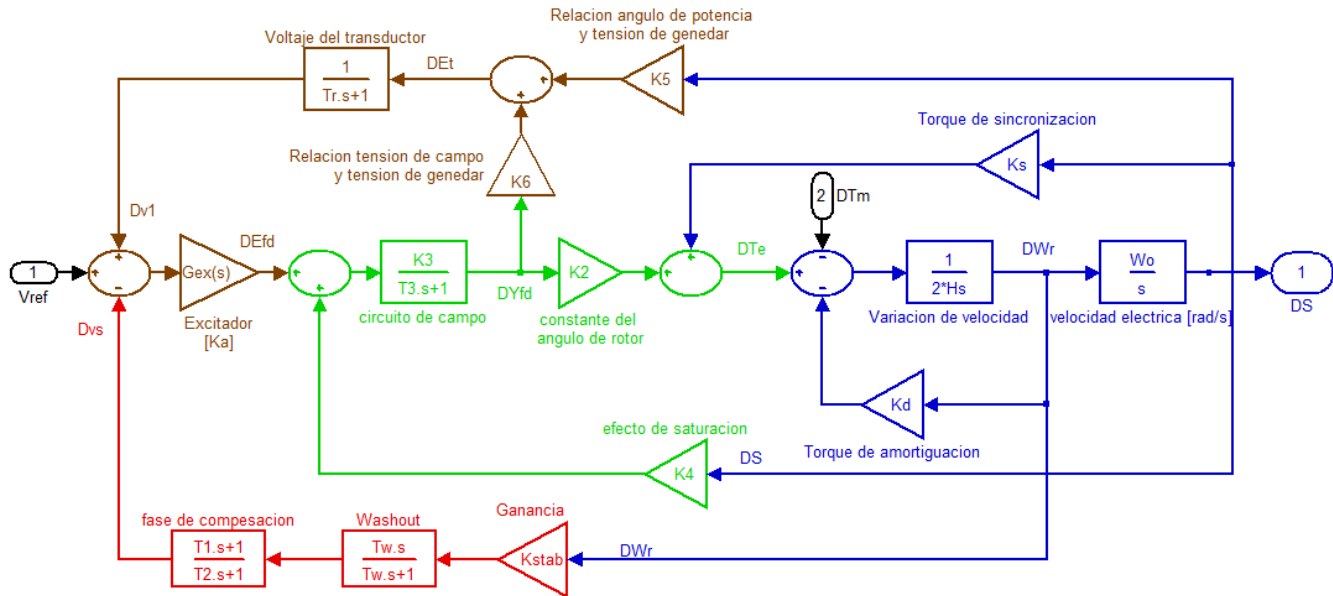


Figura 37. Diagrama de bloques del sistema de prueba

En el diagrama de bloques se puede observar la parte de color azul, la cual representa el modelo clásico del generador y sus variables. Esta parte del diagrama de bloques se obtiene de las ecuaciones diferenciales que rigen el modelo clásico planteado en esta guía (ecuación 30). La variación del deslizamiento depende de la referencia (velocidad eléctrica) y una variación de la velocidad controlada por el torque amortiguación del generador (K_D). La función de entrada es el torque mecánico (ΔT_m).

La parte verde corresponde la parte del flujo del generador. Las ecuaciones que presiden esta parte del sistema las del flujo de campo en el generador (ecuación 63-64). Tomas en cuenta el circuito de campo depende de la constante saturación del generador, a su vez ésta alimenta la variación de la velocidad del rotor. La variable de entrada será siempre el torque mecánico.

En color marrón la compensación del AVR. Este inyecta una corriente de excitación mediante tiristores. Este dispositivo del sistema afecta al generador como se puede observar en la ecuación 78 (parámetros de la matriz 79). Esta corriente de excitación entra al rotor mediante la tensión de campo al circuito del generador. La referencia de disparo depende de la variación del generador en el ángulo de potencia y flujo de campo. Estas señales son comparadas mediante un transductor para la ganancia del sistema.

Por último la roja de compensación del PSS. Esta compensaciones son posibles para rangos de frecuencias entre 0,1 a 2 Hz. Como se puede observar, el PSS recibe la señal de la velocidad angular del rotor y AVR compara la señal del ángulo de potencia; los cuales buscan compensar para garantizar la estabilidad del mismo.

Se puede observar en el diagrama el PSS tiene tres partes: una Ganancia (K_{STAB}), filtro (washout) y una compensación ($T1$ y $T2$). La ganancia (K_{STAB}) está encargada de la máxima amortiguación necesaria de la señal; El filtrado (**washout**), de las oscilaciones, está dados por un filtro pasa altas. Esto permite que el paso de señales superiores asociadas a w_r (velocidad del rotor) dependientes de la constante de tiempo T_w , esto representa un cambio en la velocidad teniendo un rango que manejado de tiempo para perturbaciones que estén entre un rango de duración [1-20 seg]; El **compensador de fase** es el encargado de lograr que la señal de excitación y sistema eléctrico tengan la misma fase. Este es un modelo simple de bloques puede estar llegarse a utilizar más bloque o uno de segundo orden.

La ecuación de estado del sistema está ampliada, teniendo en cuenta las tensiones del PSS

$$\begin{bmatrix} \Delta w_r \\ \Delta \delta \\ \Delta \Psi_{fd} \\ \Delta v_1 \\ \Delta v_2 \\ \Delta v_s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & 0 & 0 & 0 \\ a_{21} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & a_{32} & a_{33} & a_{34} & 0 & a_{36} \\ 0 & a_{42} & a_{43} & a_{44} & 0 & 0 \\ a_{51} & a_{52} & a_{53} & 0 & a_{55} & 0 \\ a_{61} & a_{62} & a_{63} & 0 & a_{65} & a_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta w_r \\ \Delta \delta \\ \Delta \Psi_{fd} \\ \Delta v_1 \\ \Delta v_2 \\ \Delta v_s \end{bmatrix}$$

Ecuación 78.

Las variables que están presentes en la ecuación están dadas por las siguientes expresiones

$$\begin{aligned} a_{11} &= \frac{K_D}{2H} & a_{36} &= \frac{w_0 R_{fd}}{L_{adu}} K_A & a_{55} &= \frac{1}{T_w} \\ a_{12} &= \frac{K_1}{2H} & a_{42} &= \frac{K_5}{T_R} & a_{61} &= \frac{T_1}{T_2} a_{51} \\ a_{13} &= \frac{K_2}{2H} & a_{43} &= \frac{K_6}{T_R} & a_{62} &= \frac{T_1}{T_2} a_{52} \\ a_{21} &= 2w_f^f & a_{44} &= \frac{1}{T_R} & a_{63} &= \frac{T_1}{T_2} a_{53} \\ a_{32} &= \frac{w_0 R_{fd}}{L_{fd}} m_1 L'_{ads} & a_{51} &= K_{STAB} a_{11} & a_{65} &= \frac{T_1}{T_2} a_{55} + \frac{1}{T_2} \\ a_{33} &= \frac{w_0 R_{fd}}{L_{fd}} \left[1 - \frac{L'_{ads}}{L_{ads}} + m_2 L'_{ads} \right] & a_{52} &= K_{STAB} a_{12} & a_{66} &= -\frac{1}{T_2} \\ a_{34} &= \frac{w_0 R_{fd}}{L_{adu}} K_A & a_{53} &= K_{STAB} a_{13} \end{aligned}$$

Ecuación 79.

IV.METODOLOGIA

Para los estudios de estabilidad se debe tener en cuenta más parámetros aparte del ángulo de potencia como se plantea en el método directo criterio de áreas iguales. El garantizar la estabilidad requiere modelar la mayor cantidad de variables posibles, como es la tensión, velocidad del rotor, flujo inducido, entre otros. La implementación de estas ecuaciones implica la realización de cálculos mayor.

El método de valores propios permite realizar el análisis de estabilidad de acuerdo a los parámetros que se desee, pero para ello se debe tener en cuenta la ecuación que rige a esta, así como la relación que existe entre cada una de las variables. Al someter el sistema ante una pequeña perturbación permite la linealización de estas ecuaciones que rige al sistema, este planteamiento admite la realización del método de valores propios. Esto facilita el análisis donde se adicionan parámetros de una forma matricial, para la realización de la compensación.

Los parametros que se tiene en cuenta para el metodo de valores propios planteados son Perdida de sincronismo, oscilaciones no amortiguadas y la caída o aumento incontrolado de tensiones. Donde estos se ven representados mediante valores propios, los cuales permiten conocer la estabilidad o la perdida del mismo. Ademas que apartir de estos podemos obtener la matriz de participacion, la cual nos da la informacion de insidencia de cada una de las variables.

La ventaja que posee este modelo es la adición de ecuaciones que rige al sistema, a diferencia de otros modelos que alterarían totalmente el modelo matematico. Ademas de la implementacion de este modelo se pude expresar en modo de diagrama de bloques simplificando el entendimiento y adición de dispositivos de control para la compesacion de la inestabilidad.

Una forma de observar las oscilaciones de los parametros es mediante los valores propios del sistema planteando la funcion que rigue la variable (implementando la ecuacion 10). Para la compensacion del sistema, el metodo de valores propios planteados implementa los dispositivos de control AVR y PSS para la estabilizacion, el mejorar o saber cuanto se debe variar los parametros se puede realizar mediante la matriz de sensibilidad.

Este método de valores propios es estudiado por Kundur siendo el mayor referente, además de otros autores. Los resultados realizados por Kundur es la estabilización del sistema ante la presencia de dispositivos de compensación, son corroborados en este documento, mediante la implementación del sistema de prueba SMIB. Para ello se analizara los parámetros de ángulo de potencia o deslizamiento, velocidad angular y tensión. Al realizar la implementación de los dispositivos el sistema vuelve a su punto de equilibrio.

Las ventajas que posee este método es la aproximación con respecto a los modelos reales (ecuaciones lineales), además de poder analizar los parámetros que deseamos para la estabilidad del sistema. También la implementación de dispositivos de compensación, este método permite la utilización de otros dispositivos a los planteados en la guía como gobernadores.

Para la realización del método de los valores propios se necesitan los siguientes datos:

- Parámetros de sistema (impedancias, tensiones y potencia)
- Bases del sistema (potencia y tensión)
- Parámetros del generador (constante inercial; inductancias de ejes, armadura, acople; reactancia de ejes; inductancias de eje directo transitoria; resistencia de armadura, campo; tensión y corriente de ejes inicial, ángulo de potencia inicial, constante de sincronización de ejes)
- Parámetros de los dispositivos (constante de la ganancia AVR y PSS; tiempo del AVR y PSS)

Despues de tener esta informacion podemos realizar el siguiente proceso:

1. Impedancia equivalente del sistema en operación. Con la constante de sincronizacion se puede verificar si el sistema es estable.
2. Parametros del circuito dinamico del sistema. permite conocer las constante de sincronizacion del generador.
3. Tension de ejes en el generador. Las constancias asociadas a este parametro.
4. Matriz de estado. A partir de los valores obtenidos anteriormente podemos obtener los componentes de la matriz
5. Obtension de los valores propios.
6. Matriz de estabilidad.

V.EJEMPLO

DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

En el diagrama unifilar de la figura 38 se representa un generador conectado a un barraje infinito, mediante dos líneas en paralelo. Los valores están dados en por unidad. Se presenta una falla en punto P y se debe determinar la estabilidad del sistema mediante los valores propios del sistema. Realizar la correspondiente compensación para lograr la estabilidad del sistema.

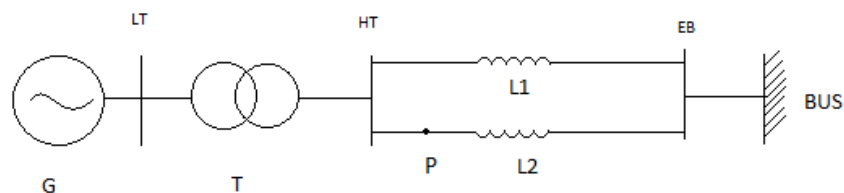


Figura 38. Diagrama unifilar de sistema de potencia

Datos del sistema

Parámetros bases

$$S_B = 2000 \text{ MVA} \quad V_B = 500 \text{ kV}$$

Valores del sistema

$$P = 0,9 \quad Q = 0,3 \quad LT = 1 \angle 36^\circ \quad E_B = 0,995 \angle 0^\circ \quad X'_T = 0,16 \quad X_G = 0,28 \quad X_{L1} = X_{L2} = 0,24 \quad X_B = 0,16$$

Parámetros del generador

$$H = 3,5 \quad K_D = 0 \quad L_{adu} = 1,65 \quad L_{aqu} = 1,6 \quad L_l = 0,16 \quad R_a = 0,003 \quad R_{fd} = 0,006 \quad L_{fd} = 0,153 \quad X_d = 1,81 \\ X'_d = 0,3$$

Constantes asumidas

$$K_{sd} = 0,8491 \quad K_{sq} = 0,8491 \quad \delta_0 = 79,13^\circ \quad e_{d0} = 0,6836 \quad e_{q0} = 0,7298 \quad i_{d0} = 0,8342 \quad i_{q0} = 0,452$$

Constantes de controladores

$$K_A = 200 \quad T_R = 0,02 \quad s \quad K_{STAB} = 9,5 \quad T_W = 1,4 \quad s \quad T_1 = 0,154 \quad s \quad T_2 = 0,033 \quad s$$

VI. RESULTADOS

PRIMERA PARTE

Primero se analizará el modelo clásico del sistema para observar los valores propios del mismo.

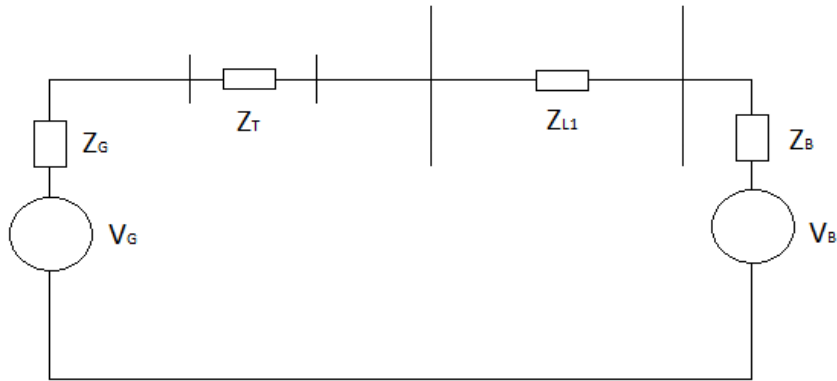


Figura 39. Circuito del sistema después de la falla

Impedancia del sistema

$$Z_3 = Z_G + Z_T + Z_{L1} + Z_B \\ Z_3 = j0,28 + j0,16 + j0,24 + j0,16 \\ Z_3 = j0,84$$

Impedancia del sistema, entre el la salida del generador y el barraje (sin tener en cuenta la impedancia del generador)

$$X_E = j0,16 + j0,24 + j0,16 = j0,56 \\ R_E = 0$$

Voltaje del generador

$$I = \left[\frac{S}{V} \right]^* = \left[\frac{0,9 + 0,3j}{1 \angle 36^\circ} \right]^* = 0,9487 \angle 18^\circ$$

$$I = \frac{-1 \angle 36^\circ + V_G}{0,3j} \Rightarrow V_G = -(0,9487 \angle 18^\circ * 0,3j) + 1 \angle 36^\circ$$

$$V_G = 0,9514 \angle 19^\circ$$

Se calculan el coeficiente del torque de sincronización

$$K_s = K_1 = \frac{0,9514 * 0,995}{0,84} \cos(19^\circ) = 1,0625$$

Se calculan los parámetros para iniciar

SEGUNDA PARTE

Efecto de sincronización de la máquina en circuitos dinámicos. Se empieza calculando las inductancias síncronas del sistema para los ejes del generador, así como también las resistencias y reactancias

Se empieza con la inductancia de eje directo síncrona

$$L_{ads} = K_{sd} L_{adu} = 0,849 * 1,65$$

$$L_{ads} = 1,401$$

Ahora se calcula la inductancia transitoria

$$L'_{ads} = \frac{1}{\frac{1}{L_{ads}} + \frac{1}{L_{fd}}} = \frac{1}{\frac{1}{1,401} + 0,153}$$

$$L'_{ads} = 0,138$$

La resistencia de sistema

$$R_T = R_a + R_E = 0,003 + 0$$

$$R_T = 0,003$$

Las reactancias de eje directo y cuadratura síncrona, se parte que los valores son adimensionales

$$X_{qs} = K_{sq} L_{aqu} + L_l = 0,849(1,6) + 0,16$$

$$X_{qs} = 1,519$$

Las reactancias de eje directo y cuadratura total

$$X_{Td} = X_E + L'_{ads} + L_l = 0,65 + 0,138 + 0,16$$

$$X_{Td} = 0,948$$

$$X_{Tq} = X_E + X_{qs} = 0,65 + 1,519$$

$$X_{Tq} = 2,169$$

$$D = R_T^2 + X_{Td} X_{Tq} = (0,003)^2 + (0,948)(2,169)$$

$$D = 2,056$$

La constante de relación de la corriente con el flujo

$$m_1 = \frac{E_B [X_{Td} \text{Sen}(\delta_0) - R_T \text{Cos}(\delta_0)]}{D} = \frac{0,995(2,16856 * \text{sen}(79,13^\circ) - 0,003 * \cos(79,13^\circ))}{2,02992}$$

$$m_1 = 1,0436$$

$$n_1 = \frac{E_B [R_T \text{Sen}(\delta_0) - X_{Td} \text{Cos}(\delta_0)]}{D} = \frac{0,995(0,003 * \text{sen}(79,13^\circ) + 0,9361 * \cos(79,13^\circ))}{2,02992}$$

$$n_1 = 0,088$$

$$m_2 = \frac{X_{Tq}}{D} \frac{L_{ads}}{(L_{ads} + L_{fd})} = \frac{2,16856 * 1,40102}{2,05567(1,40102 + 0,153)}$$

$$m_2 = 0,88023$$

$$n_2 = \frac{R_T}{D} \frac{L_{ads}}{(L_{ads} + L_{fd})} = \frac{0,003 * 1,401}{2,056(1,401 + 0,153)}$$

$$n_2 = 0,00132$$

La inductancia de eje cuadratura síncrona

$$L_{aqs} = K_{sl} L_{aqu} 0,849 * 1,6$$

$$L_{aqs} = 1,359$$

La reactancia de eje directo

$$L_{ds} = X_{ds} = K_{sd} L_{ads} + L_l = 0,849 * 1,65 + 0,16$$

$$L_{ds} = 1,561$$

La corriente y flujo de campo

$$i_{fd0} = \frac{e_{q0} + R_a i_{q0} + L_{ds} i_{d0}}{L_{ads}} = \frac{0,729 + 0,003 * 0,452 + L_{ds} * 0,834}{1,401}$$

$$i_{fd0} = 1,451$$

$$\psi_{ad0} = L_{ads} (-i_{d0} + i_{fd0}) = 1,401(-0,834 + 1,451) \quad \psi_{aq0} = -L_{aqs} i_{q0} = -1,359 * 0,452$$

$$\psi_{ad0} = 0,86$$

$$\psi_{aq0} = -0,61$$

La constante de sincronización de forma completa teniendo en cuenta el flujo

$$K_1 = n_1 (\psi_{ad0} + L_{aqs} i_{d0}) - m_1 (\psi_{aq0} + L'_{ads} i_{q0}) = 0,088(0,86 + 1,359 * 0,834) - 1,031(-0,61 + 0,132 * 0,452)$$

$$K_1 = 0,74$$

Se procede a calcular las constantes K₂, K₃ y K₄ del sistema

$$K_2 = n_2 (\psi_{ad0} + L_{aqs} i_{d0}) - m_2 (\psi_{aq0} + L'_{ads} i_{q0}) + \frac{L'_{ads}}{L_{fd}} i_{q0}$$

$$K_2 = 0,00132(0,86 + 1,359 * 0,452) - 0,951(-0,61 + 0,138 * 0,452) + \frac{0,138}{0,153} 0,452$$

$$K_2 = 0,93$$

$$K_3 = \frac{L_{ads} + L_{fd}}{L_{adu}} \frac{1}{1 + \frac{X_{Tq}}{D} (x_d - x'_d)} = \frac{1,401 + 0,153}{1,65} \frac{1}{1 + \frac{2,168}{2,055} (1,81 - 0,3)}$$

$$K_3 = 0,363$$

$$K_4 = L_{adu} \frac{L_{ads}}{L_{ads} + L_{fd}} \frac{E_B}{D} (x_{Tq} \sin \delta_0 - R_T \cos \delta_0) = 1,65 \frac{1,401}{1,401 + 0,153} \frac{0,995}{2,056} (2,169 \sin 79,19^\circ - 0,003 \cos 79,19^\circ)$$

$$K_4 = 0,929$$

TERCERA PARTE

Efectos del AVR en la sincronización y amortiguación del torque. Primero se debe tener la tensión inicial del generador

$$E_{t0} = e_{d0} + j e_{q0} = 0,684 + j 0,73$$

$$E_{t0} = 0,949 \angle 46,86^\circ$$

Las constantes que representan el AVR en la ecuación de estado

$$\begin{aligned} K_5 &= \frac{e_{d0}}{E_{t0}} [-R_a m_1 + L_l n_1 + L_{aqs} n_1] + \frac{e_{q0}}{E_{t0}} [-R_a n_1 - L_l m_1 - L'_{ads} m_1] \\ &= \frac{0,68}{0,949} [-0,003 * 1,031 + 0,16 * 0,088 + 1,359 * 0,088] + \frac{0,73}{0,949} [-0,003 * 0,088 - 0,16 * 1,031 - 0,138 * 1,031] \\ K_5 &= -0,14 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} K_6 &= \frac{e_{d0}}{E_{t0}} [-R_a m_2 + L_l n_2 + L_{aqs} n_2] + \frac{e_{q0}}{E_{t0}} \left[-R_a n_2 + L_l m_2 + L'_{ads} \left(\frac{1}{L_{fd}} - m_2 \right) \right] \\ &= \frac{0,684}{0,949} [-0,003 * 0,951 + 0,16 * 0,0013 + 1,359 * 0,0013] + \frac{0,73}{0,949} \left[-0,003 * 0,0013 + 0,16 * 0,951 + 0,138 \left(\frac{1}{0,153} - 0,951 \right) \right] \\ K_6 &= 0,709 \end{aligned}$$

CUARTA PARTE

Los valores de los coeficientes de la matriz, con las constantes (K_1 , K_2 , K_3 , K_4 , K_5 y K_6), obtenidos de la parte anterior, se muestran a continuación

$$\begin{aligned}
a_{11} &= \frac{0}{2H} = 0 & a_{36} &= \frac{w_0 R_{fd}}{L_{adu}} K_A = 27,42 & a_{55} &= -\frac{1}{T_w} = -\frac{1}{1,4} \\
a_{12} &= -\frac{K_1}{2 * H} = -\frac{0,744}{2 * 3,5} & a_{42} &= \frac{K_5}{T_R} = -\frac{0,142}{0,02} & a_{61} &= \frac{T_1}{T_2} a_{51} = \frac{0,15}{1,4} (0) \\
a_{13} &= -\frac{K_2}{2H} = -\frac{0,934}{2 * 3,5} & a_{43} &= \frac{K_6}{T_R} = \frac{0,71}{0,02} & a_{62} &= \frac{T_1}{T_2} a_{52} = \frac{0,15}{1,4} (-1) \\
a_{21} &= 2\pi f_0 = 2 * 3,14 * 60 & a_{44} &= -\frac{1}{T_R} = -\frac{1}{0,02} & a_{63} &= \frac{T_1}{T_2} a_{53} = \frac{0,15}{1,4} (-1,2) \\
a_{32} &= -\frac{w_0 R_{fd}}{L_{fd}} m_1 L'_{ads} = \frac{377 * 0,0006}{0,153} 1,031 * 0,138 & a_{51} &= K_{STAB} * a_{11} = 9,5 * 0 & a_{65} &= \frac{T_1}{T_2} a_{55} + \frac{1}{T_2} = 26,97 \\
a_{33} &= -\frac{w_0 R_{fd}}{L_{fd}} \left[1 - \frac{L'_{ads}}{L_{ads}} + m_2 L'_{ads} \right] = 1,47 \left[1 - \frac{0,13}{1,40} + 0,96 * 0,13 \right] & a_{52} &= K_{STAB} * a_{11} = 9,5 * (-0,11) & a_{66} &= -\frac{1}{T_2} = -\frac{1}{0,033} \\
a_{34} &= -\frac{w_0 R_{fd}}{L_{adu}} K_A = 1,47 * 200 & a_{53} &= K_{STAB} * a_{11} = 9,5 * (-0,13)
\end{aligned}$$

Con estos valores se puede obtener la matriz de estado

$$A = \begin{array}{c|cccccc|l} & 0 & -0,106 & -0,133 & 0 & 0 & 0 & \text{estado} \\ & 377 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \Delta w_r \\ & 0 & -0,213 & -0,339 & -27,418 & 0 & 27,418 & \Delta \delta \\ & 0 & -7,119 & 35,45 & -50 & 0 & 0 & \Delta \psi_{fd} \\ & 0 & -1,01 & -1,268 & 0 & -0,714 & 0 & \Delta v_1 \\ & 0 & -4,712 & -5,918 & 0 & 26,97 & -30,3 & \Delta v_2 \\ & & & & & & & \Delta v_s \end{array}$$

Con la matriz se procede a calcular los valores propios del sistema

$$\begin{aligned}
\lambda_1, \lambda_2 &= -0,7114 \pm j6,3628 \\
\lambda_3 &= -0,7317 \\
\lambda_4 &= -34,6961 \\
\lambda_5, \lambda_6 &= -22,2531 \pm j22,8541
\end{aligned}$$

Matriz de participación

0,519	0,519	0,025	0,004	0,004	0,004	Δw_r
0,519	0,519	0,025	0,004	0,004	0,004	$\Delta \delta$
0,031	0,031	0,001	0,103	0,757	0,757	$\Delta \psi_{fd}$
0,019	0,019	0,000	0,432	0,569	0,569	Δv_1
0,109	0,109	1,050	0,018	0,030	0,030	Δv_2
0,034	0,034	0,001	0,698	0,185	0,185	Δv_s
λ_1	λ_2	λ_3	λ_4	λ_5	λ_6	

Tabla 5. Matriz de participación

Los valores propios obtenidos son de valor negativo, por lo cual garantiza que el sistema es estable. Los valores de la matriz de participación indican la relación de cada una de las variables con respecto a los valores propios. Como se observa en la tabla de participación los valores propios 1 y 2 (columna 1 y 2) y las variables de velocidad y deslizamiento son las de mayor incidencia, además del valor V_2 el cual permitiría realizar la compensación si este valor propio fuera positivo (controlado por el PSS). El caso de valores propios 3 (columna 3) que es V_2 , sólo suministra estabilidad al sistema ya que este depende del PSS y por lo mismo es un valor negativo. El valor propio 4 es dependiente de los parámetros del AVR y debe ser negativo. El resultado fue un valor alto. Por último los valores

VII. ANÁLISIS DE RESULTADOS

Se logró encontrar y expresar de una forma rápida y sencilla la matriz de estado del sistema de prueba con AVR+PSS, calculando cada una de las constantes. Además se pudo apreciar una variación de las constantes del sistema a medida que se van teniendo en cuenta más variables del sistema. La constante de sincronización (K_1), del modelo clásico, comparado con el de modelo de flujo tuvo una variación del 14% de la constante de sincronización.

Los valores propios tuvieron un resultado bastante aceptable a lo esperado donde dieron valores negativos. Los más cercanos a cero fueron los valores propios 1 y 2, los cuales están relacionados con la velocidad y el deslizamiento. Esto es debido a que la falla en la línea causa una perturbación principalmente en estas variables. En el caso de querer mejorar o hacer más estable el sistema, se debe lograr que los valores propios sean los más negativos posible. Esto se realiza cambiando los parámetros de compensación del AVR [K_A , T_R] y PSS [K_{STAB} , T_W , T_1 , T_2].

La matriz de participación permite conocer la incidencia de cada una de las variables del sistema sobre los valores propios o en la estabilidad del sistema. Hay que recordar que los parámetros de las v_1 , v_2 y v_s ; son variables que pueden ser alteradas debido a que son los que representan los dispositivos de control (PSS y AVR). Es importante observar la incidencia que tiene cada uno de ellos sobre los valores propios para compensar de forma independiente los resultados y lograr la estabilidad.

Con los valores de compensación los dispositivos AVR y PSS, que son predeterminados, se logra unos valores propios negativos, garantizan la estabilidad del sistema. Lo cual representaría gráficamente que el sistema tendría una estabilidad nodal, permitiendo que el sistema se estabilice en el tiempo, sin presencia de oscilación.

VIII. EJERCICIO

Encontrar la función de transferencia del siguiente diagrama de bloques, ignorando el torque mecánico del sistema. Además, de evaluar las constantes dadas del ejemplo anterior en la función de transferencia dada.

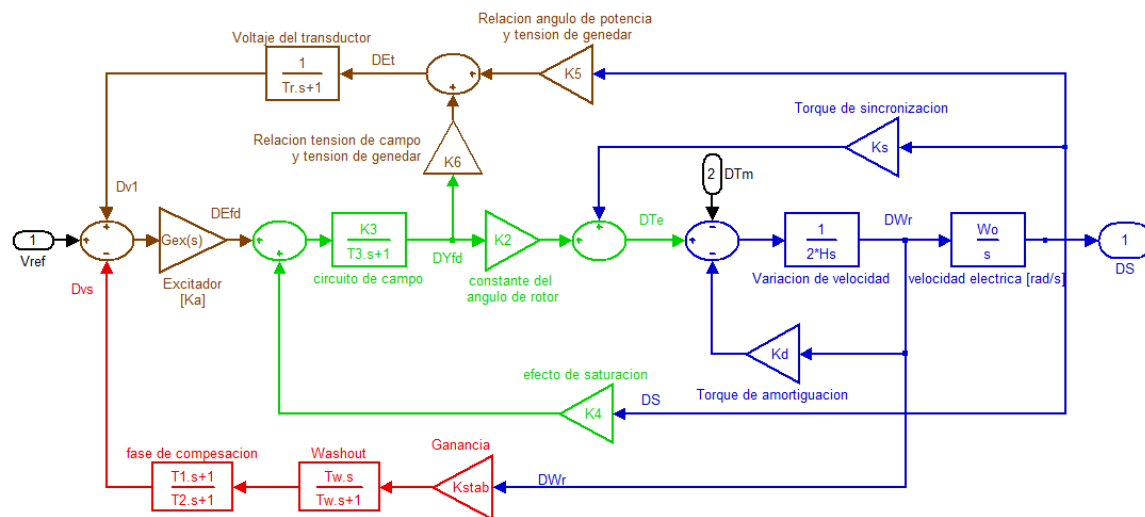


Figura 40. Diagrama de bloques con AVR y PSS

Analizar qué implicaciones tiene esta función de transferencia en la estabilidad. ¿Qué ocurre con la función de transferencia evaluada con los parámetros?

IX.REFERENCIAS

- Montoya, A. A. (s.f.). Estabilidad. En A. A. Montoya, *Análisis de Sistemas de Potencia* (pág. 90). Pereira: Tecnológica de Pereira.
- Rodríguez, M. (1992). Estabilidad en los sistemas de potencia. En M. Rodríguez, *Análisis de Sistemas de Potencia* (pág. 545). Maracaibo: Universidad de Zulia.
- Stevenson, W. (1985). Estabilidad de Sistema. En W. Stevenson, *Análisis de Sistemas Eléctricos de Potencia* (pág. 333). Mexico: McGraw-Hill.
- Weedy, M. (1982). Funcionamiento de un generador trabajando sobre unas barras de potencia infinita. En M. Weedy, *Sistemas Eléctricos de Gran Potencia* (pág. 49). Barcelona: Reverte.
- Weedy, M. (2012). System Stability. En M. Weedy, *Electric Power System* (pág. 281). Chichester: John Wiley & Sons Ltd.
- Wildi, T. (2007). Ventaja de los sistemas interconectados. En T. Wildi, *Máquinas eléctricas y sistemas de potencia* (pág. 670). México: Pearson.
- Kundur, P. (1993). Alternative form of machine equations. In P. Kundur, *Power System Stability and Control* (p. 180). Palo Alto: McGraw-Hill.
- Kundur, P. (1993). Effects of synchronous machine field circuit dynamics. In P. Kundur, *Power system stability and control* (p. 737). Palo alto: McGraw-Hill.
- Kundur, P. (1993). Effects of synchronous machine field circuit dynamics. In P. Kundur, *Power system stability and control* (p. 742). Palo alto: McGraw-Hill.
- Kundur, P. (1993). Summary of procedure for formulating the state matrix. In P. Kundur, *Power System Stability and Control* (p. 746). Palo alto: McGraw-hill.

ANEXO C

GUIA III “IMPLEMENTACION DE PSAT PARA SIMULACIÓN DINÁMICA DE SISTEMAS DE POTENCIA”

Resumen— Esta guía contiene el estudio de estabilidad mediante PSAT de un toolbox de MATLAB, un software especializado en sistemas dinámicos; para ello se realizará el análisis de estabilidad mediante los valores propios y se observará la simulación de tensión y ángulo, en el dominio del tiempo. Mediante los resultados de participación de los valores se analizará la necesidad de compensación con controladores de potencia AVR y PSS y se realizará la simulación correspondiente para observar la estabilización del sistema.

Índice de Términos—Estabilidad, AVR, PSS, PSAT, Simulación.

I.OBJETIVO

Simular en PSAT los escenarios en falla: del sistema, del sistema con AVR y con PSS; para observar la compensación de la pequeña señal de perturbación del sistema de potencia y el efecto que esto tiene sobre los valores propios.

II.INTRODUCCION

Para analizar la estabilidad de SEP de grandes dimensiones es necesario del software que permita observar el comportamiento de las diferentes variables en el tiempo. Se requiere de un programa que sea bastante robusto, debido a que se debe examinar cada uno de los instantes y así obtener las variaciones que se presenta en el sistema en el tiempo. Una de las herramientas que se plantea en esta guía es PSAT, que es un toolbox de MATLAB el cual fue desarrollado por Federico Milano, herramienta bastante simple de trabajar, la cual permite importar de una forma rápida los resultados para su análisis o comprensión.

El SEP que se utilizara para este trabajo es el planteado en la guía 2, donde los parámetros suministrados inicialmente por el ejemplo son los implementados sin incluir los de resultados (ya que PSAT determina otra matriz de estabilidad variando los cálculos) para la compensación del AVR y PSS. Primero se deberá analizar la estabilidad del sistema mediante los valores propios, luego se analizará el comportamiento de la tensión y su ángulo, para luego, de una forma manual, realizar la compensación correspondiente.

III.MARCO TEÓRICO CONCEPTOS TEORICO Y SIMULACIÓN EN PSAT

PSAT

PSAT (Power System Analysis Toolbox) es una herramienta de Matlab para simulación de sistemas eléctricos de potencia de uso libre y sin garantía. Presenta la ventaja de implementar librerías de simulink para el diseño de SEP y la utilización de GUIDE, como una interfaz gráfica, busca la simplicidad de manejo de esta herramienta. Este sistema de caja de herramientas de Matlab permite analizar sistemas eléctricos y efectuar su simulación.

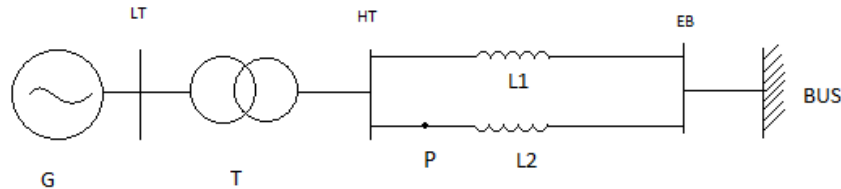
Una de las características de este software es el manejo de modelos dinámicos de los SEP y la obtención de los valores propios que se presentan en éste. Otra de las ventajas es que es un código abierto, lo cual permite su modificación e importación de datos a otros códigos, además el PSAT es compatible con Excel otros programas para la interfaz.

Las características de PSAT lo hacen un programa importante para la investigación, debido a la creación y/o modificación de códigos de Matlab; la capacidad de importar información a Excel y facilidad de cambios de la topología de la red o componentes y parámetros eléctricos.

Entre las características de análisis de PSAT se encontraron: flujo de potencia, flujo de potencia continuo, flujo de potencia óptimo, análisis de estabilidad de pequeña señal, simulación en el dominio del tiempo, interfaz gráfica del SEP, FATCS, modelo de aerogeneradores, Exportación de datos (texto, Excel y página web), interfaz GAMS y programación de líneas de comandos.

IV.EJEMPLO

Se realiza el montaje del sistema SMIB, con los parámetros de la página 63. Para algunos de los datos que no se encuentre puede ser tomados del libro “Power System Stability And Control escrito, por Prabha Kundur, capítulo de estabilidad de pequeña señal pg. 699 a 781”. Donde se simulara el sistema, luego instalando el AVR y por ultimo con el PSS. Hasta lograr la estabilidad del sistema.



V.METODOLOGIA

El programa seleccionado para el desarrollo de esta guía es el PSAT por que permite importar la información a MATLAB y EXCEL, lo cual facilita el procesamiento de información y conocer los datos más relevantes para la compensación del sistema. Este programa a diferencia de otros, maneja sistemas de potencia dinámicos, tiene sistemas de prueba predeterminados como el SMIB utilizado por Kundor.

La implementación de esta guía busca ofrecer a los estudiantes una herramienta para sistemas mucho más robustos sin realizar los cálculos manuales, ya que el mismo sistema los realiza, mostrando los valores propios; además este programa contiene los dispositivos AVR, PSS y gobernadores para la compensación del sistema.

Para la utilización del programa primero se debe cargar la carpeta de PSAT en MATLAB. Lo anterior se puede hacer de dos formas; En la primera forma se da clic en el ícono de browser for folder (ícono de tres puntos en la ventana principal) y se busca la carpeta de PSAT; la segunda forma, en la barra de herramientas se busca file, set path, add folder y se busca la carpeta de PSAT.

Ahora se escribe PSAT en la ventana de comandos para abrir el toolbox, donde abrirá un mensaje con la información del programa. Además de una ventana emergente del programa, como se puede observar la figura 41.

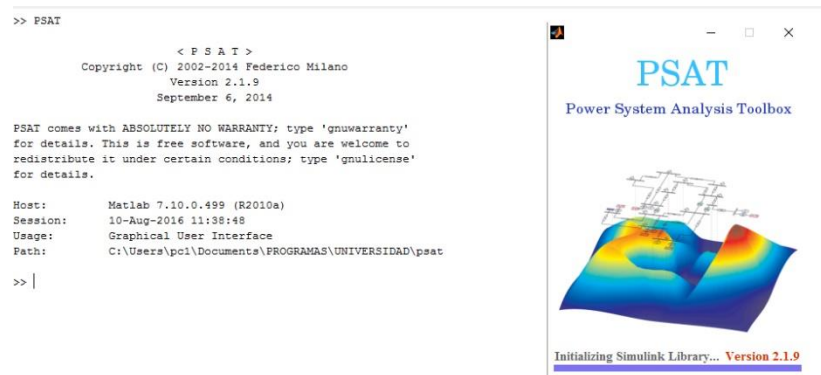


Figura 41. Ventana de comandos

Luego se abrirá la ventana principal de PSAT en donde hay que configurar los parámetros principales (frecuencia, potencia base, tiempo de simulación, toleración y número de interacciones).

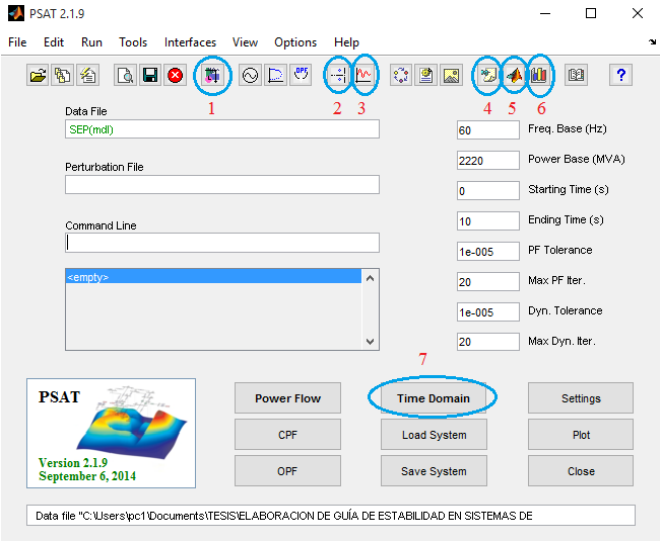


Figura 42. Ventana principal

PLANTEAMIENTO DEL EJEMPLO

El ejemplo que se plantea es el mismo propuesto en la guía 2, con los mismos parámetros. Como primera parte hay que ingresar los parámetros básicos para la simulación del SEP que se desea trabajar. Estos se encuentran en la tabla 6 (estos parámetros son tomados del ejemplo de la guía II):

Frecuencia [Hz]	Potencia Base [MVA]	Inicio de simulación [Seg]	Final de simulación [Seg]
60	2000	0	5

Tabla 6. Parámetros principales

Los parámetros restantes corresponden a la de tolerancia de flujo de potencia, máximas iteraciones en flujo de potencia, tolerancia dinámica y máximas iteraciones dinámicas. Para esto se dejan con los valores predeterminados.

Los elementos que interesa obtener del sistema están enumerados como se puede observar en la figura 41. El primero consiste en la parte de simulink que contiene la librería del software y la parte de creación del diagrama del sistema de potencia, para la creación un nuevo modelo de potencia (ctrl+N o file/new/model), como se puede observar en la figura 42.

PRIMERA PARTE

Hay que iniciar con la creación del SEP, se abre la librería principal de los modelos del sistema. Ésta resume los elementos que se puede implementar para los sistemas eléctricos. Para abrirla hay que dar clic al **ícono 1** de la figura 42 o presionar las teclas ctrl+S, lo cual abrirá una nueva ventana (figura 43)

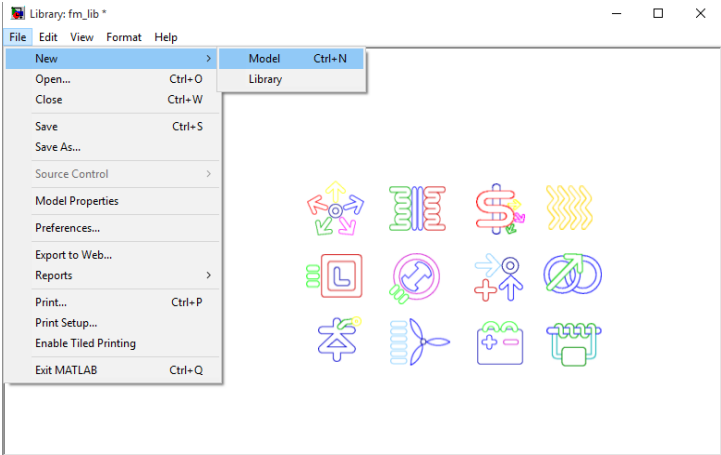


Figura 43. Ventana de la librería

En esta ventana se encuentran los conectores. El segundo flujo de potencia, el tercero flujo óptimo de potencia, cuarto fallas, quinto corresponde a elemento dependientes de otros parámetros del sistema, el sexto máquinas eléctricas, el séptimo son los dispositivos de potencia, el octavo transformadores regulados, el noveno FACTS, el décimo generadores eólicos, once otros elementos y doceavo medidores.

Para empezar a diseñar la red, hay que crear un nuevo modelo desde la ventana de la librería principal. Para poder implantar este, se inicia dando clic en file, new, model como se puede observar en la figura 43 o presionar las teclas ctrl+N. Se abrirá una nueva ventana emergente como se puede observar en la figura 44, donde hay que arrastrar o pegar los elementos que se van a trabajar.

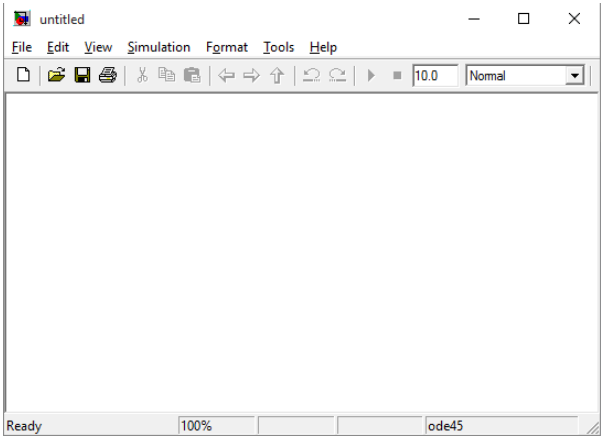


Figura 44. Ventana simulación

En el primer ícono de la ventana de la librería se encuentran los conectores, donde se observa las sugerencia de nodos (bus1, bus2 y bus3) y conectores. Estos nodos son predeterminados y se pueden editar, como se puede visualizar adelante:

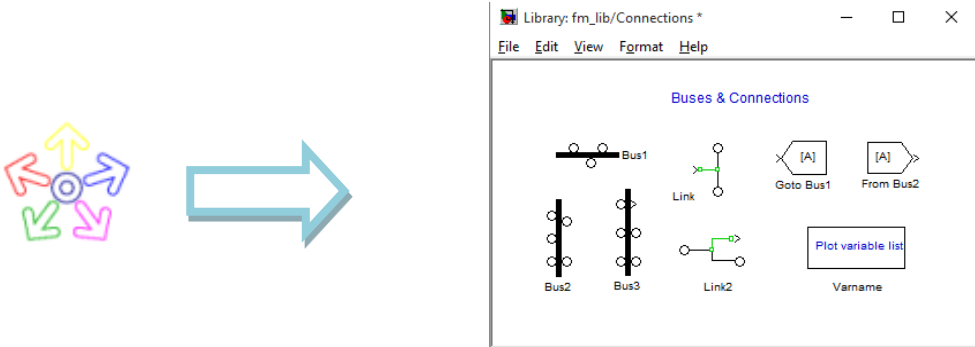


Figura 45. Conectores y tipos de barrajes

De acuerdo al ejemplo planteado se tienen tres nodos: el primero conectará el generador con el transformador; el segundo, transformador con líneas en paralelo y el tercero las líneas con el barraje infinito. Hay que arrastrar tres de estos nodos como se puede observar en la figura 45 e ingresar los parámetros para cada uno de estos nodos de la tabla 7:

	A	B	C	D	E	F
Bus1	2	1	500	[1.00 0.00]	1	1
Bus2	1	3	500	[1.00 0.00]	1	1
Bus3	3	0	500	[1.00 0.00]	1	1

Tabla 7. Parámetros de los nodos del ejemplo tratado

Para ingresar estos parámetros de la tabla en los nodos, hay que dar clic en cada uno de ellos e ingresar estos, como se puede observar en la figura 46 (la tabla del lado izquierdo).

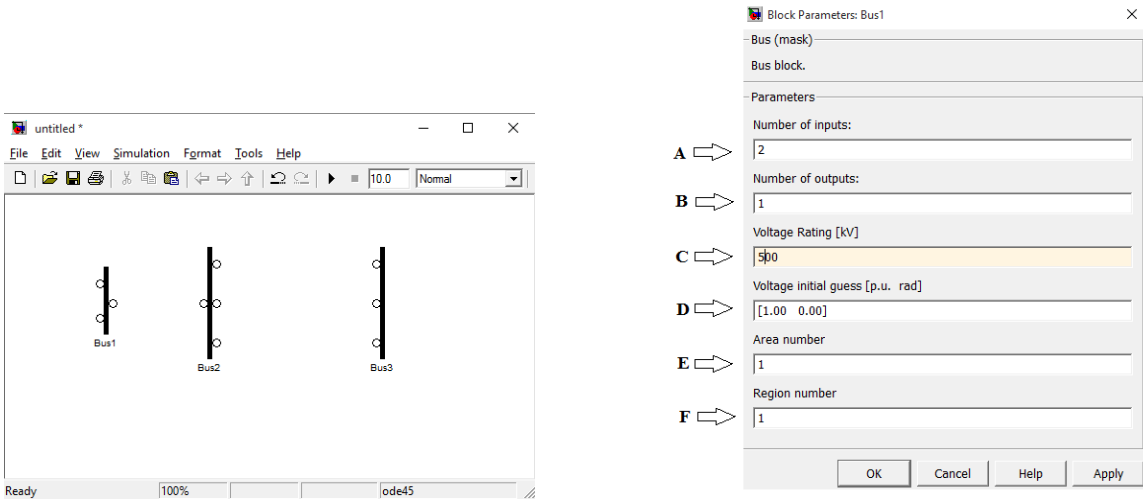


Figura 46. Circuito nodal

En el sexto ícono de la ventana de la librería principal se encuentra el generador y motor síncrono. Hay que utilizar el generador síncrono para el ejemplo (para poder obtener los efectos que tiene la perturbación sobre esta máquina), como se puede ver a continuación (figura 47):

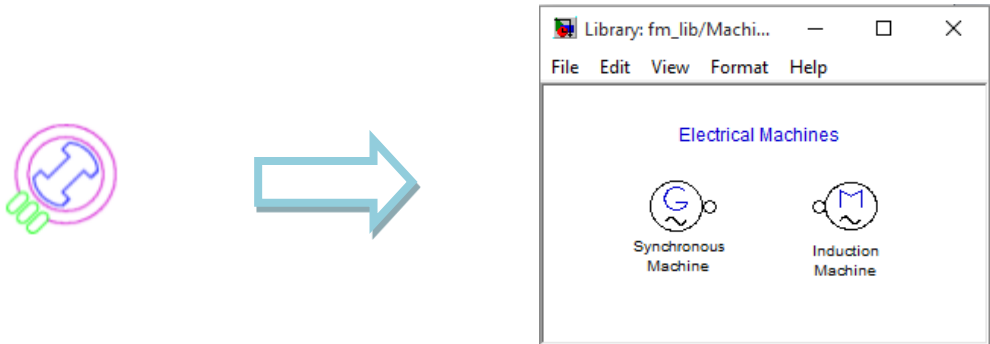


Figura 47. Máquinas eléctricas

Hay que arrastrar el generador al lado del nodo y conectar dando clic a éste y luego clic a barraje 1, como se observa en la figura 47. Los parámetros del generador síncrono son tomados del ejemplo de la guía anterior y del libro (Kundur, 1993)

	G	H	I	J	K	L	M
Gen	[2000 500 60]	[0.002 0.1]	[1.5 0.25 0.23]	[8.5 0.03]	[2 0.65 0.25]	[1 0.07]	[6 0]

Tabla 8. Parámetros de la máquina síncrona

Para ingresar estos valores se da clic en el generador y se remplaza. Los valores que no se encuentran en la tabla son los predeterminados por el software, como se puede ver a continuación:

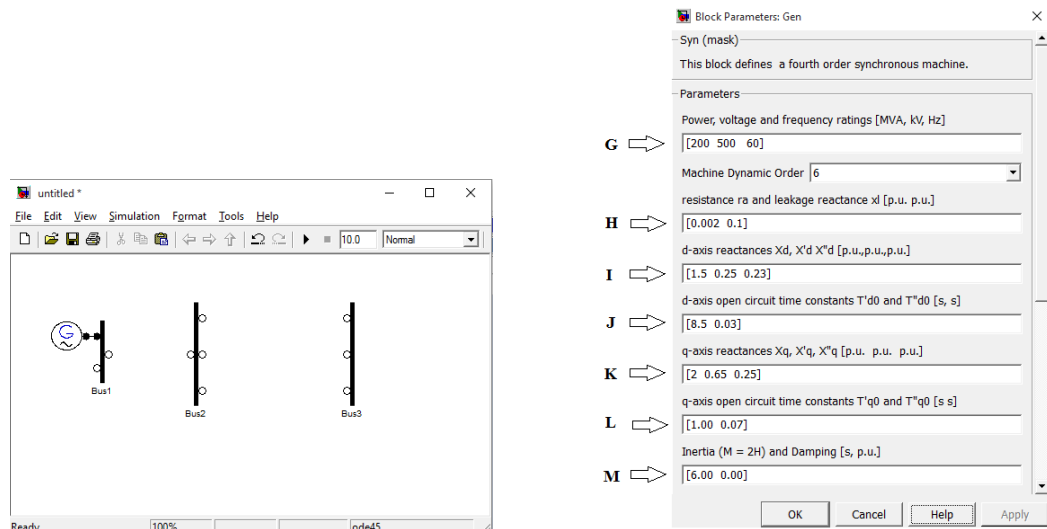


Figura 48. Circuito nodal incluyendo el generador

Para especificar el tipo de generación que se está produciendo en este nodo, hay que (bus1) agregar un bloque de la librería de sistema de potencia (el segundo ícono de la librería principal), el cual tiene forma de círculo con las letras PV como el ejemplo lo indica. Los datos dados son los de tensión y potencia activa del generador, como se puede observar en la figura 49:

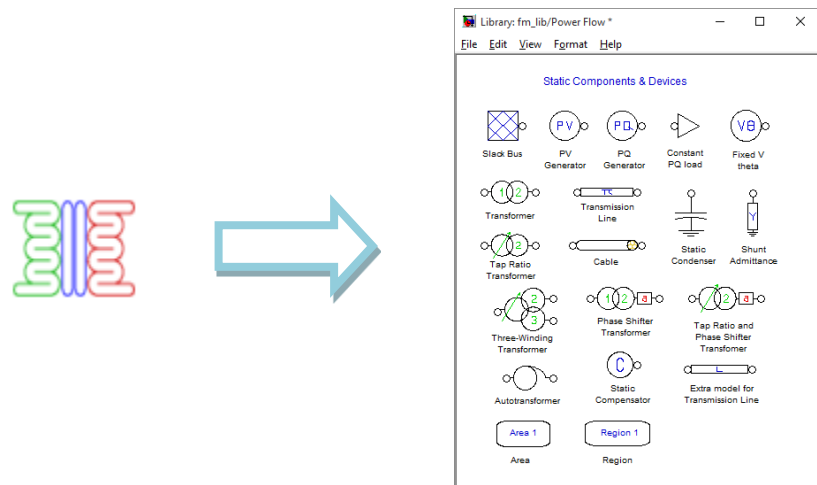


Figura 49. Librería de flujo de potencia

Se agrega al modelo y se conecta en el mismo nodo del generador síncrono. Los datos que se van a ingresar son los mostrados en la tabla:

	<i>N</i>	<i>O</i>	<i>P</i>	<i>Q</i>	<i>R</i>	<i>S</i>
PV	[200 500]	0.9	1.00	[0.8. 0.2]	[1.1 0.9]	1

Tabla 9. Parámetros del Generador

Al igual que lo realizado anteriormente, se da clic y se ingresan los valores correspondientes

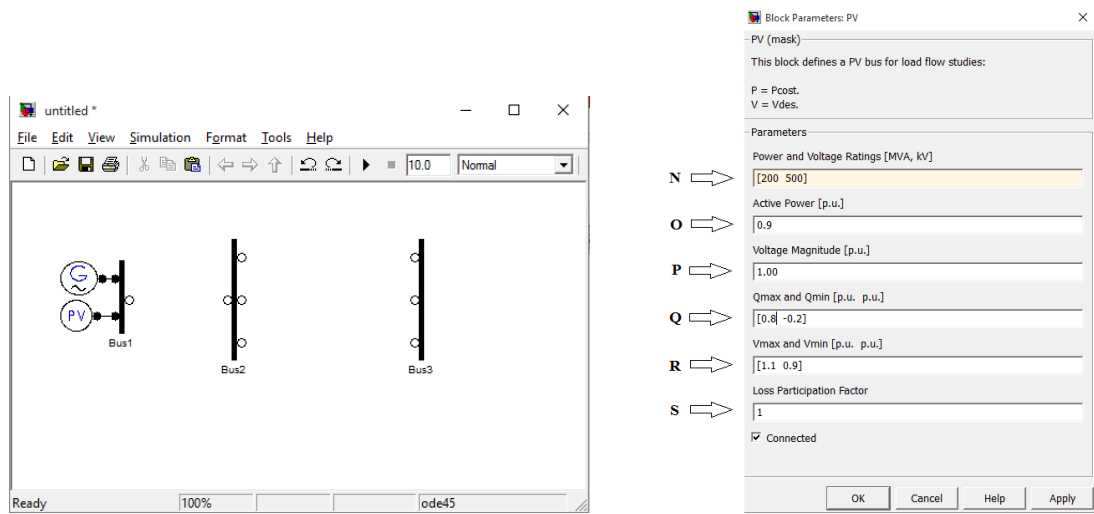


Figura 50. Circuito de generación

En esta misma ventana (flujo de potencia) se encontrar el transformador, el cual aparece como ícono 5, que conectará el nodo 1 y 2. Los datos que corresponde a éste son los siguientes:

	T	W	X	Y	Z
Transf1	[200 500 60]	1	0.0	0.15	[0.0 0.0 0.0]

Tabla 10. Parámetros del transformador

El sistema de generación y transformación ya estará ubicado en el SEP, como se puede observar en la figura 51:

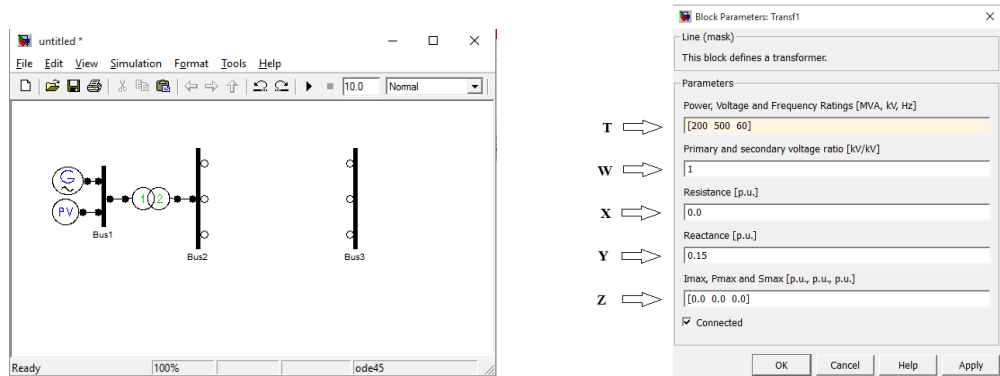


Figura 51. Circuito de alimentación

El ícono número 6 es el de la línea de transmisión. Como lo pide el ejercicio, hay que implementar dos líneas en paralelo. Donde esta sufrirá una falla. Para estas líneas los valores son los siguientes:

	L1	L2	L3	L4	L5	L6
Line1	[200 500 60]	0	0.0	0.24	0.0	[0.0 0.0 0.0]
Line2	[200 500 60]	0	0.0	0.24	0.0	[0.0 0.0 0.0]

Tabla 11. Parámetros de la línea

Se ingresan los mismos valores para ambas líneas. Hay que recordar que la línea 2 sufre una falla, pero debido a su similitud no influye en cual se ubica la falla en el sistema:

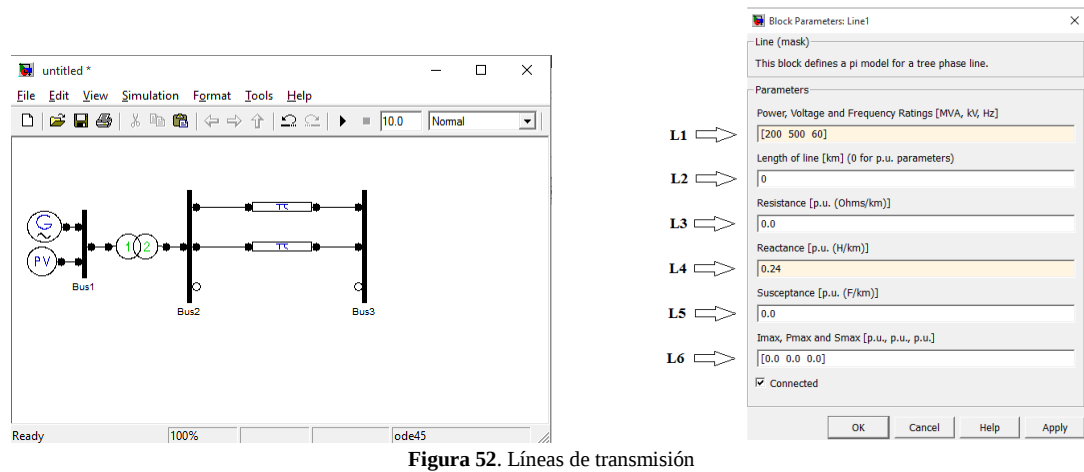


Figura 52. Líneas de transmisión

Las fallas se pueden encontrar en la ventana de librería principal del ícono 4. Se especifica la falla a tierra y la apertura del circuito:

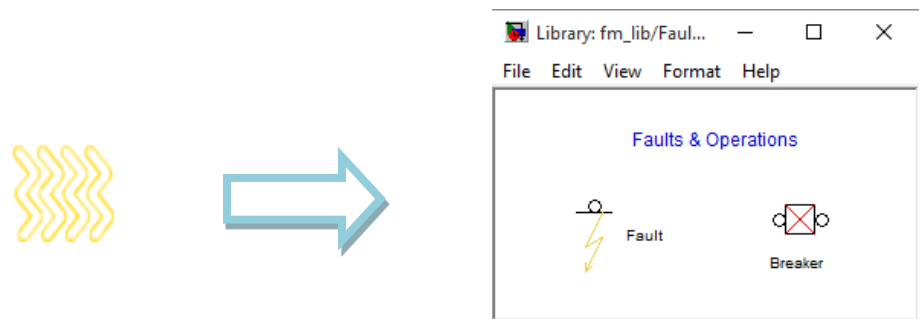


Figura 53. Librerías de tipo de fallas

Como el ejemplo lo plantea, ocurre una falla en la línea 2 y se aísla está desconectándola. Para simular la falla se implementa el modelo de fault, y el breaker se utiliza para desconectar la línea. La ubicación de éstos se puede ver en la figura 54. Los parámetros de la falla son los correspondientes a la tabla 12 y 13.

	<i>B1</i>	<i>B2</i>	<i>B3</i>
Breaker	[00 500 60]	0.5	100

Tabla 12. Parámetros del breaker

	<i>F1</i>	<i>F2</i>	<i>F3</i>	<i>F4</i>	<i>F5</i>
Fault	[200 400 60]	0.5	0.5	0	1e-5

Tabla 13. Parámetros de la falla

En la tabla 8 se observan los parámetros correspondientes a la falla (y los correspondientes a la última tabla de la figura 54). Como se menciona, el aislamiento de la falla ocurre con la apertura del interruptor de la línea. Es por ello que hay que implementar el breaker (son los valores de la tabla de la mitad de la figura 54)

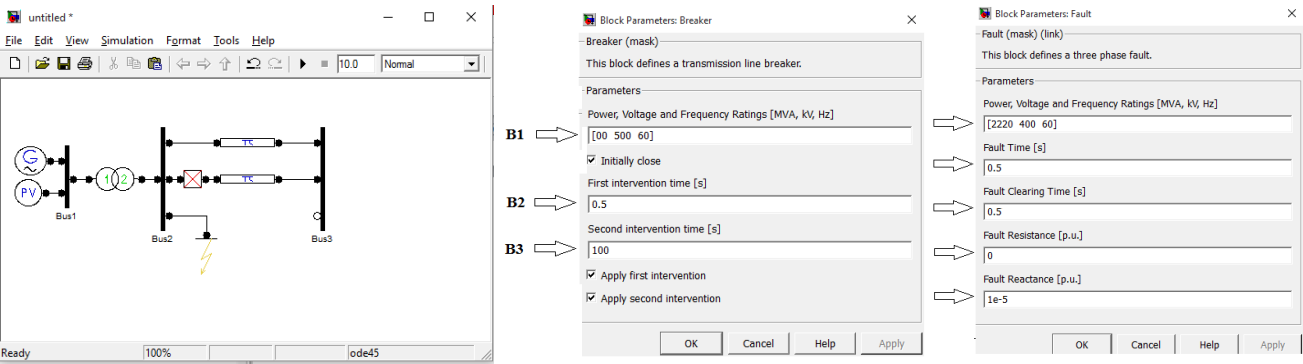


Figura 54. Circuito de falla

Por último hay que colocar el barraje infinito, simulándolo como un nodo flotante, el cual se encuentra en la librería de la figura 49. Este debe estar ubicado en el nodo 3. Los datos son los de la tabla 14:

	N	O	P	Q	R	S
Slack	[200 500]	0.9	1.00	[0.8. 0.2]	[1.1 0.9]	1

Tabla 14. Parámetros del barraje infinito

Esta es la última información suministrada para la simulación del SEP y posteriormente se analiza la correspondiente estabilidad del sistema, como se puede visualizar en la figura 55:

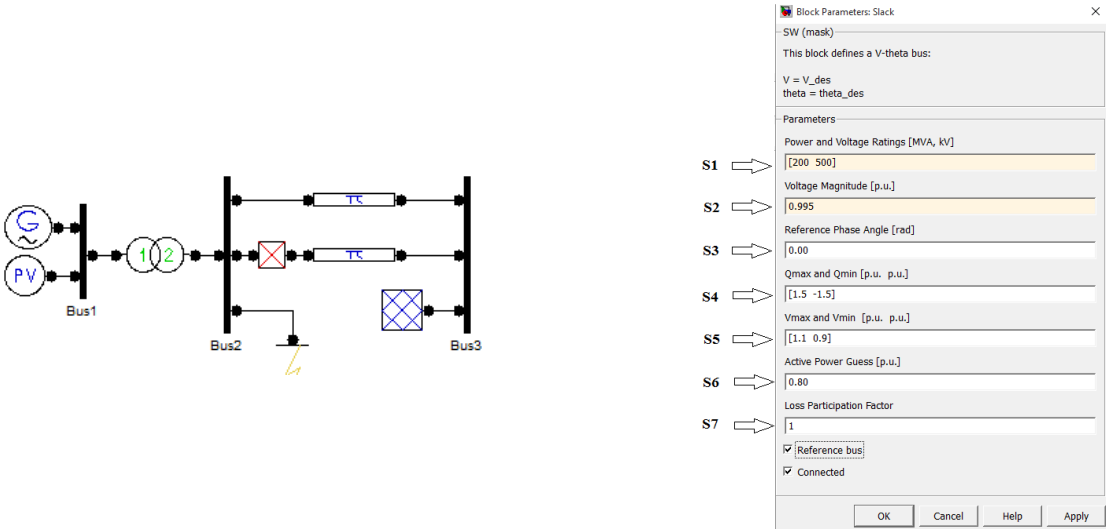


Figura 55. Circuito del ejemplo

Lo siguiente es guardar el archivo del modelo terminado, dando clic en file/save o presionando las teclas ctrl+S, se elige el lugar de la ubicación del archivo y su nombre. Luego hay que cargar el SEP a PSAT; para ello hay que volver a la ventana principal de PSAT (imagen 2), se abre file/open/data file. Otra forma es dando doble clic data file o presionando ctrl+D; luego, en la parte derecha, se busca la carpeta selección para guardar el archivo; en la parte de filtro se elige la opción PSAT simulink (.mdl), se selecciona el archivo y se da en la opción load.

VI.RESULTADOS

SEGUNDA PARTE

Esta segunda parte se efectúa el análisis de estabilidad del SEP; se buscan los valores propios del sistema; se realiza una simulación en el dominio del tiempo y se obtiene la matriz de participación del sistema.

Para poder obtener los valores propios del sistema hay que dar clic en el **ícono 2** de la figura 42 o presionar las teclas **crlt+E**. En esta parte se abrirá la ventana de valores propios y se permitirá seleccionar el tipo de gráfica (cartesiana, real e imaginario; circular magnitud Z y ángulo Θ ; gráfica PF), tipos de valores propios (As [estable], J_{LFR} , J_{LFV} , J_{LFD}), por último se da clic en la opción de plot o graph para observar la gráfica de los valores propios.

Hay que recordar que la parte real determina la amortiguación de la señal; si el valor llegare a ser positivo implicaría una inestabilidad del sistema. En la ventana de valores propios, los valores positivos se encuentran graficados de rojo. La parte derecha muestra un resumen de los valores, (cantidad de valores, nodos, valores positivos, negativos) y valor de cada uno de ellos.

Para entender de forma rápida la estabilidad del sistema se debe diseñar una gráfica utilizando el ícono graph, como se puede observar en la figura 56, donde no se presentó un valor positivo.

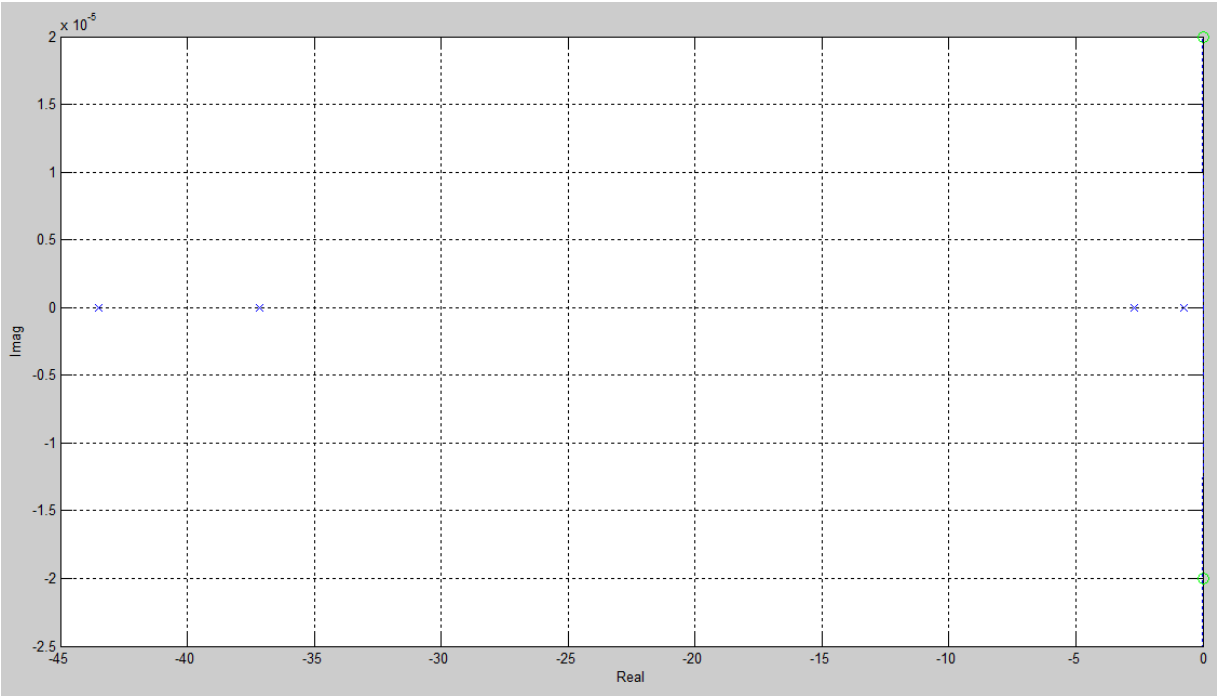


Figura 56. Valores propios del ejemplo considerado

Para poder observar los resultados de una forma rápida se puede importar la información obtenida. Para ello hay que ir a view/select text viewer o **ctrl+T**. Se selección la opción que se desea trabajar y por último se da en la opción reporte o **ctrl+W**. A continuación se observan los valores propios del sistema en la tabla 15:

STATE MATRIX EIGENVALUES			
Eigevalue	Most Associated States	Real part	Imag. Part
Eig As #1	e2d_Syn_1	-37,14509	0
Eig As #2	e2q_Syn_1	-43,47056	0
Eig As #3	e1d_Syn_1	-2,7076	0
Eig As #4	e1q_Syn_1	-0,75417	0

Eig As #5	omega_Syn_1,	0	0,00002
	delta_Syn_1		
Eig As #6	omega_Syn_1,	0	-
	delta_Syn_1		0,00002

Tabla 15. Valores propios del SEP

En la tabla se puede observar que no hay valores positivos, pero se presenta el caso del vórtice (para entender mejor remitirse a la guía II) de los valores propios 5 y 6. Para analizar la estabilidad hay que recurrir a otro método. Se implementa el método de simulación, en el tiempo, de la tensión (ángulo y magnitud de tensión) permitirá conocer de forma directa la estabilidad del sistema.

Para realizar la simulación gráfica de la tensión hay que abrir la ventana de simulación desde view/network visualization o ctrl+inicio también dando clic en el logo de Matlab, **ícono 5** de la figura 42. Luego edit/update o ctrl+U. Otra forma es dando clic en el ícono de MATLAB. Por último hay que ir a la ventana principal, se busca el **ícono 3**. Otra forma es con run/Ttime simulation o ctrl+T. En la ventana de simulación se observa la variación de la tensión en el tiempo (para observar el ángulo en la barra inferior cambiando voltage magnitude por angles) como se puede observar en la figura 57

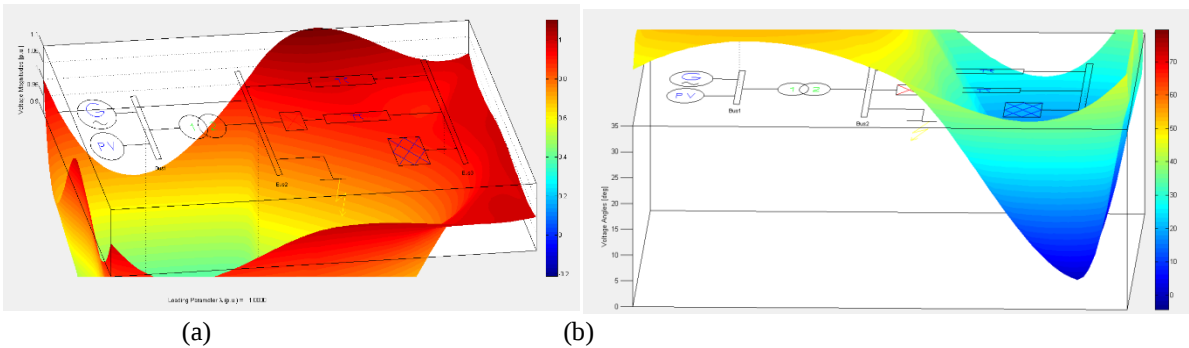


Figura 57. Simulación de tensión (a) y ángulo de tensión (b) del SEP

Para conocer cuáles son los valores propios y qué incidencia tiene cada uno de estos con respecto a las variables (tensiones de cuadratura e_q y e_d , ω [velocidad síncrona del rotor], δ [ángulo de potencia o deslizamiento del generador]) del sistemas, hay que observar la tabla de participación (tabla 16), la cual se encuentra debajo de la matriz de valores propios del reporte. En ella se pueda observar el efecto que tiene cada valor sobre las variables, la relación que tiene cada una de estas variables con respecto a los valores propios. El caso de valor propio 1 (fila 1) tiene una mayor influencia de tensión de sincronización de eje directo ($e_{1d_Syn_1}$); El valor propio 2 (fila 2) será la tensión de sincronización de eje en cuadratura ($e_{1q_Syn_1}$ - $e_{2q_Syn_1}$); El valor 3 de tensión de sincronización de eje directo ($e_{1d_Syn_1}$); valor 4 de tensión de sincronización de eje en cuadratura ($e_{1q_Syn_1}$ - $e_{2q_Syn_1}$). Algo particular es la participación de la delta y omega sobre los valores 5 y 6, donde son valores propios que causan el vortex.

PARTICIPATION FACTORS (Euclidean norm)					
	delta_Syn_1	omega_Syn_1	e1q_Syn_1	e1d_Syn_1	e2q_Syn_1
Eig As #1	2,91266E-17	4,027E-17	6,6823E-06	0,045075213	0,0008841
Eig As #2	2,31221E-16	9,3122E-14	0,01428482	4,22694E-05	0,98469468
Eig As #3	2,0827E-15	2,3725E-15	1,0767E-05	0,954870755	1,8266E-08
Eig As #4	1,59251E-12	1,9232E-12	0,98568295	1,20559E-05	0,01430475
Eig As #5	0,499999982	0,49999998	3,6361E-08	8,39318E-13	1,4309E-10
Eig As #6	0,499999982	0,49999998	3,6361E-08	8,39318E-13	1,4309E-10

Tabla 16. Factores de participación del SEP

Se puede comprobar que el sistema de estudio es un sistema inestable, con un comportamiento oscilatorio de la tensión hasta perder la estabilidad del mismo. Con valores propios y las variables que están siendo afectadas por la falla se recurrió a una opción de PSAT,

como se muestra en la figura 57, de simulación en el tiempo, debido a que se encontró un caso particular de vortex en el cual el sistema oscila.

TERCERA PARTE

La última parte de este trabajo consiste en la implementación de dispositivos de compensación para lograr la estabilidad del sistema. Para ello hay que a implementar un AVR y un PSS. El AVR va encargarse de que el sistema tenga la tensión entre sus parámetros, esto lo realizará mediante una corriente de excitación en la máquina síncrona. El PSS se encargará de eliminar la oscilación del sistema para no perder la estabilidad. En la librería principal (figura 43) el ícono 7, se encontrarán los dispositivos de control (figura 58). Los dispositivos anteriormente mencionados son los que se usaran.

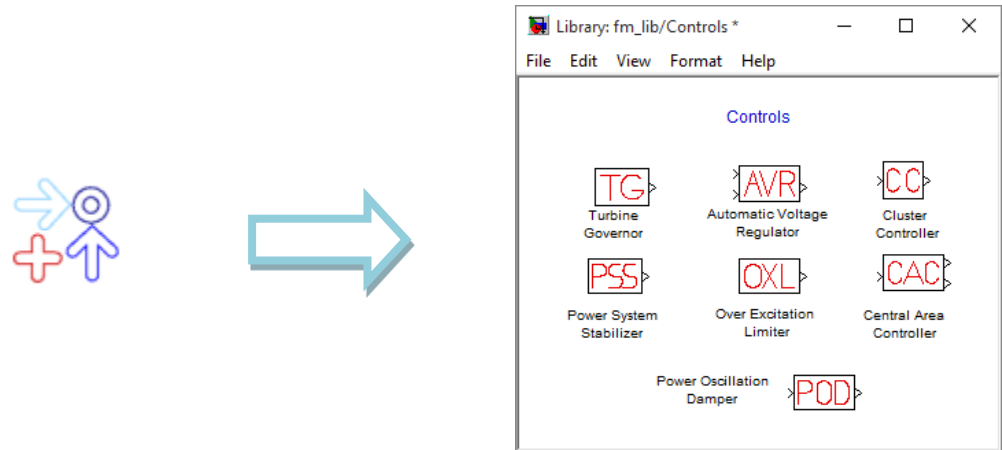


Figura 58. Librería de controladores

Antes de lo anterior hay que modificar uno de los parámetros del generador síncrono para permitir la implementación del AVR sobre éste. Se da doble clic y en la parte inferior se encontrara la opción de number of input signals se cambia ésta por 1.

Los parámetros se ingresan al AVR son los mostrados en la tabla 12. Estos son los parámetros obtenidos del ejemplo de la guía anterior y del libro anteriormente mencionado (Kundur):

	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8
AVR	700	-6.40	200	1	1	0	0.0001	0.015

Tabla 17. Parámetros del AVR

Se Ingresan estos valores al AVR y se conectan con el generador, como se observa en la figura 58.

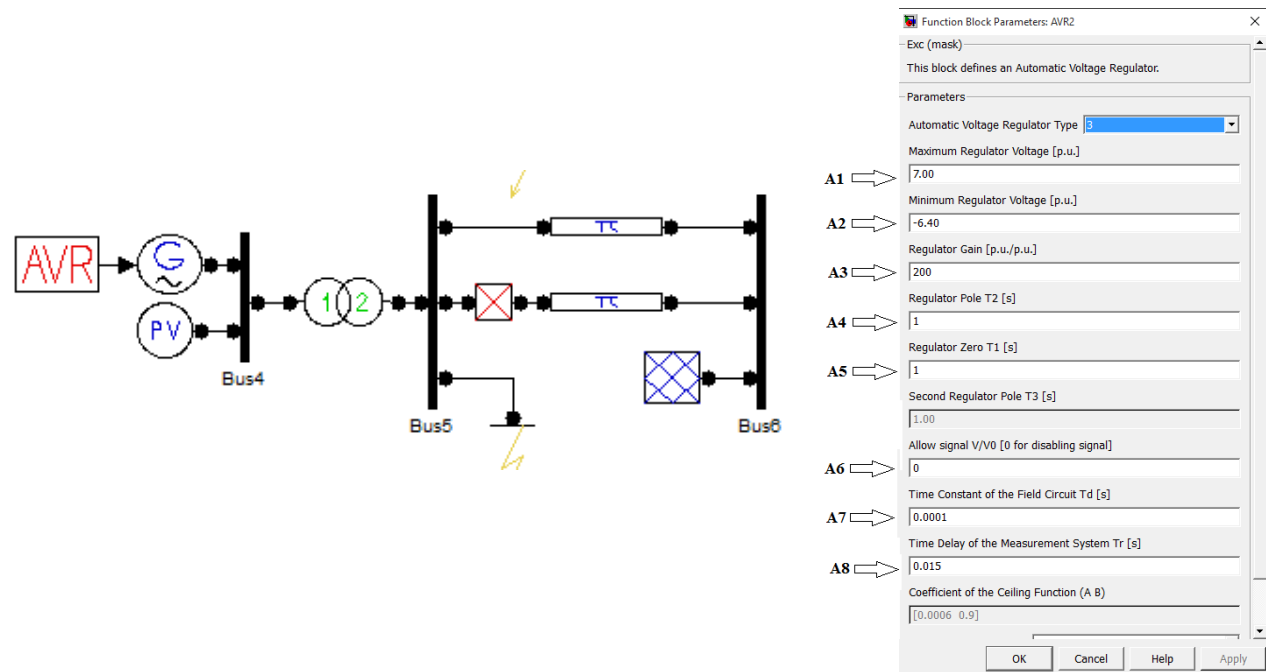


Figura 59. SEP con AVR

Se grafican los valores propios del sistema (figura 59) y se observa un punto rojo, el cual causará la inestabilidad del sistema. Además de lo anterior aparecen una mayor cantidad de valores propios, los cuales son muchos más negativos que los anteriores:

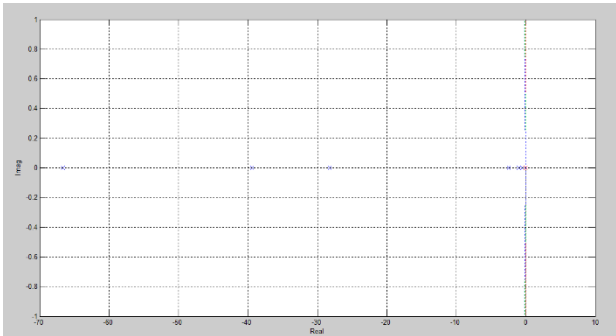


Figura 60. Gráfica de los valores propios del SEP con AVR

Se realiza el mismo proceso que en la parte anterior para obtener la tabla de valores propios (tabla 13). Se obtuvo un valor propio positivo, el cual es el mismo valor propio del vortex del caso anterior. El otro valor propio se logró del vortex, dando un valor negativo (se estabilizo). Además, se puede observar que aparecen otros nuevos parámetros sobre la matriz de estabilidad (valores propios). Estos son parámetros asociados al AVR (son los valores 1, 8 y 9).

STATE MATRIX EIGENVALUES						
Eigvalue	Most Associated States	Real part	Imag. Part	Pseudo-Freq.	Frequency	
Eig As #1	vm_Exc_1	-66,66667	0	0	0	
Eig As #2	e2q_Syn_1	-39,43455	0	0	0	
Eig As #3	e2d_Syn_1	-28,22124	0	0	0	
Eig As #4	delta_Syn_1	0,00888	0	0	0	
Eig As #5	omega_Syn_1	-0,00889	0	0	0	

Eig As #6	e1q_Syn_1	-	0	0	0
		0,46202			
Eig As #7	e1d_Syn_1	-	0	0	0
		2,41705			
Eig As #8	vr3_Exc_1	-1	0	0	0
Eig As #9	vf_Exc_1	-10000	0	0	0

Tabla 18. Valores propios del SEP con AVR

También se realiza la simulación de la tensión para observar el comportamiento, el cual sigue perdiendo la estabilidad como se puede ver en la figura 61:

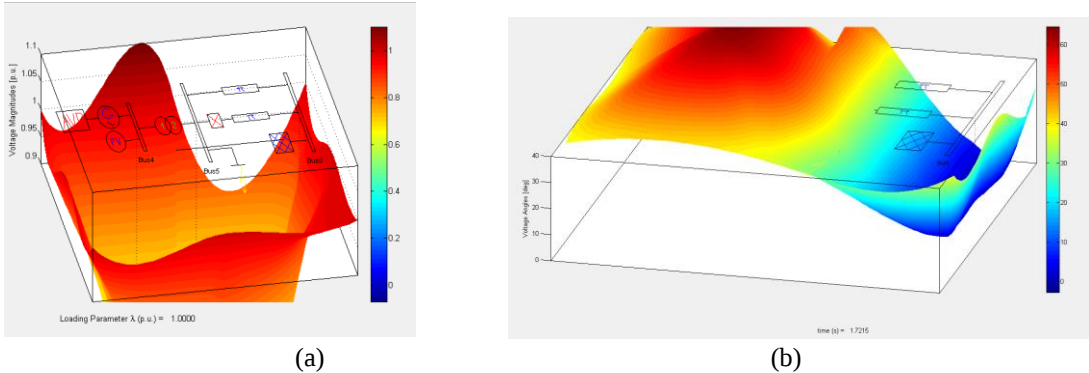


Figura 61. Simulación de tensión (a) y ángulo de tensión (b) del SEP con AVR

Los valores de participación indican qué efecto tienen los valores propios de AVR sobre el valor de inestabilidad Delta (δ). Los valores propios que se tiene no presentan incidencia sobre esta variable imposibilitando la compensación, como se puede ver en la tabla 19

PARTICIPATION FACTORS (Euclidean norm)					
	delta_Syn_1	omega_Syn_1	e1q_Syn_1	e1d_Syn_1	e2q_Syn_1
Eig As #1	0	0	0	0	0
Eig As #2	1,0896E-10	1,0896E-10	0,01052564	2,0124E-06	0,98942837
Eig As #3	1,4623E-12	1,4623E-12	6,8303E-07	0,0494798	3,814E-05
Eig As #4	0,49995111	0,49995111	9,7619E-05	6,3858E-09	1,5479E-07
Eig As #5	0,49994722	0,49994722	0,00010544	8,3306E-09	1,0916E-07
Eig As #6	3,815E-06	3,815E-06	0,98946158	3,7121E-06	0,0105269
Eig As #7	3,1563E-10	3,1563E-10	3,3885E-06	0,95051492	1,6193E-08
Eig As #8	0	0	0	0	0
Eig As #9	2,1523E-33	1,1293E-25	6,1692E-19	2,301E-32	2,8363E-24

Tabla 19. Valores de participación del SEP con AVR

Debido a que no se logró la estabilidad del sistema hay que agregar el PSS. Para ello, al igual que en el generador, hay que abrir los parámetros del AVR y agregar una entrada para poder conectar el PSS. Hay que recordar que el estabilizador regula el AVR.

Los parámetros que ingresan al PSS son lo de la tabla 20. Existen varios modelos de dispositivos, la opción que se va a trabajar es la omega [δ].

	P1	P2	P3
AVR	[0.2 -0.2]	[9.5 1.41]	[0.154 0.033 1 1]

Tabla 20. Parámetros del AVR

Cada uno de estos parámetros de compensación A (AVR) y P (PSS), tiene su influencia sobre la estabilidad del sistema, de acuerdo al modelo que se trabaje. En resumen como es un modelo lineal se puede expresar en diagrama de bloque (PSAT implementa Simulink). Una función de transferencia está relacionada con la entrada (de tensión) y la salida (ángulo de tensión, tensión, entre otras) del modelo. Cuando se implementan dispositivos de compensación se adicionan componentes a la función de transferencia, permitiendo que estos elementos interactúen con la salida. Los parámetros del AVR y PSS son elementos que permite mejorar la señal; entre más altos sean sus valores de compensación será más estable. Encontrar o dar unos valores óptimos que no sobredimensionen la compensación del sistema, implica la implementación de elementos de sintonización con técnicas heurísticas.

Se ingresan los valores y se conecta el PSS al AVR, como se puede observar en la figura 62, luego se guarda:

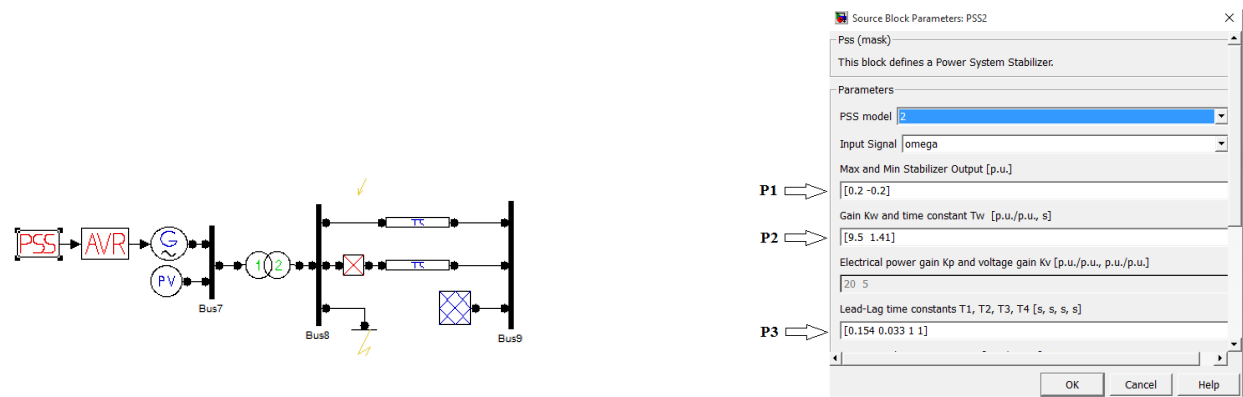


Figura 62. SEP con AVR+PSS

La gráfica de los valores propios (figura 63) muestra valores estables:

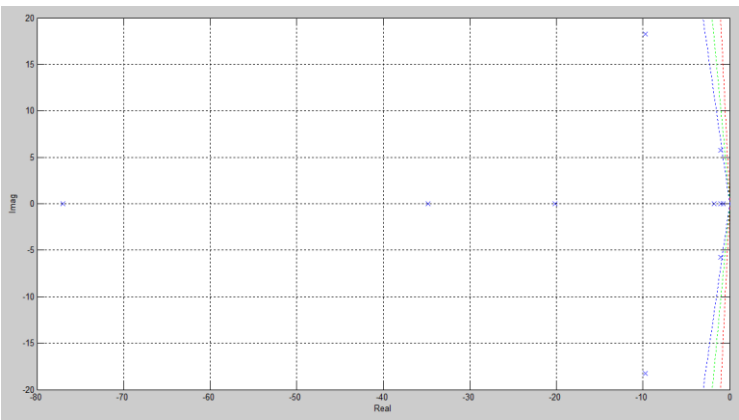


Figura 63. Gráfica de los valores propios del SEP con AVR+PSS

Al igual que en el caso de AVR, el PSS agrega nuevos valores propios al sistema, estos son 3, 9 y 12. Todos los valores muestran que el sistema es estable (parte real negativa), como aparece en la tabla 16:

STATE MATRIX EIGENVALUES			
Eigevalue	Most Associated States	Real part	Imag. Part
Eig As # 1	vf_Exc_1	-	0
Eig As # 2	vm_Exc_1	-76,99305	0
Eig As # 3	v2_Pss_1	-34,85624	0
Eig As # 4	e1q_Syn_1, e2q_Syn_1	-9,75106	18,28013

Eig As # 5	e1q_Syn_1, e2q_Syn_1	-9,75106	-
			18,28013
Eig As # 6	e2d_Syn_1	-20,15232	0
Eig As # 7	delta_Syn_1, omega_Syn_1	-0,99471	5,78464
Eig As # 8	delta_Syn_1, omega_Syn_1	-0,99471	-5,78464
Eig As # 9	v1_Pss_1	-0,74041	0
Eig As #10	e1d_Syn_1	-1,78847	0
Eig As #11	vr3_Exc_1	-1	0
Eig As #12	v3_Pss_1	-1	0

Tabla 21. Valores propios del SEP con AVR+PSS

Se realiza la simulación del sistema (figura 64). El sistema se comporta estable para cualquier instante de tiempo. Las variaciones en la tensión (magnitud y ángulo) son leves, garantizando la estabilidad del mismo.

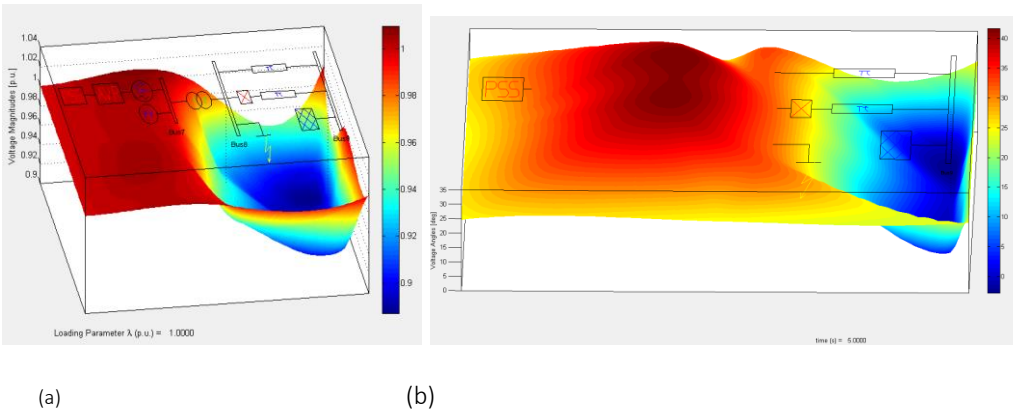


Figura 64. Simulación de tensión (a) y ángulo de tensión (b) del SEP con AVR+PSS

Por último se determina la matriz de participación, para comprender el efecto de que tienen todos los valores propios sobre el sistema, tabla 22:

PARTICIPATION FACTORS (Euclidean norm)					
	delta_Syn_1	omega_Syn_1	e1q_Syn_1	e1d_Syn_1	e2q_Syn_1
Eig As # 1	2,1457E-15	5,4057E-09	3,6854E-08	1,5003E-17	3,6987E-08
Eig As # 2	0,00014543	0,00348055	0,09844282	8,3198E-07	0,18528054
Eig As # 3	0,00420988	0,09685531	0,00441986	1,0106E-05	0,12792784
Eig As # 4	0,00635269	0,10686509	0,4036441	0,00017388	0,26012013
Eig As # 5	0,00635269	0,10686509	0,4036441	0,00017388	0,26012013
Eig As # 6	0,00330191	0,00199615	0,00098095	0,04366618	0,00125661
Eig As # 7	0,42781804	0,34431339	0,05318798	0,00723323	0,00881525
Eig As # 8	0,42781804	0,34431339	0,05318798	0,00723323	0,00881525
Eig As # 9	0,04117565	0,00056951	0,0017486	0,00234722	3,5968E-05
Eig As #10	0,00359342	0,00410868	0,00479519	0,93874288	0,00026767
Eig As #11	4,496E-17	2,1597E-17	1,9084E-16	1,4647E-17	1,9886E-16
Eig As #12	1,2302E-15	9,1248E-16	2,7635E-15	2,2325E-16	4,9651E-15

Tabla 22. Valores de participación del SEP con AVR+PSS

REPORTE Y GRÁFICAS

En la figura 65 se puede observar, de una forma más detallada, el comportamiento de las variables del sistema en PSAT. Para el caso de tener los valores de tensión, potencia, otras variables del sistema se puede observar dando clic en **ícono 4** de la ventana principal

e igualmente se puede generar un reporte en los formatos html, Excel, ascii y latex; para poder ver de una forma más cómoda y trabajar estos datos.

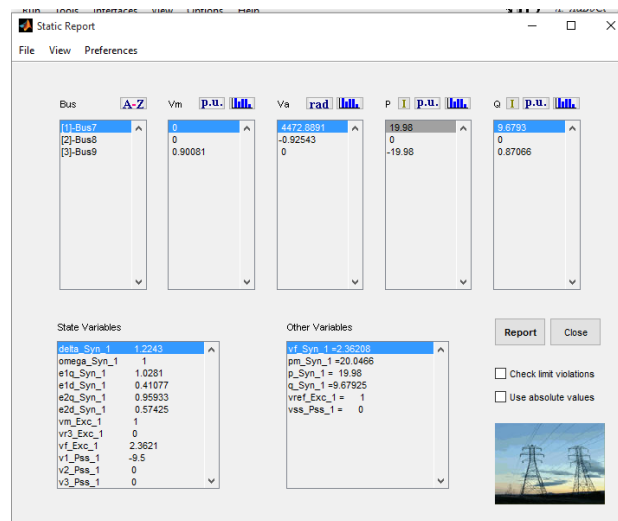


Figura 65. Ventana de reporte

El **ícono 6** de la ventana principal permitirá ver la gráfica de tensiones (ed y eq), delta (δ), omega (ω), tensiones nodales y sus ángulos, entre otras, además de graficarlas no sólo en el tiempo sino también contra cualquiera de estas variables. También se puede modificar el color, el tipo de gráfica, la forma de la función. Como se puede ver en la figura 66.

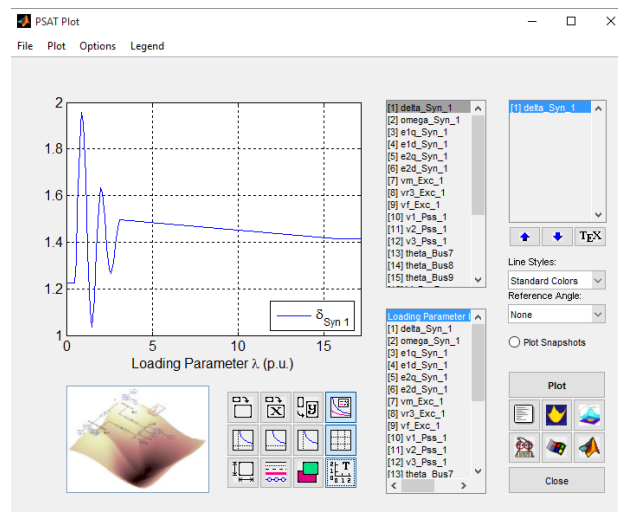


Figura 66. Ventana de gráficas

VII. ANÁLISIS DE RESULTADOS

El análisis de estabilidad de pequeñas señal requiere de software especializado debido a la gran cantidad de variables y planteamiento de las ecuaciones diferenciales que rigen al sistema. El caso de la guía 2, donde se plantearon 6 ecuaciones diferenciales, era un modelo simple. Un software como PSAT el cual implementa una mayor cantidad de ecuaciones diferenciales llegando a implementar 12, permite la obtención de resultados más completos para el estudio de estabilidad.

El manejo de estas herramientas requiere de un estudio previo para no confundir la información debido a la presencia de otras ecuaciones diferenciales a las vistas en la guía 2 y otras variables con otra terminología, como deslizamiento o ángulo de potencia, la cual es nombrada como delta, o velocidad angular de sincronización del rotor como omega. El software PSAT suministra la información de las definiciones de las variables que maneja.

El caso particular del vortex, cuando se analizó la estabilidad del sistema sin dispositivos de compensación, es un caso atípico el cual debe ser analizado mediante otro método, debido a que se encontraron valores propios sin partes reales y conjugados. Para este caso de estudio se implementó la opción de simulación en el tiempo de PSAT para observar que el sistema oscila hasta la pérdida total de la estabilidad.

Los AVR son dispositivos de compensación de tensión pero no siempre garantizan la estabilidad del mismo como se pudo observar. En este caso en particular se obtuvo un valor propio positivo bajo. Para el caso de PSS el sistema suministra los valores planteados en la anterior guía y se conservan los valores predeterminados del programa ya que este tiene parámetros adicionales al caso de estudio, por lo que se tendrá una mayor cantidad de valores propios.

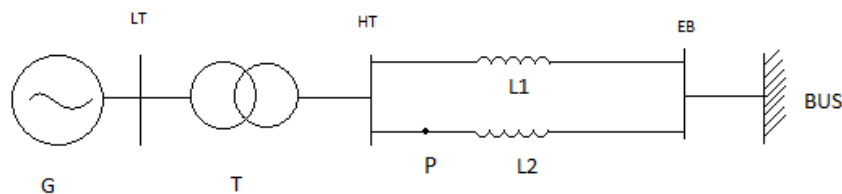
Se logró estabilizar el sistema de prueba con los parámetros del anterior ejemplo, a pesar de que este software posee un modelo de ecuaciones diferente al anteriormente propuesto en la guía 2. La visualización de los resultados de la simulación del comportamiento del sistema en el tiempo da un entendimiento más claro de la inestabilidad el sistema y la compensación que sufre el SMIB.

VIII.EJERCICIO

Si se tiene el sistema de potencia del ejemplo anterior se realizará una modificación en la tensión y potencia del sistema (hay que modificar todos los elementos del sistema), por los siguientes valores

$$P = 2220 \text{ MVA}$$

$$V = 24 \text{ kV}$$



Realizar el proceso de análisis de estabilidad y compensación del sistema.

CUESTIONARIO

1. De acuerdo a lo anterior, simular sin dispositivos de compensación y comparar con el ejemplo planteado. ¿Qué efecto tiene en la estabilidad el cambio de tensión y potencia?
2. ¿Se puede hacer compensación sólo con el AVR?, para ello varia los parámetros del AVR a su límite máximo de compensación.
3. ¿El PSS garantiza una estabilidad al sistema para cualquier perturbación?, ¿cuándo no lo puede hacer?
4. ¿Qué pasaría con el sistema si se reconectara la línea?, ¿se necesitaría compensación?
5. ¿Influye el tiempo de duración de la falla en la estabilidad y/o compensación?, ¿porque?

Nota: Se puede dirigir al libro Power System Stability and Control by Prabha Kundur, pg 732

IX.REFERENCIAS

Kundur, P. (1993). *Power System Stability and Control*. Toronto: McGraw-Hill.

Milado, F. (2008, junio 26). *PSAT manual*. Retrieved 08 19, 2016, from http://profs.basu.ac.ir/http://profs.basu.ac.ir/smr_tousi/free_space/psat-2.1.2-ref.pdf

Misael, G. D. (2012). *FLUJOS DE POTENCIA CON MATLAB*. Mendoza: universidad veracruzana.