



**UNIVERSIDAD DE LOS ANDES
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA**

**MODELADO DEL SISTEMA DE EXCITACIÓN DEL GENERADOR
SINCRÓNICO**

Br. Tazzo O. José L.

Mérida, Julio, 2009

**UNIVERSIDAD DE LOS ANDES
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE ELÉCTRICA**

**MODELADO DEL SISTEMA DE EXCITACIÓN DEL GENERADOR
SINCRÓNICO**

Trabajo presentado como requisito parcial para optar al título de
Ingeniero Electricista

Br. Tazzo O. José L.
Tutores: Prof. Juan Carlos Muñoz
Prof. Ernesto Mora

Mérida, Julio, 2009

UNIVERSIDAD DE LOS ANDES
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE ELÉCTRICA

MODELADO DEL SISTEMA DE EXCITACIÓN DEL GENERADOR SINCRÓNICO

Br. Tazzo O. José L.

Trabajo de Grado, en cumplimiento parcial de los requisitos exigidos para optar al título de Ingeniero Electricista, aprobado en nombre de la Universidad de Los Andes por el siguiente jurado.

Prof. Ernesto Mora
C.I.3.499.666

Prof. Juan Carlos Muñoz
C.I. 13.524.436

Prof. Lelis N. Ballester
C.I 13.098.939

DEDICATORIA

A mis Padres

AGRADECIMIENTOS

A Dios, por darme la fuerza para levantarme cada día, y llegar a cumplir esta y las metas que vendrán.

A mis Padres, sin su apoyo no sería quien soy, gracias.

A la ilustre Universidad de Los Andes por abrirme sus puertas y lograr culminar mi desarrollo profesional.

A mis profesores, por guiarme en este difícil camino, por su apoyo y paciencia gracias, en especial a los profesores Ernesto Mora, Juan Carlos Muñoz, Nelson Ballester, Jean Carlos Hernández, Francisco Vilorio, Oswaldo Cáceres y Jaime González, gracias.

A mi hermana, gracias por cuidar y acompañar a mis padres durante mis años de estudio, a ti brisa, muchas gracias.

A mi familia, a todos y cada uno de los integrantes de mi familia, gracias por su apoyo.

A mi novia, desde que te conocí has sido mi apoyo, me has dado la esperanza y la fuerza necesaria para culminar esta meta, a ti Daniela, muchas gracias.

A la familia González, años de amistad y apoyo me unen a ustedes, también a ustedes les debo parte de este camino.

A las Familias Cuevas, Calles y Paiva, en diferentes etapas de mi carrera me apoyaron, y todavía hoy me siguen apoyando, a ustedes gracias.

A mis amigos, no solo en la universidad viví mis años de estudio, a todos aquellos que me han brindado su amistad, gracias.

A mis compañeros, a ustedes, que compartieron conmigo alegrías y pesares, son demasiados para nombrarlos, gracias a ustedes he llegado a este punto; a los que me dejaron atrás, a los que me esperaron, gracias, y a los que quedan, los espero en el campo de trabajo, con el mismo cariño y apoyo de siempre, no me cansare de decirlo, a ustedes gracias.

A todos muchas gracias

Tazzo O. José L., **Modelado del Sistema de Excitación del Generador Sincrónico**, Universidad de Los Andes. Tutores: Prof. Juan Carlos Muños, Prof. Ernesto Mora. Junio, 2009.

RESUMEN

En el presente trabajo se desarrolla el modelado de los sistemas de excitación del generador sincrónico. En primer lugar se presenta la definición de cada uno de los elementos de dichos sistemas, presentando su modelo matemático y su función de transferencia, sentando las bases para definir el modelo completo de sistemas de excitación. Una vez expuesto lo anterior se analizan los modelos aceptados por el estándar IEEE 421 para el estudio de estabilidad de los sistemas de potencia, para lo cual se presentan sus diagrama de bloques y ecuaciones de estado, herramientas claves para los análisis posteriores en este trabajo.

Posteriormente se realiza el análisis dinámico de los modelos de los sistemas de excitación, en donde se sigue el planteamiento que hace el estándar IEEE 421.2 para dicho análisis. Aquí se establecen los criterios para definir los valores de los parámetros bajo las premisas de estabilidad de los sistemas de control. Después se desarrolla el análisis para la variación de cada uno de estos parámetros de forma individual, para así establecer el impacto que tienen sobre los índices de control. Con base en el análisis anterior se establece una metodología de sintonización efectiva de los parámetros, con base en el mejoramiento de la respuesta en los terminales del generador. Al finalizar este análisis, se hace una introducción de cuáles serían los métodos y procedimientos de la obtención o identificación de los parámetros antes mencionados.

Por último, se hace una definición de los requerimientos de los sistemas de excitación, desde el punto de vista de la máquina sincrónica y del sistema de potencia, luego se estudia el comportamiento de los distintos modelos de los sistemas de excitación dentro del sistema de potencia, aplicando la sintonización planteada al final de capítulo. En este estudio también se analiza el impacto que causa la incorporación de los estabilizadores del sistema de potencia (PSS) como elemento de control.

Descriptor: Modelado, Sistema de excitación, Análisis dinámico, Control del sistema de potencia.

ÍNDICE GENERAL

APROBACIÓN	ii
DEDICATORIA.....	iii
AGRADECIMIENTOS.....	iv
RESUMEN	v
ÍNDICE GENERAL.....	vi
INTRODUCCIÓN.....	1
CAPÍTULO.....	pp
I SISTEMAS DE EXCITACIÓN DEL GENERADOR SINCRÓNICO, DEFINICIÓN, CLASIFICACIÓN Y MODELADO	3
1.1 SISTEMA DE EXCITACIÓN DEL GENERADOR SINCRÓNICO	3
1.2 SISTEMA EN POR UNIDAD NO RECÍPROCO	5
1.3 DEFINICIÓN Y MODELADO DE LOS ELEMENTOS DEL SISTEMA DE EXCITACIÓN.....	9
1.3.1 Excitador.....	10
1.3.2 Regulador	19
1.3.3 Transductor de voltaje en terminales y compensador	22
1.3.4 Circuitos limitadores y de protecciones	24
1.3.5 Estabilizador del sistema de potencia (PSS)	27
1.4 CLASIFICACIÓN Y MODELADO DE LOS DISTINTOS SISTEMAS DE EXCITACIÓN.....	29
1.4.1 Sistemas de excitación de corriente continua DC	29
1.4.2 Sistemas de excitación de corriente alterna AC	33
1.4.3 Sistemas de excitación estáticos ST	39
II ANÁLISIS DINÁMICO DE LOS MODELOS DE LOS SISTEMAS DE EXCITACIÓN DEL GENERADOR SINCRÓNICO.	45
2.1 ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO DINÁMICO DE LOS SISTEMAS DE EXCITACIÓN.....	45
2.2 CARACTERIZACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DE LOS SISTEMAS DE EXCITACIÓN ANTE SEÑALES GRANDES.....	47
2.3 CARACTERIZACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DE LOS SISTEMAS DE EXCITACIÓN ANTE SEÑALES PEQUEÑAS.....	48
2.3.1 Índices temporales	49
2.3.2 Índices de la respuesta en frecuencia.....	50
2.4 PRUEBAS DINÁMICAS A LOS MODELOS DE LOS SISTEMAS DE EXCITACIÓN DEL GENERADOR SINCRÓNICO.....	53
2.4.1 Estudio dinámico a los modelos de los modelos de sistemas de excitación.....	54
2.5 INTRODUCCIÓN A LA OBTENCIÓN DE LOS PARÁMETROS DE LOS SISTEMAS DE EXCITACIÓN	78

III MODELADO DE LOS SISTEMAS DE EXCITACIÓN DEL GENERADOR SINCRÓNICO CONECTADO AL SISTEMA DE POTENCIA UTILIZANDO PSAT Y NEPLAN®	79
3.1 REQUERIMIENTOS DE LOS SISTEMAS DE EXCITACIÓN DEL GENERADOR SINCRÓNICO.....	79
3.1.1 Requerimientos de la máquina síncrona.....	80
3.1.2 Requerimientos del sistema de potencia.....	81
3.2 NOCIONES FUNDAMENTALES DE PSAT.....	82
3.3 NOCIONES FUNDAMENTALES DE NEPLAN®.....	84
3.4 SIMULACIONES DE LOS SISTEMAS DE EXCITACIÓN DEL GENERADOR SINCRÓNICO CONECTADOS CON EL SISTEMA DE POTENCIA.	85
3.4.1 Primera simulación. Generador conectado a una barra infinita a través de una línea	85
3.4.2 Segunda simulación: sistema de potencia simple de áreas interconectadas.....	96
3.4.3 Tercera simulación. Efecto que introduce el estabilizador de sistemas de potencia (PSS).	114
3.4.4 Cuarta simulación. Impacto de la utilización de los PSS sobre el sistema de potencia simple de áreas interconectadas	116
3.4.5 Quinta simulación. Red de 9 barras y 3 generadores síncronos.	120
CONCLUSIONES.....	125
REFERENCIAS	129
ANEXOS	131

LISTA FIGURAS

FIGURA	PP
1.1. Proceso de generación en una planta hidroeléctrica	4
1.2. Diagrama de control de la máquina síncrona (planta hidráulica)	4
1.3 Característica de la máquina síncrona a circuito abierto.....	7
1.4 Conversión del sistema en por unidad e interface entre el sistema de excitación y el circuito de campo de la máquina síncrona	8
1.5. Diagrama de bloques funcional general del sistema de control de excitación del generador síncrono.....	10
1.6. Diagrama del Excitador independiente (a). Curva de carga y saturación de excitación (b).	11
1.7. Modelo del excitador DC	14
1.8. Diagrama de bloques simplificado excitador DC	15
1.9. Excitador DC autoexcitado.....	15
1.10. Circuito equivalente por fase de la máquina síncrona	16
1.11. Modelo del excitador AC	16
1.12. Característica de saturación del excitador AC	17
1.13. Modelo del regulador de rectificación	18
1.14. Modelo del amplificador del sistema de excitación.....	19
1.15. Transformador estabilizador del sistema de excitación	21
1.16. Modelo del estabilizador del sistema de excitación.....	21
1.17. Modelo del transductor de voltaje terminal y compensador de carga	22
1.18. Adición del compensador de carga al lazo del AVR (Vanfretti, 2007)	23
1.19. Bloques característicos de funciones compuerta, valor bajo (LV) y valor alto (HV)	26
1.20. Aplicación del PSS al sistema de excitación (Vanfretti, 2007)	27
1.21. Elementos principales de un PSS	28
1.22. Diagrama de bloques del PSS1A (IEEE Std. 421.5, 2005)	29
1.23. Sistemas de excitación DC típico. (Vanfretti, 2007)	30
1.24. Tipo DC1A, excitador DC con conmutador (IEEE, Std. 421.5, 2005).....	31
1.25. Tipo DC2A, excitador DC con conmutador y con regulador bus-fed (IEEE Std. 421.5, 2005)	32
1.26. Sistema de excitación AC estacionario controlado por medio de rectificadores. (Vanfretti, 2007)	33
1.27. Sistema de excitación AC alimentado por rectificadores controlados (Vanfretti, 2007).....	34
Figura 1.28. Sistema de excitación AC con rectificadores rotativos (Vanfretti, 2007)	35
1.29. Modelo AC1A, sistema de excitación AC alternador-rectificador con rectificadores no controlados (IEEE Std. 421.5, 2005).....	36
1.30. Sistema de excitación alternador-rectificador con rectificador no controlado y realimentación de corriente de campo del excitador. (IEEE Std. 421.5, 2005).	37
1.31. Sistema de excitación ST de fuente de potencial y rectificadores controlados (Vanfretti, 2007).....	40
1.32. Sistema de excitación ST de fuente compuesta (Vanfretti, 2007)	41
1.33. Modelo ST1A, excitador con fuente de potencia y rectificador controlado (IEEE Std 421.5, 2005)	42
1.34. Modelo ST2A, excitador con fuente compuesta rectificadora (IEEE Std. 421.5, 2005).....	44
2.1. Sistema de excitación representado en la forma clásica de estudio de control	46
2.2. Respuesta nominal del sistema de excitación	48
2.3. Respuesta típica de un sistema de control ante una entrada escalón	49
2.4. Respuesta de frecuencia típica a lazo abierto de los sistemas de excitación con el generador en vacío.....	50
2.5. Respuesta típica de frecuencia de los sistemas de excitación en lazo cerrado, para el generador en vacío.....	51
2.6. Ubicación típica de los polos y ceros de los sistemas de excitación en lazo abierto con la máquina trabajando en vacío.....	52
2.7. Sistema para el estudio dinámico a lazo abierto y lazo cerrado.....	55
2.8. Diagrama de bloques para el análisis dinámico del sistema de excitación DC1A.....	55
2.9. Modelo lineal simplificado de la máquina síncrona	56
2.10. Lugar de las raíces del modelo de sistema de excitación conectado al modelo de la máquina síncrona, en lazo abierto.....	60
2.11. Diagrama de Bode del sistema a lazo abierto, para variaciones de Tc.	61

2.12. Variación de G_m vs T_c	61
2.13. Variación de M_f vs T_c	62
2.14. Variación de W_c vs T_c	62
2.15. Diagrama de Bode del sistema a lazo cerrado, para variaciones de T_c	63
2.16. Variación de M_p vs T_c	63
2.17. Variación de ω_b vs T_c	64
2.18. Variación de S_d vs T_c	65
2.19. Variación de T_s vs T_c	65
2.20. Variación de T_r vs T_c	65
2.21. Respuesta en tiempo del sistema para diferentes valores de T_c	66
3.1. Curvas en V de la máquina sincrónica.....	80
3.2. Curva de capacidad reactiva (diagrama circular) de la máquina sincrónica.....	81
3.3. AVR tipo I de PSAT.....	83
3.4. AVR tipo II PSAT.....	84
3.5. AVR tipo III PSAT.....	84
3.6. PSS tipo II PSAT.....	84
3.7. Generador conectado a una barra infinita.....	86
3.8. Comportamiento de la tensión de campo V_f con y sin control.....	87
3.9. Comportamiento de la tensión en los terminales (V_t) del generador con y sin control.....	87
3.10. Comportamiento del ángulo del rotor (δ) de la máquina con y sin control.....	88
3.11. Circuito equivalente de la máquina sincrónica.....	89
3.12. Diagrama fasorial para las condiciones iniciales.....	90
3.13. Diagrama fasorial ya con los parámetros constantes indicados.....	90
3.14. Diagrama fasorial antes y después de la variación en la excitación.....	90
3.15. Variación del comportamiento de la V_f en función de K_a	91
3.16. Variación del voltaje en terminales V_t en función de K_a	92
3.17. Variación del comportamiento de la V_f en función de T_a	92
3.18. Variación del voltaje en terminales V_t en función de T_a	93
3.19. Variación del comportamiento de la V_f en función de K_f	94
3.20. Variación del voltaje en terminales V_t en función de K_f	94
3.21. Variación del comportamiento de la V_f en función de T_f	95
3.22. Variación del voltaje en terminales V_t en función de T_f	95
3.23. Variación del comportamiento de la V_f en función de T_e	96
3.24. Variación del comportamiento de la V_t en función de T_e	96
3.25. Sistema de potencia simple de 2 áreas interconectadas.....	98
3.26. Comportamiento de la tensión de campo V_f ante la perturbación (generadores 1 y 2).....	99
3.27. Comportamiento de la tensión de campo V_f ante la perturbación (generadores 3 y 4).....	99
3.28. Tensión en terminales V_t de los generadores 1 y 2.....	100
3.29. Tensión en los terminales de los generadores 3 y 4.....	100
3.30. Variación del ángulo del rotor de los generadores 1, 2 y 4 ante la perturbación.....	100
3.31. Comportamiento de la tensión en terminales de los generadores 1 y 2 después del ajuste de los parámetros.....	101
3.32. Comportamiento de la tensión en terminales de los generadores 3 y 4 después del ajuste de los parámetros.....	102
3.33. Comportamiento de la tensión de excitación V_f para valores fuera de los límites de V_{RMAX} y V_{RMIN}	102
3.34. Comportamiento de la tensión en terminales del generador V_t para valores fuera de los límites de V_{RMAX} y V_{RMIN}	102
3.35. Comportamiento del ángulo del rotor del generador para valores fuera de los límites de V_{RMAX} y V_{RMIN}	103
3.36. Comportamiento de la tensión de campo V_f ante la perturbación (generadores 1 y 2).....	103
3.37. Comportamiento de la tensión de campo V_f ante la perturbación (generadores 3 y 4).....	104
3.38. Tensión en terminales V_t de los generadores 1 y 2.....	104
3.39. Tensión en terminales V_t de los generadores 1 y 2.....	105
3.40. Variación del ángulo del rotor de los generadores 1, 2 y 4 ante la perturbación.....	105
3.41. Comportamiento de la tensión de campo V_f ante la perturbación (generadores 1 y 2).....	106
3.42. Comportamiento de la tensión de campo V_f ante la perturbación (generadores 3 y 4).....	106
3.43. Tensión en terminales V_t de los generadores 1 y 2.....	106

3.44. Tensión en terminales V_t de los generadores 3 y 4.	107
3.45. Variación del ángulo del rotor de los generadores 1, 2 y 4 ante la perturbación	107
3.46. Comportamiento de la tensión de campo V_f ante la perturbación (generadores 1 y 2).	108
3.47. Comportamiento de la tensión de campo V_f ante la perturbación (generadores 3 y 4).	108
3.48. Tensión en terminales V_t de los generadores 1 y 2	108
3.49. Tensión en terminales V_t de los generadores 3 y 4	109
3.50. Variación del ángulo del rotor de los generadores 1, 2 y 4 ante la perturbación	109
3.51. Comportamiento de la tensión de campo V_f ante la perturbación (generadores 1 y 2).	110
3.52. Comportamiento de la tensión de campo V_f ante la perturbación (generadores 3 y 4).	110
3.53. Tensión en terminales V_t de los generadores 1 y 2	111
3.54. Tensión en terminales V_t de los generadores 3 y 4	111
3.55. Variación del ángulo del rotor de los generadores 1, 2 y 4 ante la perturbación	112
3.56. Comportamiento de la tensión de campo V_f ante la perturbación (generadores 1 y 2).	113
3.57. Comportamiento de la tensión de campo V_f ante la perturbación (generadores 3 y 4).	113
3.58. Tensión en terminales V_t de los generadores 1 y 3	113
3.59. Tensión en terminales V_t de los generadores 2 y 3	114
3.60. Variación del ángulo del rotor de los generadores 1, 2 y 4 ante la perturbación	114
3.61. Diagrama unifilar del ejemplo planteado para la tercera simulación.....	115
3.62. Comportamiento de la tensión de campo V_f ante la perturbación.	115
3.63. Comportamiento de la tensión en terminales V_t ante la perturbación.	115
3.64. Comportamiento del ángulo del rotor de la maquina sincrónica ante la perturbación.....	116
3.65. Tensión en terminales V_t de los generadores 1 y 2	118
3.66. Tensión en terminales V_t de los generadores 3 y 4	118
3.67. Variación del ángulo del rotor de los generadores 1, 2 y 4 ante la perturbación	119
3.68. Tensión en terminales V_t de los generadores 1 y 2	119
3.69. Tensión en terminales V_t de los generadores 3 y 4	119
3.70. Variación del ángulo del rotor de los generadores 1, 2 y 4 ante la perturbación	120
3.71. Sistema de potencia de 9 barras y 3 generadores.....	122
3.72. Tensión en terminales V_t de los generadores 1, 2 y 3, sin PSS	123
3.73 Tensión en terminales V_t de los generadores 1, 2 y 3 con PSS	123
3.74. Variación del ángulo del rotor de los generadores 1 y 2 ante la perturbación, con y sin PSS.	124

LISTA DE TABLAS

TABLA	pp
1.1. Referencias para establecer los controles windup y non-windup	25
2.1. Valores recomendados por estándar para los parámetros de los sistemas de excitación en estudio	59
2.2. Tabla resumen del análisis dinámico	66
2.3. Comportamiento de los índices de control con aumentos de los parámetros del modelo de excitación DC1A	67
2.4. Tabla resumen del análisis dinámico al modelo DC1A de los sistemas de excitación ... ¡Error! Marcador no definido.	
2.5. Comportamiento de los índices de control con aumentos de los parámetros del modelo de excitación DC2A (AC1A)	69
2.6. Tabla resumen del análisis dinámico al modelo DC2A (AC1A) de los sistemas de excitación ¡Error! Marcador no definido.	
2.7. Comportamiento de los índices de control con aumentos de los parámetros del modelo de excitación AC2A.	71
2.8. Tabla resumen del análisis dinámico al modelo AC2A de los sistemas de excitación ¡Error! Marcador no definido.	
2.9. Comportamiento de los índices de control con aumentos de los parámetros del modelo de excitación ST1A.	73
2.10. Tabla resumen del análisis dinámico al modelo ST2A de los sistemas de excitación	73
2.11. Tabla resumen del análisis dinámico al modelo ST1A de los sistemas de excitación ... ¡Error! Marcador no definido.	
2.12. Tabla resumen del análisis dinámico al modelo ST2A de los sistemas de excitación ... ¡Error! Marcador no definido.	
2.13. Impacto del aumento de los parámetros sobre los distintos modelos de sistemas de excitación. ¡Error! Marcador no definido.	
3.1. Datos del generador	86
3.2. Datos del sistema de excitación	86
3.3. Datos de los generadores de la segunda simulación	97
3.4. Datos de líneas de la segunda simulación	97
3.5. Datos de transformadores y cargas de la segunda simulación	97
3.6. Valores de los parámetros del PSS de acuerdo al modelo de excitación	117
3.7. Datos de los generadores de la quinta simulación	120
3.8. Valores de líneas de la quinta simulación	121
3.9. Datos de los transformadores de la quinta simulación	121
3.10. Datos de los AVR y del PSS de la quinta simulación	121

INTRODUCCIÓN

El objetivo fundamental del sistema de excitación o sistema de control de excitación es realizar el ajuste automático de la corriente de campo del generador sincrónico de modo que se mantenga el voltaje en sus terminales, de acuerdo a los valores especificados de consigna (generalmente lo más constante posible).

Desde el punto de vista de su funcionamiento, el sistema de control de excitación debe ser capaz de responder a perturbaciones, tanto transitorias como estacionarias, sin alterar la operación normal del generador. Asimismo, los sistemas de potencia requieren que el sistema de excitación contribuya a un control efectivo de voltaje, y por ello estos sistemas son ampliamente usados para mejorar la estabilidad del sistema de potencia. Debido a esto, el modelado matemático de los sistemas de excitación tiene una importancia relevante para los estudios de estabilidad en los sistemas de potencia, ya que a través de la información que arrojan las distintas simulaciones de estos modelos operando dentro de un sistema de potencia, se puede analizar y predecir el comportamiento de los sistemas de excitación antes las perturbaciones antes mencionadas, definiendo así su impacto en la estabilidad del sistema en estudio.

Por esta razón se el presente trabajo plantea como objetivo principal el modelado de los sistemas de excitación del generador sincrónico, para lo cual se realiza, bajo la metodología de investigación documental, un estudio detallado de los distintos componentes que conforman los diferentes tipos de sistemas de excitación, logrando así el entendimiento necesario que permita el estudio y construcción de los modelos matemáticos de dichos sistemas, los cuales se muestran tanto en el dominio del tiempo, como en el dominio S , con lo cual se trabaja para obtener los diagramas de bloques junto con sus respectivas funciones de transferencia.

Una vez obtenidos los modelos de los sistemas de excitación en sus diferentes formas, se realiza un análisis dinámico de dichos sistemas, para lo cual se trabaja siguiendo los distintos procedimientos definidos en el estándar IEEE 421 para este tipo de estudios. En este aspecto

se hace una primera utilización de software MATLAB®, creando una rutina que permite modificar el valor de los parámetros de los sistemas de excitación, optimizando así este análisis.

Por último se expone el impacto de los distintos tipos de sistemas de excitación sobre los sistemas de potencia; análisis que se realizan trabajando sobre sistemas de potencia típicos para el estudio de la estabilidad de los mismos. En este análisis se hace uso nuevamente del software MATLAB®, a través de un toolbox concebido para el estudio de los sistemas de potencia como lo es el PSAT. También se trabaja con el software NEPLAN®, a través del cual se desarrollan simulaciones que permiten definir el comportamiento de los distintos sistemas de excitación trabajando en un sistema de potencia interconectado.

El presente trabajo ha sido estructurado de la siguiente manera, un primer capítulo, en donde se desarrolla todo el análisis teórico de los modelos de los sistemas de excitación; un segundo capítulo en el cual se plantea y elabora el análisis dinámico a los modelos antes mencionados. Y un tercer capítulo que tiene como finalidad analizar el comportamiento de los sistemas de excitación conectados al sistema de potencia, estudiando el impacto que tienen estos sistemas sobre la red de potencia.

CAPÍTULO I

SISTEMAS DE EXCITACIÓN DEL GENERADOR SINCRÓNICO, DEFINICIÓN, CLASIFICACIÓN Y MODELADO

En este capítulo se definen los sistemas de excitación, así como cada uno de los elementos que conforman estos sistemas, también se analizan sus modelos matemáticos en el tiempo y en el dominio S , para así obtener las funciones de transferencia que permitan realizar un posterior análisis bajo las teorías de sistemas de control. Por último con base en el estándar IEEE 421.5, se definen los modelos completos de los sistemas de excitación, así como sus ecuaciones de estado.

1.1 SISTEMA DE EXCITACIÓN DEL GENERADOR SINCRÓNICO

Básicamente es conocido que para la producción de electricidad mediante el uso de turbinas hidroeléctricas se utiliza en general generadores sincrónicos. Los generadores sincrónicos transforman la energía cinética que se encuentra en los torrentes de agua los cuales golpean las turbinas produciendo el movimiento del eje de la máquina, convirtiéndola así en energía mecánica, la cual es transformada en energía eléctrica. El proceso en el cual es convertida la energía mecánica a energía eléctrica es de especial interés en este trabajo. Dicha conversión es llevada a cabo por una serie de sistemas de transferencia eléctrica, dentro de los cuales resalta el sistema de excitación del generador sincrónico. De manera resumida se puede describir el

proceso de generación de energía eléctrica en una central hidroeléctrica como:

“En un generador sincrónico se aplica un corriente DC al devanado del rotor, el cual produce un campo magnético, entonces el rotor del generador gira como consecuencia del impulso que otorga el torrente de agua, produciendo un campo magnético rotacional dentro de la maquina el cual induce un grupo trifásico de voltajes en los devanados del estator del generador”. (Chapman, 2000).

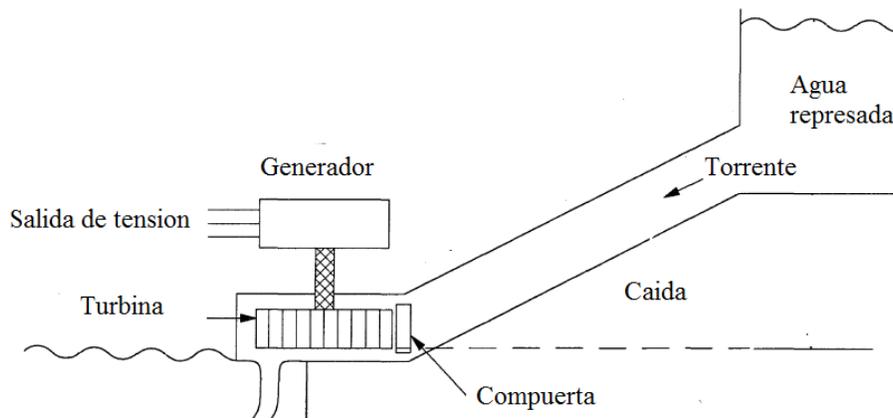


Figura 1.1. Proceso de generación en una planta hidroeléctrica

Ahora bien, el sistema de control de la máquina sincrónica cuenta con distintos elementos, cuyo trabajo en conjunto es mantener la máquina dentro de los límites de operación y mantener en sus terminales las premisas de estabilidad del sistema de potencia, como lo son frecuencia y tensión constante. El diagrama de bloques de la figura 1.2 muestra la estructura de todo el sistema de control de la máquina sincrónica.

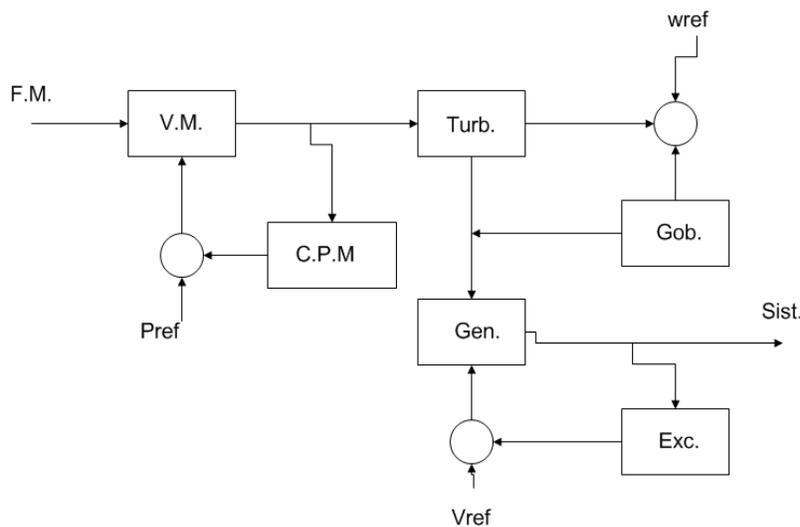


Figura.1.2. Diagrama de control de la máquina sincrónica (planta hidráulica)

En donde:

- F.M.: fluido motriz.
- V.M.: válvula mariposa
- C.P.M.: Control de potencia mecánica.
- Turb.: Turbina.
- Gob.: Gobernador.
- Gen. Generador.
- Exc.: Excitación.
- Sist.: Sistema de potencia.

De acuerdo a lo expuesto anteriormente, se puede decir que el sistema de excitación es el responsable de originar el campo que interactúa con el devanado estatórico, el cual, produce la tensión en los terminales del generador. Dicho esto, se define la función básica del sistema de excitación como la de proveer de corriente directa al devanado de campo de la máquina sincrónica. Además el sistema de excitación lleva a cabo funciones de control y protección esenciales para el funcionamiento satisfactorio del sistema de potencia. Entre las funciones están el control de voltaje y potencia reactiva, así como también el mejoramiento de la estabilidad del sistema. Las funciones de protección consisten en asegurar que los límites de capacidad de la máquina y el sistema de excitación no sean excedidos. A continuación se estudia el sistema en por unidad no recíproco, el cual es esencial para el modelado de los sistemas de excitación, posteriormente se define cada uno de los elementos que conforman dichos sistemas.

1.2 SISTEMA EN POR UNIDAD NO RECÍPROCO

Parecería obvio que el sistema en por unidad a usar para el voltaje y/o corriente de la salida del sistema de excitación sería el mismo utilizado para el circuito de campo de la máquina sincrónica, sin embargo, este sistema no se considera adecuado para expresar las cantidades de

salida del excitador, ya que los valores de funcionamiento en por unidad de la salida del excitador son muy pequeños en relación a los valores de funcionamiento del generador (alrededor de 0.001p.u.); por lo tanto, es necesario usar un nuevo sistema en por unidad, el cual es definido en todos los estudios de sistemas de potencia como sistema en por unidad no recíproco. Los diferentes modelos de los sistemas de excitación deben interconectarse con el modelo de la máquina sincrónica en los terminales de la corriente de campo con los terminales de la corriente de armadura. A continuación se desarrolla la relación que va a existir entre el voltaje/corriente de salida del excitador, expresado en el sistema en por unidad no recíproco, con la señal de voltaje y/o corriente de campo de la máquina expresado en el sistema en por unidad recíproco. (Kundur, 1994)

Se conoce que para una máquina sincrónica trabajando en vacío se tiene:

$$i_d = i_q = 0 \quad (1.1)$$

En donde:

- i_d : corriente del eje directo.
- i_q : corriente en el eje de cuadratura.

Tomando en cuenta la definición de las tensiones en los ejes directo y de cuadratura, y aplicando la condición anterior, se obtiene:

$$e_d = -\psi_q = -L_q i_q = 0 \quad (1.2)$$

$$e_q = \psi_d = L_{ad} * i_{fd} \quad (1.3)$$

En donde:

- e_d : tensión en el eje directo.
- e_q : tensión en el eje de cuadratura.
- ψ_q : flujo del eje de cuadratura.
- ψ_d : flujo del eje directo.
- L_q : inductancia del eje de cuadratura.
- L_{ad} : inductancia mutua del eje directo.

$$E_{fd} = \frac{L_{adu}}{R_{fd}} * e_{fd} \quad (1.8)$$

Se conoce que físicamente la salida de voltaje y/o corriente de excitación y el voltaje y/o corriente de campo del generador es la misma, estas sólo se diferencian por su valor en por unidad. La relación que rige la conversión entre ambos valores se muestra en la figura 1.4.

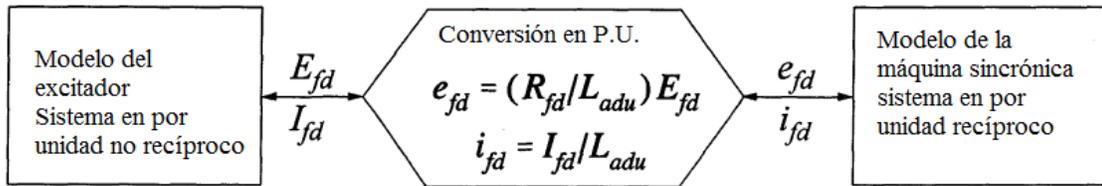


Figura 1.4 Conversión del sistema en por unidad e interface entre el sistema de excitación y el circuito de campo de la máquina síncrona

Se resalta el hecho que en estado estacionario $E_{fd}=I_{fd}$, mientras que en régimen transitorio I_{fd} viene dado por la dinámica del circuito de campo y E_{fd} lo define el sistema de excitación. Si se analiza la ecuación 1.8 en función de la variación de tensión de campo ΔE_{fd} , se tendrá:

$$\Delta \psi_d(s) = \frac{1 + sT_{kd}}{(1 + sT'_{d0})(1 + T''_{d0})} * \Delta E_{fd} \quad (1.9)$$

En donde:

$$\bar{G}(s) = \frac{1 + sT_{kd}}{(1 + sT'_{d0})(1 + sT''_{d0})} \quad (1.10)$$

Y como en estado estacionario $\bar{G}(s) = 1$, se tiene que:

$$\Delta \psi_d(s) = \frac{1}{1 + sT''_{d0}} * \Delta E_{fd} \quad (1.11)$$

Y además el generador está en circuito abierto, entonces $\Delta \psi_d = \Delta e_q = \Delta E_t$, de donde se obtiene que:

$$\frac{\Delta E_t(s)}{\Delta E_{fd}(s)} = \frac{1}{(1 + sT'_{d0})} \quad (1.12)$$

Ahora bien, el voltaje de excitación E_{fd} depende de la resistencia de campo (R_{fd}) de la máquina sincrónica, la cual depende de la temperatura del campo. Las temperaturas estándar para calcular la salida de voltaje del excitador para unidades hidráulicas es de 75°C. El valor de la resistencia de campo debe corresponder a la resistencia bajo condiciones de funcionamiento reales que son simuladas lo más exactas posibles, y el valor de T'_{d0} debe ser consistente con este valor de resistencia de campo. Una correcta resistencia de campo puede ser calculada mediante la siguiente ecuación:

$$R_s = R_t * \left(\frac{t_s + k}{t_t + k} \right) \quad (1.13)$$

En donde:

- t_s : temperatura específica de operación °C.
- t_t : temperatura correspondiente a valor conocido o medido de Resistencia de campo °C.
- R_s : valor de resistencia correspondiente a la temperatura t_s .
- R_t : valor de resistencia correspondiente a la temperatura t_t .

La constante característica k depende del material con el que esté hecho el campo.

1.3 DEFINICIÓN Y MODELADO DE LOS ELEMENTOS DEL SISTEMA DE EXCITACIÓN

En líneas generales, los sistemas de excitación poseen cinco elementos principales:

- Excitador.

- Regulador.
- Transductor de voltaje en terminales y compensador.
- Circuitos limitadores y de protección.
- Estabilizador del sistema de potencia.

1.3.1 Excitador

De acuerdo a la figura 1.5, el excitador por si solo es uno de los elementos que conforman el sistema de excitación de la máquina síncrona, sin embargo, en base a la naturaleza de este elemento se define los tipos de sistemas de excitación. Anteriormente se definió que la función básica del excitador es la de proveer tensión continua al rotor del generador, justamente la forma de crear esta tensión DC clasifica los tipos de sistemas de excitación, y en particular los tipo de excitadores que usan estos.

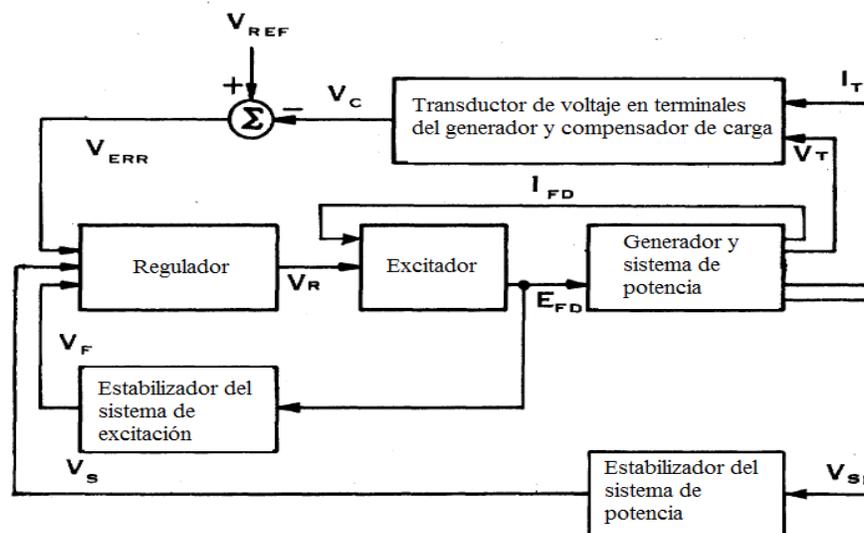


Figura 1.5. Diagrama de bloques funcional general del sistema de control de excitación del generador síncrono

Básicamente existen tres tipos de excitadores, los cuales a su vez, dependiendo de sus componentes, son divididos en grupos. A continuación se define cada uno de los diferentes

tipos de excitadores, seguidamente de su modelado. De acuerdo a la forma de generar la tensión DC, los excitadores pueden ser:

- Excitador de corriente directa (DC).
- Excitador de corriente alterna (AC).
- Excitador estático (ST).

Excitadores de corriente directa (DC): básicamente el excitador DC utiliza un generador de corriente directa como fuente de potencia para el sistema de excitación, este tipo de excitador puede ser de dos tipos, independiente y autoexcitado. En la figura 1.6(a) se muestra el excitador DC independiente. Aquí, la relación que hay entre E_{fd} de salida del excitador con la I_{fd} es no lineal, esto es consecuencia de la saturación magnética que existe en este tipo de excitación. La pendiente de la recta del entre hierro de la figura 1.6(b) posee una pendiente igual a R_g . De acuerdo al estándar IEEE 451.2, la saturación magnética es definida a través de un factor de saturación dado por el factor $S_e(E_x)$. A continuación se indica el desarrollo de para llegar a este factor. (Boldea, 2005).

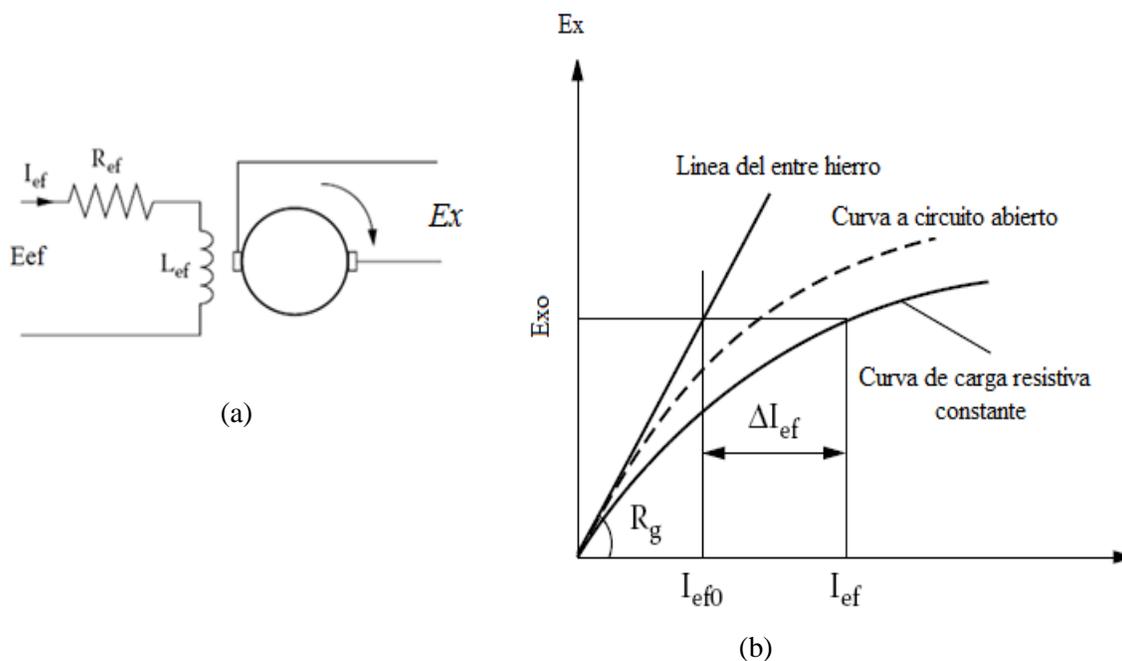


Figura 1.6. Diagrama del Excitador independiente (a). Curva de carga y saturación de excitación (b).

$$I_{ef} = \frac{E_x}{R_g} + \Delta I_{ef} \quad (1.14)$$

$$\Delta I_{ef} = E_x * S_e(E_x) \quad (1.15)$$

Donde E_x representa un punto de operación cualquiera. El factor de saturación se puede aproximar usando una función exponencial de la siguiente manera

$$S_e(E_x) = \frac{1}{R_g} e^{B_e E_x} \quad (1.16)$$

El voltaje en vacío del excitador DC E_x es proporcional al campo de excitación ψ . Se tiene entonces, para una velocidad constante

$$E_x = K_x * \psi = K_x * L_{ef} * I_{ef} \quad (1.17)$$

$$E_x = R_{ef} * I_{ef} + \frac{\partial \psi}{\partial t} = R_{ef} * I_{ef} + L_{ef} * \frac{\partial I_{ef}}{\partial t} \quad (1.18)$$

Si se trabaja con las ecuaciones 1.14 y 1.15, y sustituyendo en la ecuación 1.17, la ecuación 1.18 se convierte en

$$E_{ef} = \left(\frac{R_{ef}}{R_g} + R_{ef} S_e(E_x) \right) * E_x + \frac{1}{K_x} * \frac{\partial E_x}{\partial t} \quad (1.19)$$

La ecuación 1.19 es básicamente la función de transferencia de voltaje del excitador DC en vacío, considerando la saturación magnética. Para las variables en p.u. se usa la base de voltaje igual a la base del voltaje de campo E_{fd} del generador sincrónico

$$E_x = E_{fd} \quad (1.20)$$

$$I_{ef} = \frac{E_{fb}}{R_g}; R_{gb} = R_g \quad (1.21)$$

Por lo que, el factor de saturación se convierte en p.u en

$$S_e(E_x) = R_g * S_e(E_x) \quad (1.22)$$

Por último, la ecuación 1.19 en p.u. será

$$E_{ef} = \frac{R_{ef}}{R_g} * E_x (1 + S_e(E_x)) + \frac{1}{K_x} * \frac{\partial E_x}{\partial t} \quad (1.23)$$

De donde se toma el valor $1/K_x$, el cual tiene dimensión de constante de tiempo, se define entonces

$$\frac{1}{K_x} \approx \frac{L_{ef}}{R_g} * \frac{I_{efo}}{E_{xo}} = \frac{L_{uf}}{R_g} = T_E \quad (1.24)$$

En este caso, los valores de I_{efo} y E_{xo} en p.u. corresponden a un punto de operación en particular, finalmente, la ecuación 1.23 se convierte en

$$E_{ef} = E_x (K_E + S_E(E_x)) + T_E * \frac{\partial E_x}{\partial t} \quad (1.25)$$

Con

$$K_E = \frac{R_{ef}}{R_g} \quad (1.26)$$

$$S_E(E_x) = S_e(E_x) * \frac{R_{ef}}{R_g} \quad (1.27)$$

Entonces, la tensión de alimentación que se le inyecta al devanado del rotor del generador principal a través de un excitador DC vendrá dada por la ecuación 1.25. Partiendo de ésta se genera un equivalente en el dominio S, necesario para realizar un análisis de éste sistema desde el punto de vista de control. Aplicando transformada de Laplace se obtiene

$$E_{ef}(s) = E_x(s) * K_E + E_x(s) * S_E(E_x) + sT_E * E_x(s) \quad (1.28)$$

Sacando factor común $E_x(s)$, y aplicando la definición de función de transferencia, la ecuación 1.28 queda

$$\frac{E_x(s)}{E_{ef}(s)} = \frac{1}{K_E + S_E(E_x) + sT_E} \quad (1.29)$$

Manipulando esta expresión, y aplicando algebra de bloques, se obtiene el siguiente modelo (figura 1.7). Este modelo es altamente aceptado como modelo de excitación DC en diseños de AVR y estudios de estabilidad de sistemas eléctricos de potencia. Si se desea un análisis de pequeña señal, el diagrama anterior puede ser simplificado mediante el siguiente desarrollo

$$\Delta E_{ef} = \Delta e_{fd} * \frac{1 + sT}{K} \quad (1.30)$$

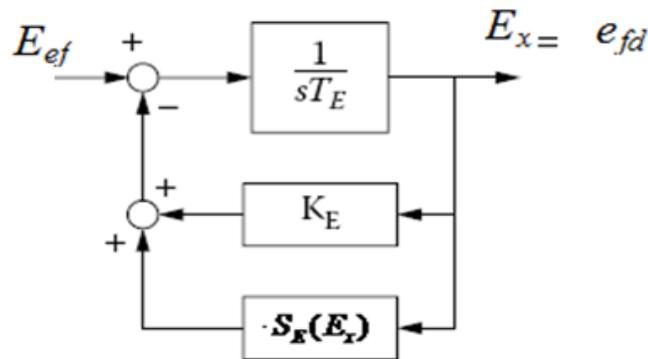


Figura 1.7. Modelo del excitador DC

$$K = \frac{1}{S_E(E_{x0}) + K_E}; T = K * T_E \quad (1.31)$$

Cuyo diagrama de bloques es mostrado en la figura 1.8

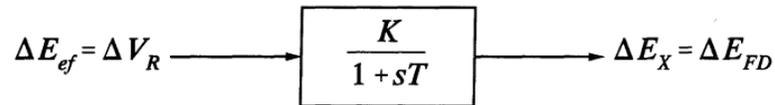


Figura 1.8. Diagrama de bloques simplificado excitador DC

El otro tipo de excitador DC son los que utilizan un generador de corriente continua autoexcitado, el mismo es mostrado en la figura 1.9

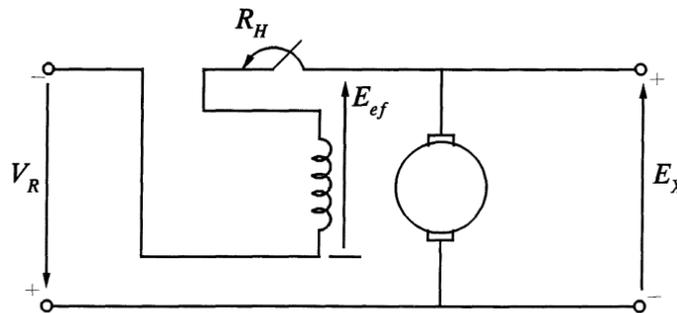


Figura 1.9. Excitador DC autoexcitado

El modelo de este excitador es similar, solo cambia en los valores de K_E . En plantas donde se encuentra este tipo de excitador los operadores ajustan el reóstato de campo del AVR constantemente de acuerdo al punto de operación, para lograr que la salida del mismo sea igual a cero. Esto se hace para poder equilibrar un valor de K_E (ecuación 1.32) capaz de lograr un valor de $V_R=0$. Por lo que K_E no se fija como en el caso de la excitación independiente, sino que este varía conjuntamente con el punto de operación.

$$K_E = \left(\frac{R_{ef}}{R_g}\right) - 1 \quad (1.32)$$

Donde R_{ef} representa la resistencia de campo del excitador, y R_g la pendiente de la recta del entre hierro en vacío.

Excitador de corriente alterna AC: el excitador AC es, básicamente, un generador sincrónico, su diagrama es similar al expuesto para el modelo del excitador DC, sin embargo en este caso la regulación bajo carga se atiende de forma distinta, debido a la reacción de armadura del

generador excitador. En la figura 1.10 se indica el circuito equivalente por fase del generador sincrónico. No existe una relación sencilla entre la tensión en los terminales del generador y su tensión de campo; en este aspecto, para una mejor comprensión del modelo del excitador AC, se recomienda revisar Anderson, 2003.

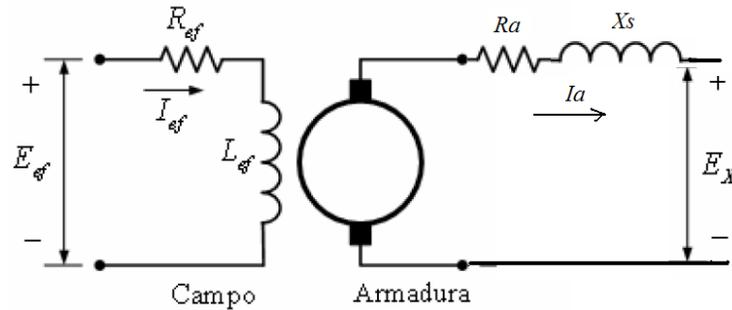


Figura 1.10. Circuito equivalente por fase de la máquina sincrónica

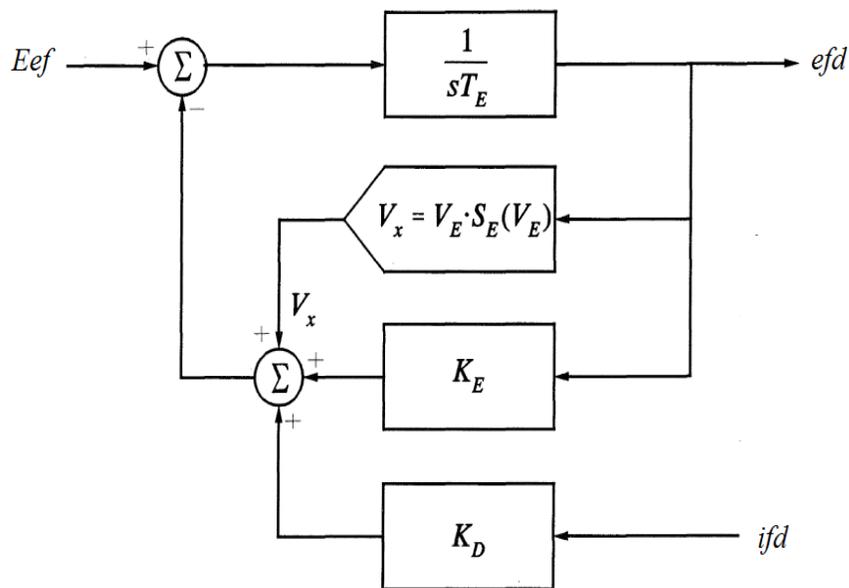


Figura 1.11. Modelo del excitador AC

En este excitador, la curva en vacío del generador excitador es usada para definir la razón de saturación S_E . El voltaje de excitación interna V_E es un voltaje tomado en vacío, y es obtenido a través de la razón de saturación. La corriente de campo I_{FD} del generador principal representa la corriente de carga del excitador, y la realimentación negativa $K_d \cdot I_{FD}$ es consecuencia del efecto desmagnetizante originado por la reacción de armadura. La constante K_d depende del generador excitador y de sus reactancias transitorias. La razón de saturación

puede ser calculada en base a la curva de saturación en vacío, y la línea del entrehierro, para un valor específico de V_E . En por unidad, la razón de saturación viene dada por. (Kundur, 1994).

$$S_E(E_x) = \frac{A-B}{B} \quad (1.33)$$

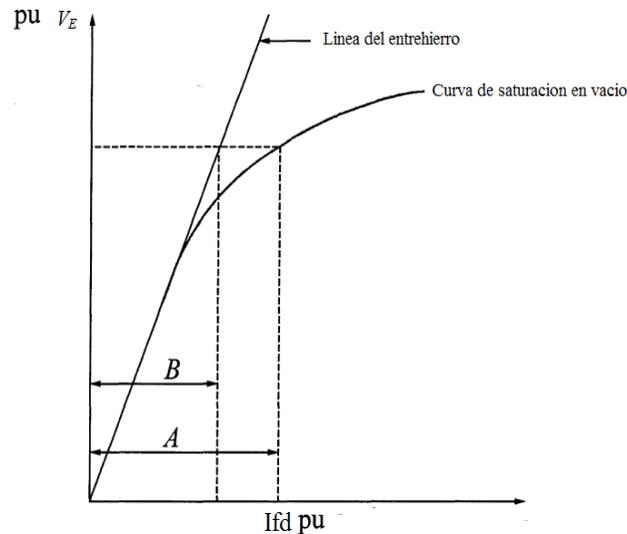


Figura 1.12. Característica de saturación del excitador AC

La razón de saturación viene dada por la expresión $V_x = V_E S_E(E_x)$, la cual representa una función de tipo exponencial

$$V_x = E_x S_E(E_x) = A_{EX} e^{B_{EX} E_x} \quad (1.34)$$

Se sabe que el rotor del generador sincrónico principal es alimentado por tensión DC, por lo que se hace necesario rectificar la salida del excitador AC. Para tal función son utilizados los rectificadores trifásicos de onda completa. Una de las características del excitador AC es el hecho de que la impedancia efectiva de la fuente AC vista desde el rectificador es predominantemente una reactancia inductiva. Esta reactancia, también definida como reactancia de conmutación, retrasa el proceso de conmutación, transfiriendo corriente entre las entradas de los rectificadores (compuertas). A su vez, esta también produce un incremento de tensión en el conmutador, y de la misma forma, del producto de la reactancia de conmutación

y la corriente de carga. La ecuación que define la regulación del rectificador en función de la caída de voltaje del conmutador, puede ser expresada de la siguiente manera:

$$E_{FD} = F_{EX} * V_E \quad (1.35)$$

Donde

$$F_{EX} = f(I_N) \quad (1.36)$$

$$I_N = \frac{K_c * I_{FD}}{V_E} \quad (1.37)$$

La constante K_C depende de la reactancia de conmutación. Las tres condiciones de operación de este excitador vienen definidas por la función $f(I_N)$ caracterizados por los tres modos de operación de los circuitos rectificadores, los cuales son:

Modo 1:	$f(I_N) = 1 - 0.577 I_N$	Si $I_N \leq 0.433$
Modo 2:	$f(I_N) = \sqrt{0.75 - I_N^2}$	Si $0.433 < I_N < 0.75$
Modo 3:	$f(I_N) = 1.732(1 - I_N)$	Si $0.75 \leq I_N \leq 1$

I_N no debe ser mayor de 1, y si por algún motivo lo es, F_{EX} debe ser fijado a cero (0). Los efectos de la regulación del rectificador indicados arriba pueden ser representados por el siguiente diagrama de bloques

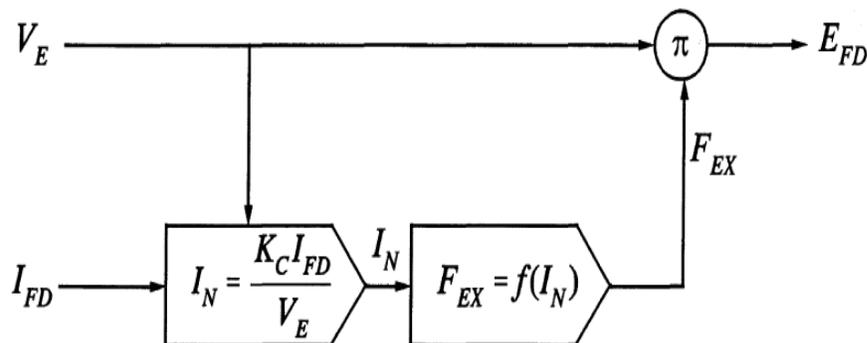


Figura 1.13. Modelo del regulador de rectificación

1.3.2 Regulador

El regulador procesa y amplifica las señales a un nivel y forma apropiada. Tiene las funciones de regulación y estabilización del sistema de excitación (razón de retroalimentación y compensación de adelanto-atraso).

Amplificador: los amplificadores en los sistemas de excitación puede ser de tres tipos, magnéticos, rotativos y electrónicos. Estos son caracterizados por una ganancia y una constante de tiempo. Este dispositivo es representado generalmente por el bloque de la figura 1.14. La salida del amplificador está limitada por la saturación del generador principal o por el sistema de potencia, de modo que no se excedan los límites de este último, estos límites son del tipo “no-windup”. (Kundur, 1994).

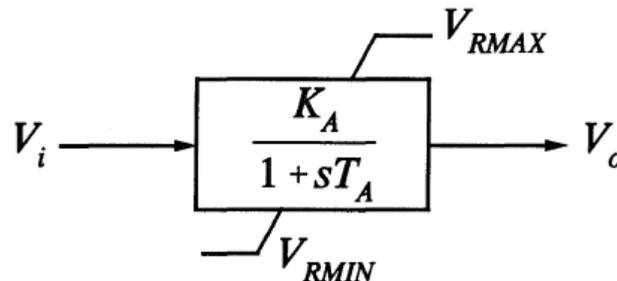


Figura 1.14. Modelo del amplificador del sistema de excitación

Donde:

- K_A : ganancia del regulador.
- T_A : Constante de tiempo del amplificador del regulador.
- V_{RMAX} : máximo valor de tensión de salida del regulador.
- V_{RMIN} : mínimo valor de tensión de salida del regulador.

Desde el punto de vista de control, este bloque representa un controlador PI real, el cual viene representado por la siguiente función de transferencia.

$$\frac{T_d}{1 + \gamma T_d} \quad (1.38)$$

Donde γ tendrá un valor alrededor de 0.1. En algunos reguladores también se encuentran bloques de adelanto o retardo de fase, según sea la relación entre sus constantes de tiempo, representados por la función de transferencia (Kuo, 1996).

$$G_c = \frac{1+T_c s}{1+T_b s} \quad (1.39)$$

Estabilizador: Provee una señal adicional de entrada al regulador para amortiguar las oscilaciones del sistema de potencia. Algunas señales comúnmente utilizadas son: la desviación de la velocidad del rotor, potencia de aceleración y la desviación de frecuencia. Generalmente los sistemas de excitación están compuestos por elementos con retardos de tiempos significativos que hacen que tengan un desempeño dinámico pobre. Esto es representativo en sistemas de excitación de tipo DC y AC; a no ser que se utilice una ganancia de estado estable muy baja en el AVR, el control de excitación es inestable cuando el generador opera en vacío. Por consiguiente, el sistema de excitación debe ser estabilizado por medio de la compensación en serie o retroalimentación, con el fin de mejorar el funcionamiento dinámico del sistema de control. (Kundur, 1994)

Existen muchas formas de montar físicamente la función de estabilización. Algunos sistemas de excitación usan transformadores en serie como los que se muestran en la figura 1.15. En este caso, se trabajará con este tipo de montaje en particular, y a continuación se muestra el análisis para obtener los valores del modelo que define a este elemento. La ecuación del transformador en notación de Laplace es

$$V_1 = R_1 * i_1 + sL_1 * i_1 + sM * i_2 \quad (1.40)$$

$$V_2 = R_2 * i_2 + sL_2 * i_2 + sM * i_1 \quad (1.41)$$

Donde

- R= resistencia

- L = inductancia propia
- M = inductancia mutua.

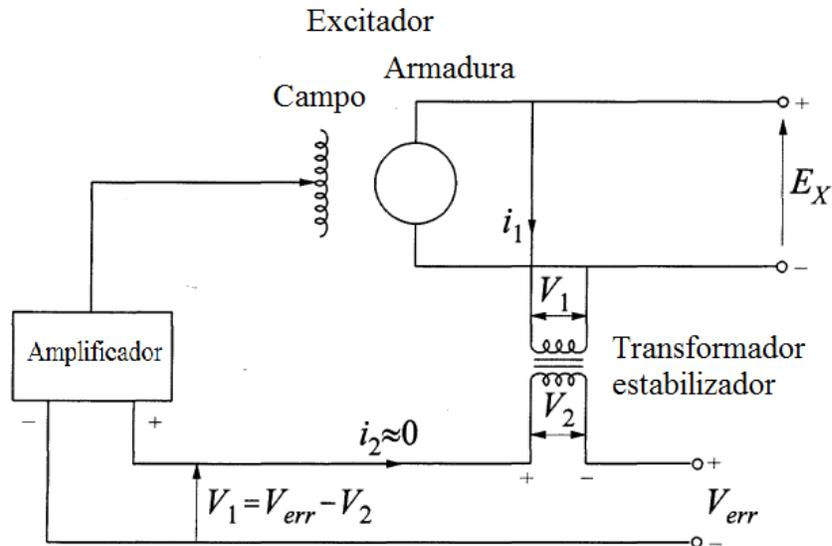


Figura 1.15. Transformador estabilizador del sistema de excitación

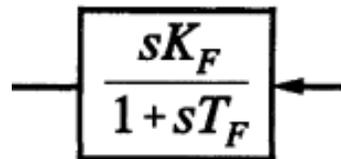


Figura 1.16. Modelo del estabilizador del sistema de excitación

Los ítems 1 y 2 definen al devanado primario y secundario respectivamente. Como el devanado secundario del transformador está conectado a un circuito con alta impedancia, podemos despreciar la corriente de dicho devanado, y como consecuencia de se tiene

$$V_1 = (R_1 + sL_1) * i_1 \quad (1.42)$$

$$V_2 = sM * i_1 \quad (1.43)$$

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{sM}{R_1 + sL_1} = \frac{sK_F}{1 + sT_F} \quad (1.44)$$

Donde $K_F=M/R$ y $T_F=L_I/R$.

1.3.3 Transductor de voltaje en terminales y compensador

Monitorea, rectifica y filtra el voltaje en terminales a una cantidad de corriente directa, luego lo compara con el voltaje de referencia. Además, la compensación de carga puede utilizarse para mantener el voltaje constante en un nodo remoto eléctricamente de los terminales del generador; esto se logra tomando como referencia la tensión en dicho nodo, e inyectando esta señal al compensador. El diagrama de bloques que representa estos elementos se muestra en la figura 1.17. La constante de tiempo T_R representa la rectificación y filtrado de la señal del voltaje terminal de la máquina síncrona. Los parámetros del compensador de carga son R_C y X_C . Las variables de entrada E_t y I_t vienen dados fasorialmente. Si el compensador de carga no es usado, los parámetros R_C y X_C son igualados a 0, en este caso T_R es insignificante, por lo que $V_C=E_t$. La salida del transductor de voltaje V_C es la principal señal de control del sistema de excitación de la máquina síncrona. El compensador tiene una resistencia ajustable R_C , y una reactancia inductiva X_C que simulan la impedancia entre los terminales y el punto en el cual el voltaje es efectivamente controlado. (Kundur, 1994).

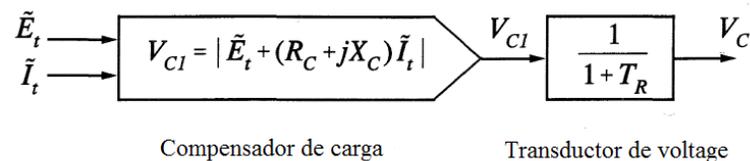


Figura 1.17. Modelo del transductor de voltaje terminal y compensador de carga

Utilizando esta impedancia y la corriente de armadura medida, una caída de voltaje es computada y sumada algebraicamente al voltaje en terminales. La magnitud del voltaje compensado resultante, la cual es alimentada al AVR, está dada por:

$$V_C = \left| \tilde{E}_t + (R_C + jX_C)\tilde{I}_t \right| \quad (1.45)$$

Cuando R_C y X_C son positivos, la caída de voltaje a través del compensador es sumada al voltaje en terminales. El compensador regula el voltaje en un punto entre el generador y por lo tanto provee de una caída de voltaje. Esto es utilizado para lograr la división apropiada de potencia reactiva entre generadores que comparten la misma barra y que comparten el mismo transformador elevador. Tal arreglo es utilizado comúnmente con unidades de generación hidráulicas y unidades térmicas compuestas.

El compensador funciona como un compensador de corriente reactiva por medio de la creación de un acoplamiento artificial entre los generadores. Sin esta característica, uno de los generadores trataría de controlar el voltaje en los terminales, aportando un voltaje ligeramente superior al de los otros; de aquí uno de los generadores tendría que administrar toda la potencia reactiva requerida, mientras que el otro absorbería potencia reactiva hasta el punto permitido por el límite de sub-excitación. Cuando R_C y X_C son negativos, el compensador regula el voltaje en un punto más allá de los terminales del generador. Esta forma de compensación es utilizada para compensar la caída de tensión a través del transformador elevador, cuando dos o más unidades están conectadas a un mismo transformador.

Típicamente, de un 50% a un 80% de la impedancia del transformador es compensada, asegurando la caída de voltaje en un punto en paralelo, de manera que los generadores puedan trabajar satisfactoriamente. Este compensador es conocido como compensador de caída de línea, aunque prácticamente es usado solo para compensar la caída de del transformador.

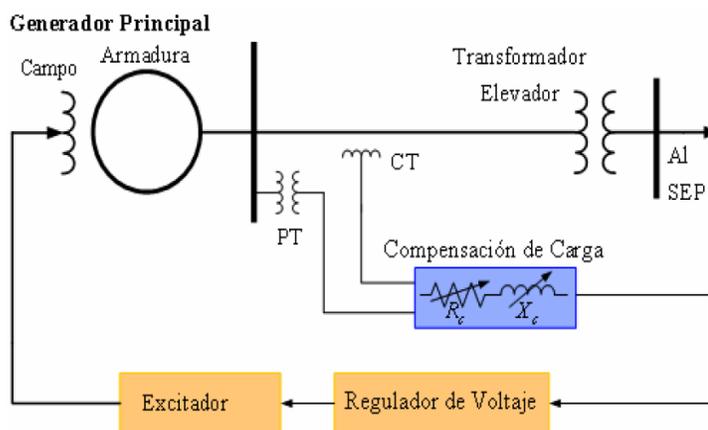


Figura 1.18. Adición del compensador de carga al lazo del AVR (Vanfretti, 2007)

1.3.4 Circuitos limitadores y de protecciones

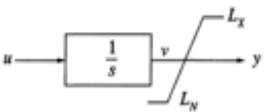
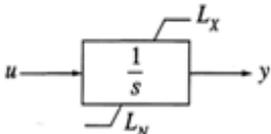
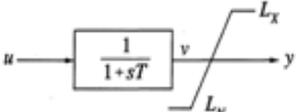
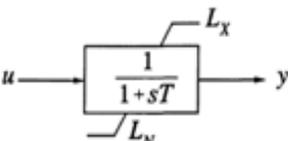
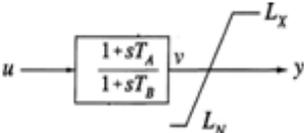
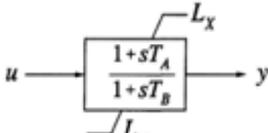
En el modelado de los sistemas de excitación los límites usados son los definidos como windup y no-windup. Estos son definidos al trabajar con bloques integradores, bloques simples con una constante de tiempo y bloques adelanto-atraso. En la tabla 1.1 se muestra de manera resumida como aplicar dichos límites a cada uno de estos bloques.

Los elementos limitadores verifican que los sistemas de excitación mantienen los límites de funcionamiento de la máquina; estos vendrán definidos por los límites de sobre-excitación, sub-excitación y el límite de voltaje/frecuencia.

Limitador de sub-excitación y limitador de sobre-excitación. El limitador de sub-excitación (UEL) se utiliza para prevenir la operación más allá de la zona de sub-excitación permitida en el diagrama circular de la máquina síncrona (asociado esto con el calentamiento extremo del estator), o la operación cercana al límite estacionario de estabilidad, o ambas. Aunque el limitador de sub-excitación es a menudo un dispositivo de detección de la impedancia, su característica limitadora se traza generalmente en términos de potencia activa vs. Potencia reactiva (también se usa una combinación entre voltaje y corriente), para así poderlo relacionar con la curva de capacidad de la máquina, o los límites estado estacionario de la estabilidad.

Existe una gran variedad de métodos de implementación para el UEL. La aplicación más común es cuando la salida del limitador es alimentada a un circuito de alto valor (una compuerta HV) que controla la tensión del regulador de voltaje y las señales del UEL; cuando se alcanza el límite ajustado UEL, el limitador controla completamente al sistema de excitación hasta que la señal del limitador es menor que el límite ajustado. Su funcionamiento se debe coordinar con la salida de la protección de la excitación de la máquina síncrona, así mismo, este límite puede ser calibrado basado específicamente en la temperatura de operación de la máquina síncrona (Kundur, 1994).

Tabla 1.1. Referencias para establecer los controles windup y non-windup

Tipo de Funcion	Tipo de limite	Diagrama de Bloques	Ecuacion del sistema	Accion limitadora
Integrador	Windup		$\frac{\partial v}{\partial t} = u$	$\begin{aligned} Si \rightarrow L_N < v < L_X, &\Rightarrow y = v \\ Si \rightarrow v \geq L_X &\Rightarrow y = L_X \\ Si \rightarrow v \leq L_N &\Rightarrow y = L_N \end{aligned}$
	Non-windup		$\frac{\partial y}{\partial t} = u$	$\begin{aligned} Si \rightarrow L_N < y < L_X &\Rightarrow \frac{\partial y}{\partial t} = u \\ Si \rightarrow y \geq L_X \wedge \frac{\partial y}{\partial t} > 0, &\Rightarrow \frac{\partial y}{\partial t} = 0, y = L_X \\ Si \rightarrow y \leq L_N \wedge \frac{\partial y}{\partial t} < 0, &\Rightarrow \frac{\partial y}{\partial t} = 0, y = L_N \end{aligned}$
Constante de tiempo simple	Windup		$\frac{\partial v}{\partial t} = \frac{u-v}{T}$	$\begin{aligned} Si \rightarrow L_N < y < L_X, &\Rightarrow y = v \\ Si \rightarrow v \geq L_X, &\Rightarrow y = L_X \\ Si \rightarrow v \leq L_N, &\Rightarrow y = L_N \end{aligned}$
	Non-windup		$f = \frac{u-y}{T}$	$\begin{aligned} Si \rightarrow L_N < y < L_X, &\Rightarrow \frac{\partial y}{\partial t} = f \\ Si \rightarrow y \geq L_X \wedge f > 0, &\Rightarrow \frac{\partial y}{\partial t} = 0, y = L_X \\ Si \rightarrow y \leq L_N \wedge f < 0, &\Rightarrow \frac{\partial y}{\partial t} = 0, y = L_N \end{aligned}$
Adelanto-atrazo	Windup			$\begin{aligned} Si \rightarrow T_1 = T_2, &\Rightarrow y = u \\ Si \rightarrow L_N \leq v \leq L_X, &\Rightarrow y = u \\ Si \rightarrow v > L_X, &\Rightarrow y = L_X \\ Si \rightarrow v < L_N, &\Rightarrow y = L_N \end{aligned}$
	Non-windup			$\begin{aligned} T_2 > T_1, T_1 > 0, T_2 > 0 \\ Si \rightarrow L_N \geq y \geq L_X, &\Rightarrow y = u \\ Si \rightarrow y > L_N, &\Rightarrow L_N \\ Si \rightarrow y < L_X, &\Rightarrow L_X \end{aligned}$

El propósito del limitador de sobre-excitación (OXL) es proteger al generador del sobrecalentamiento en el devanado inductor de la máquina síncrona que se produce al exponerlo a una sobrecorriente prolongada. Este limitador también se conoce como limitador de máxima excitación o MXL. El devanado de campo es diseñado para operar continuamente a un valor correspondiente a las condiciones nominales de carga. Típicamente, esta función detecta una condición de alta corriente en el devanado de campo y después de un retardo de tiempo, actúa a través de un regulador de AC para disminuir la excitación. El limitador de sobre-excitación se puede recalibrar basándose en el enfriamiento de la máquina síncrona.

Limitador voltaje/frecuencia (V/Hz). Esta función se utiliza para proteger al generador y al transformador elevador de tensión de daños debidos a flujos magnéticos excesivos derivados de bajas frecuencias y/o sobre voltajes. El flujo magnético excesivo, si es sostenido, puede causar sobre calentamiento y puede resultar en daños a la unidad de transformación o al núcleo del transformador. La relación de voltaje en por unidad a frecuencia en por unidad referida como la relación voltios hertzios (V/Hz), es una variable mensurable, que es proporcional al flujo magnético. El valor nominal del lado de baja tensión del transformador es normalmente 5% más bajo del valor nominal del generador; por lo tanto los requerimientos de la limitación y protección de V/Hz están determinados por el transformador. Sin embargo, si el transformador y el generador tienen los mismos valores, este último pondrá los requerimientos.

El limitador V/Hz controla el voltaje de campo para limitar el voltaje del generador, cuando el valor de V/Hz excede el valor de referencia. La protección V/Hz libera el generador cuando el valor V/Hz excede el valor de referencia para un tiempo determinado. Usualmente es provista una protección de dos niveles, un nivel con un valor más alto de V/Hz y un tiempo más corto, y el otro con nivel inferior de V/Hz y un tiempo más largo. Para muchas unidades, esta protección se convierte una protección contra sobre voltajes cuando la frecuencia excede los 60 Hz.

Estos circuitos son representados en los modelos de sistemas de excitación por medio de los bloques de funciones compuerta. Se utilizan dos tipos de controladores, valor bajo y valor alto, LV y HV respectivamente. Aplicando la lógica que define a estos bloques, se establecerá el valor a la salida de los mismos, dicha lógica es mostrada en la figura 1.19.

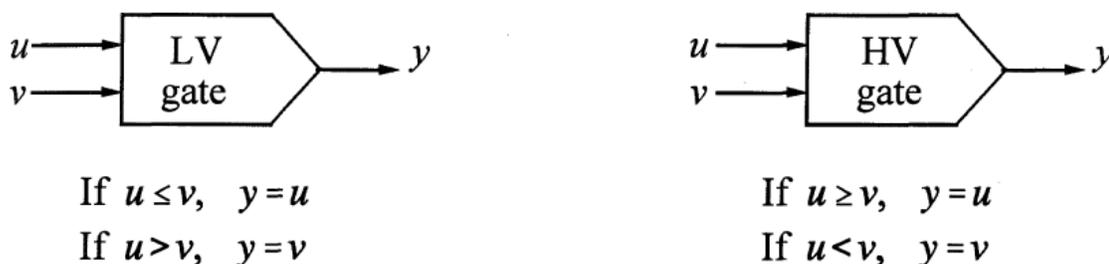


Figura 1.19. Bloques característicos de funciones compuerta, valor bajo (LV) y valor alto (HV)

1.3.5 Estabilizador del sistema de potencia (PSS)

El estabilizador de sistemas de potencia (o PSS por sus siglas en inglés) es usado para introducir una señal auxiliar de control al sistema de excitación de la máquina síncrona, con el fin de mejorar la respuesta dinámica del sistema de potencia. De manera general, la señal de entrada al PSS pueden ser la velocidad del eje, la frecuencia en terminales, y la potencia eléctrica que entrega el generador síncrono. (Vanfretti, 2007).

El mejoramiento de la respuesta dinámica del sistema de potencia, se logra amortiguando las oscilaciones del rotor de la máquina síncrona, para lo cual el PSS debe producir un componente del esfuerzo de torsión eléctrico en fase con las desviaciones de la velocidad del rotor, por lo que una señal lógica a utilizar será la desviación de velocidad $\Delta\omega_r$. Si entre la función de transferencia del excitador $G_{ex}(s)$ y la función de transferencia del generador, es decir, entre ΔE_{fd} y ΔT_e , se encontraran solo ganancias puras, una realimentación directa de $\Delta\omega_r$ bastaría como componente de amortiguamiento del torque de la máquina. Sin embargo, en la práctica el generador y su excitador poseen características de respuesta distintas a un aumento de frecuencia y de a una variación de fase

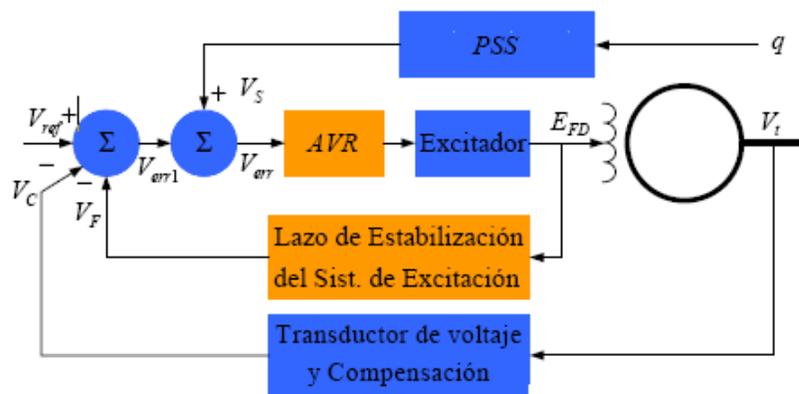


Figura 1.20. Aplicación del PSS al sistema de excitación (Vanfretti, 2007)

Por lo tanto, la función de transferencia del PSS, $G_{PSS}(s)$, debe poseer elementos apropiados de remuneración de fase para compensar el retraso de fase que inserta el excitador, así como también el ya nombrado esfuerzo de torsión eléctrico. En el caso ideal, tomando en cuenta las

características de fase a compensar, el PSS daría lugar a un amortiguamiento puro del esfuerzo de torsión en todas las frecuencias oscilantes. La estructura general del PSS es mostrada en la figura 1.21, donde la señal del PSS, V_s , puede ser provista de un gran número de señales de entrada diferentes, todas estas medidas en los terminales del generador. Estas señales son manipuladas a través de filtros paso bajo y paso alto, luego la señal filtrada es llevada a través de elementos de adelanto y/o atraso de fase para obtener el cambio de fase requerido, después esta señal es amplificada y finalmente pasada a través de un circuito limitador. Cuando se diseña la compensación de fase, es necesario tomar en cuenta el cambio de fase de la propia señal de entrada y el introducido por las etapas de filtraje. También, algunas veces los filtros se diseñan de manera que el cambio de fase que introducen sea igual a cero para las oscilaciones de frecuencia del rotor.

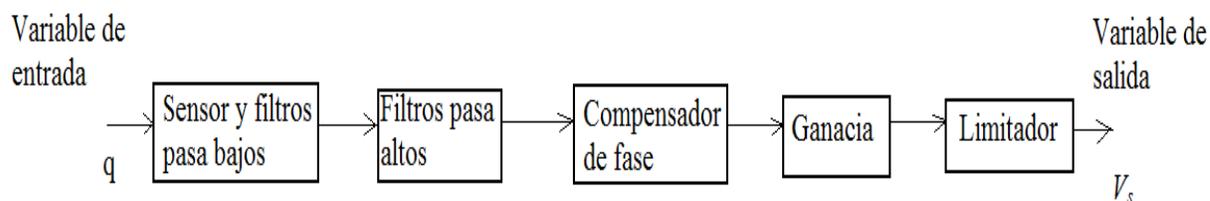


Figura 1.21. Elementos principales de un PSS

El diagrama de bloques de la figura 1.22 muestra la forma generalizada de un estabilizador de sistemas de potencia con una sola entrada. Como ya se mencionó, algunas señales de entrada (V_{ST}) comunes son la velocidad, la frecuencia y la potencia. La constante de tiempo T_6 puede ser utilizada para representar la constante de tiempo del transductor de tensión. La ganancia del estabilizador está ajustada al término K_5 y el filtro paso alto está determinado por la constante T_5 . En el bloque que sigue, A_1 y A_2 permiten que se tomen en cuenta algunos efectos de baja frecuencia de los filtros torsionales de alta frecuencia (unidades térmicas). Cuando no se utilizan con este propósito, el bloque puede ser utilizado para ayudar a moldear las características de ganancia y de fase del estabilizador. Los siguientes bloques crean dos etapas de compensación de adelanto y atraso de fase, dadas por las constantes T_1 y T_4 . La salida del estabilizador puede ser limitada de varias formas, este modelo solamente presenta los límites de salida del estabilizador V_{STMAX} y V_{STMIN} .

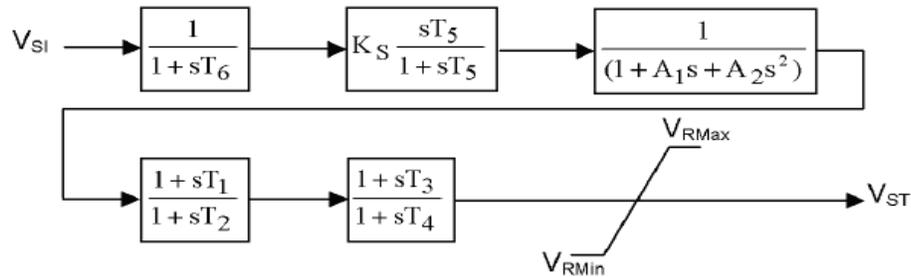


Figura 1.22. Diagrama de bloques del PSS1A (IEEE Std. 421.5, 2005)

1.4 CLASIFICACIÓN Y MODELADO DE LOS DISTINTOS SISTEMAS DE EXCITACIÓN

Anteriormente se definieron cada uno de los elementos que conforman los sistemas de excitación, de todos estos elementos, el excitador es el responsable de definir los diferentes tipos de sistemas de excitación. De acuerdo a la naturaleza del excitador, los sistemas de excitación se clasifican en:

- Sistemas de excitación de corriente continua (DC).
- Sistemas de excitación de corriente alterna (AC).
- Sistemas de excitación estáticos. (ST)

A continuación se definirán cada uno de estos sistemas de excitación, su estructura física, su base matemática, y su modelo en diagrama de bloques.

1.4.1 Sistemas de excitación de corriente continúa DC

Los sistemas de excitación de esta categoría utilizan generadores de corriente directa como fuentes de potencia de excitación, y proveen corriente al rotor de la máquina síncrona a

través de los anillos rozantes. Estos pueden ser del tipo autoexcitado o de excitación independiente. Cuando tienen excitación independiente el campo del excitador se provee por medio de un excitador piloto que está compuesto por un generador de imanes permanentes.

Los sistemas de excitación de corriente directa representan los primeros sistemas, desde los años 20 a 60. Estos pierden importancia a mediados de los años 60, cuando aparecieron los excitadores AC. Por ello en la actualidad los sistemas de excitación DC están desapareciendo gradualmente. Debido a la antigüedad de algunos, están siendo reemplazados por excitación AC o ST. En algunos casos los reguladores de voltaje son reemplazados por modernos dispositivos electrónicos. La figura 1.23 muestra una representación esquemática simplificada de un sistema de excitación típico, que posee una amplidina como regulador de voltaje. Consiste en un excitador DC conmutable que provee de corriente directa al devanado de campo del generador principal a través de anillos rozantes. El campo de la excitación está controlado por la amplidina. (Vanfretti, 2007)

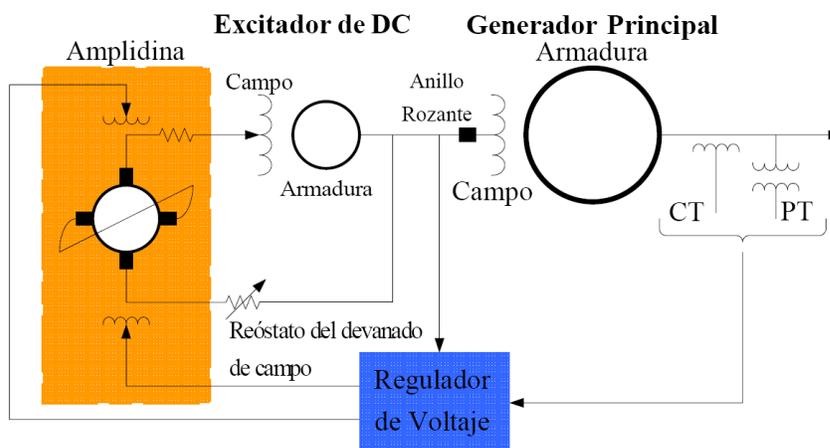


Figura 1.23 Sistemas de excitación DC típico. (Vanfretti, 2007)

En relación a los modelos de este (y los siguientes sistemas) sistema de excitación, la IEEE ha estandarizado varias estructuras de modelos en diagramas de bloques para representar una amplia variedad de sistemas que se utilizan en la actualidad. Estos modelos se recomiendan para el estudio de estabilidad transitoria y estudios de estabilidad de pequeña señal. Para los sistemas de excitación DC, se modelarán los sistemas DC1A y DC2A del estándar IEEE 421.5.

Modelo DC1A: el modelo que se describe en el diagrama de bloques de la figura 1.24 es usado para representar excitadores controlados por campo con conmutador de corriente continua con la constante actuación de los reguladores de voltaje. En un análisis de estado estacionario, las señales provenientes del estabilizador de sistema de excitación y PSS, V_F y V_S respectivamente, tendrán un valor igual a cero (IEEE, Std. 421.5, 2005)

Para la representación matemática, se desprecia la función limitadora V_{UEL} y los límites de V_R . Tomando en cuenta que la función de transferencia para un sistema cualquiera está definido por la ecuación 1.46.

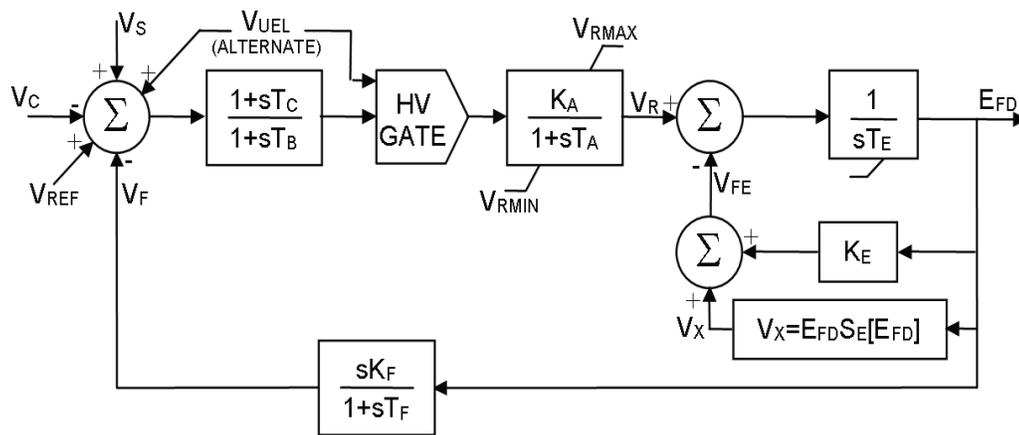


Figura 1.24. Tipo DC1A, excitador DC con conmutador (IEEE, Std. 421.5, 2005)

$$F_T = \frac{G(s)}{1 + G(s) * H(s)} \quad (1.46)$$

Donde

- F_T es la relación entre la señal de salida y la señal de entrada.
- $G(s)$ señal de lazo directo.
- $H(s)$ señal de realimentación.

Estas relaciones en términos de variables de estado dan la representación del sistema de excitación tipo DC1A.

$$\dot{V}_F = 0 * V_t - \frac{1}{T_F} * V_F + \frac{K_F}{T_F * T_E} * V_R - \frac{K_F * (S_E + K_E)}{T_F * T_E} * E_{FD} \quad (1.47)$$

$$\dot{V}_R = -\frac{K_A}{T_A} * V_t - \frac{K_A}{T_A} * V_F - \frac{1}{T_A} * V_R + 0 * E_{FD} + \frac{K_A}{T_A} * V_{REF} \quad (1.48)$$

$$\dot{E}_{FD} = 0 * V_t + 0 * V_F + \frac{1}{T_E} * V_R - \frac{(S_E + K_E)}{T_E} * E_{FD} \quad (1.49)$$

Con $\dot{V}_R = f$

$$f = \begin{cases} 0 \Leftrightarrow V_R \geq V_{RMAX} \wedge f > 0 \\ 0 \Leftrightarrow V_R \leq V_{RMIN} \wedge f < 0 \\ \dot{V}_R \Leftrightarrow V_{RMIN} < V_R < V_{RMAX} \end{cases} \quad (1.50)$$

Modelo DC2A: este modelo posee características muy similares al DC1A, con una única diferencia en los límites de salida del regulador de voltaje, los cuales son ahora proporcionales al voltaje terminal del generador sincrónico. (IEEE Std. 421.5, 2005).

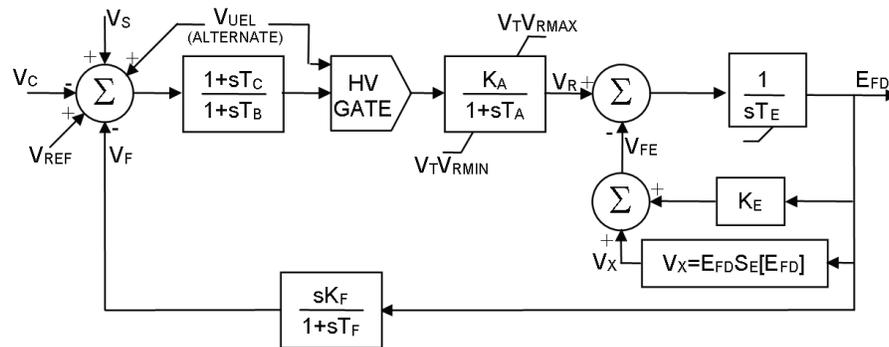


Figura 1.25. Tipo DC2A, excitador DC con conmutador y con regulador bus-fed (IEEE Std. 421.5, 2005)

$$\dot{V}_R = f \quad (1.51)$$

$$f = \begin{cases} 0 \Leftrightarrow V_R \geq V_t * V_{RMAX} \wedge f > 0 \\ 0 \Leftrightarrow V_R \leq V_t * V_{RMIN} \wedge f < 0 \\ \dot{V}_R \Leftrightarrow V_t * V_{RMIN} < V_R < V_t * V_{RMAX} \end{cases} \quad (1.52)$$

1.4.2 Sistemas de excitación de corriente alterna AC

Los sistemas de excitación de corriente alterna utilizan alternadores (generadores AC) como fuente de potencia para el generador primario. Usualmente, el generador se coloca sobre el mismo eje del generador principal. La salida de corriente alterna del excitador es rectificada por rectificadores (controlados por compuerta o no controlados) obteniendo así la corriente directa necesaria para el devanado de excitación del generador principal. Los rectificadores pueden ser estacionarios o rotativos. Actualmente para cumplir la función del regulador se utilizan amplificadores electrónicos, es decir de estado sólido, cuya respuesta global es bastante rápida. Los sistemas de excitación de corriente alterna pueden tomar muchas formas dependiendo del arreglo de rectificadores, el método de control de la salida, del excitador y la fuente de excitación para el excitador. Las siguientes categorías describen los sistemas de excitación según su arreglo de rectificadores. (Vanfretti, 2007).

Sistema de excitación AC, con rectificadores estacionarios. Cuando se utilizan rectificadores estacionarios la salida de corriente directa es alimentada al devanado de excitación del generador principal a través de anillos rozantes. Utilizando estos rectificadores no controlados, el regulador (AVR) controla el devanado de campo del excitador de corriente alterna, al mismo tiempo que el excitador AC controla el voltaje de salida del excitador. En el sistema de excitación mostrado en la figura 1.26, el excitador del alternador (que es en si la fuente de excitación del excitador del generador primario) es manejado desde el rotor del generador. (Vanfretti, 2007)

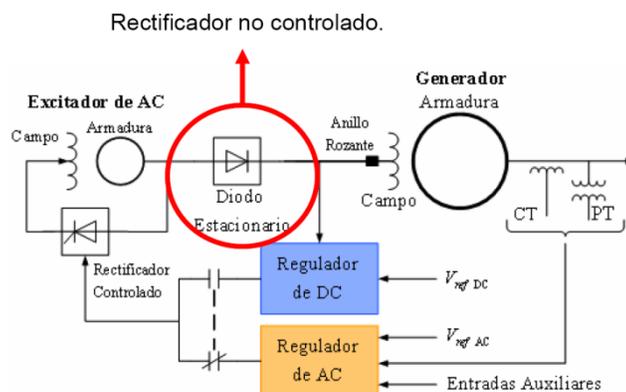


Figura 1.26. Sistema de excitación AC estacionario controlado por medio de rectificadores. (Vanfretti, 2007)

El excitador en sí mismo es autoexcitado, su potencia es alimentada al devanado de campo a través de rectificadores de tiristores. El regulador de voltaje obtiene su potencia de la salida de voltaje del excitador. Una forma alternativa del sistema de control de excitación de campo por medio de rectificadores utiliza un excitador piloto como fuente de excitación del devanado de campo.

Cuando se utilizan rectificadores controlados el regulador controla directamente la salida de voltaje de corriente directa del excitador. La figura 1.27 muestra el diagrama unifilar de los sistemas de excitación AC alimentado por rectificadores controlados. En este sistema la salida del alternador es rectificada y conectada al campo de generador por medio de anillos rozantes. El excitador del alternador esta autoexcitado en paralelo y es controlado electrónicamente por medio del ajuste del ángulo de disparo de los tiristores, que generalmente son SCR's. Este utiliza un sistema independiente de voltaje para mantener su voltaje de salida. Debido a que los tiristores controlan directamente la salida del excitador, la respuesta general del sistema es muy veloz

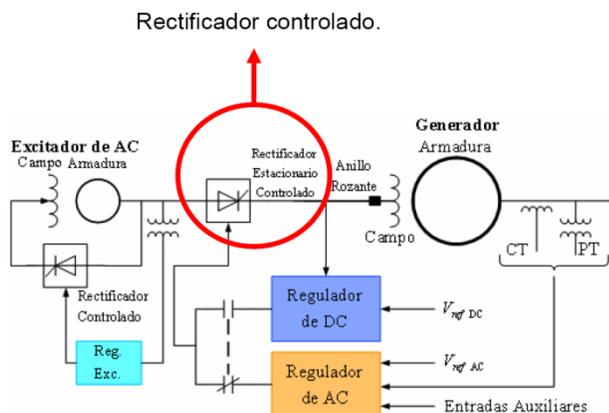


Figura 1.27. Sistema de excitación AC alimentado por rectificadores controlados (Vanfretti, 2007)

Sistemas de excitación AC con rectificadores rotativos. El uso de rectificadores rotativos permite prescindir del uso de las escobillas y anillos rozantes que se utilizan en sistemas estáticos pues los rectificadores están rotando con el eje. Este sistema se presenta en la figura 1.28, su construcción hace necesario la construcción de un excitador piloto, el cual tiene un rotor de imanes permanentes, este rota con la armadura de la excitatriz de corriente alterna y

los rectificadores para proveer de corriente al devanado estacionario del excitador de corriente alterna; esto significa que la salida rectificada del excitador piloto energiza el campo estacionario del excitador de corriente alterna. Por tanto todo el acoplamiento entre las componentes estacionarias y rotativas es electromagnético. Se debe que esta característica imposibilita la medición de cualquiera de las variables de campo del generador de manera directa ya que las mismas se encuentran en constante movimiento junto con el rotor del generador principal. El regulador de voltaje controla el devanado de excitación del excitador de corriente alterna, este a su vez controla el devanado del generador principal. Un sistema como el mencionado se refiere como sistema de excitación sin escobillas. En estos sistemas, una respuesta dinámica rápida se puede alcanzar por medio de un diseño especial del excitador de corriente alterna, que consiste en excitadores que giran a frecuencias mayores que la del generador, y un esfuerzo de alta tensión del campo estacionario del excitador. Estos sistemas también proveen un sistema de control manual del voltaje del generador principal por medio de una comanda ajustable de corriente directa en los circuitos de compuerta de los tiristores. Para los excitadores AC, se modelarán los modelos AC1A y el AC4A. (Vanfretti, 2007).

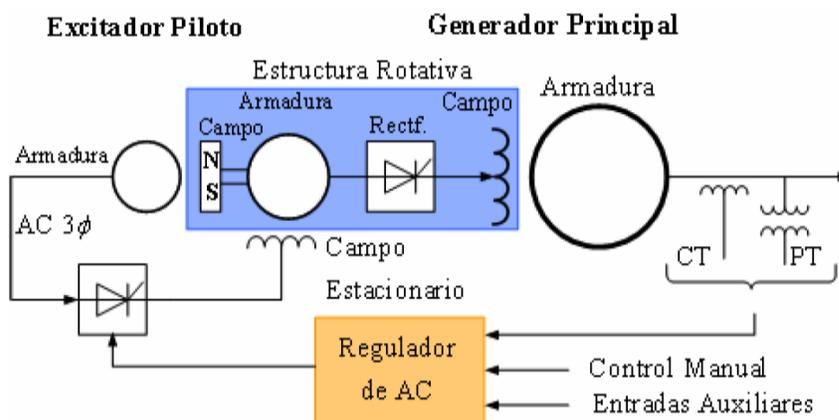


Figura 1.28. Sistema de excitación AC con rectificadores rotativos (Vanfretti, 2007)

Modelo AC1A. Este modelo de sistema de excitación consiste en un alternador principal con rectificadores no controlados. El excitador no es autoexcitado y la potencia del regulador de voltaje es tomada de una fuente la cual no se ve afectada por los transitorios externos. El diodo característico impone en la salida de voltaje de excitador un límite inferior de valor cero como se indica en la figura 1.29. Este modelo es aplicable para simular los sistemas sin escobillas

(Brushless). Aquí no existe realimentación de corriente de campo del excitador, pero sí incluye el efecto desmagnetizante de la corriente de carga I_{FD} . (IEEE Std 421.5, 2005).

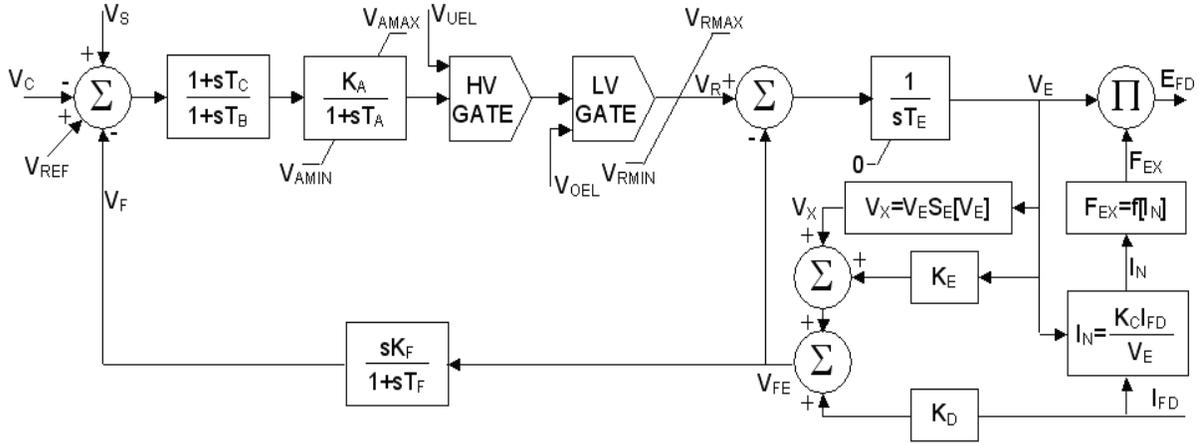


Figura 1.29. Modelo AC1A, sistema de excitación AC alternador-rectificador con rectificadores no controlados (IEEE Std. 421.5, 2005).

De este diagrama de bloques y considerando que las constantes de tiempo T_b y T_C son cero, y además, la señal $V_S=0$, ya que en estos sistemas tampoco se considera el PSS, se tiene:

$$\begin{aligned} \dot{V}_F = & 0 * V_t - \frac{V_F}{T_F} + \frac{K_F}{T_E * T_F} * (K_E + S_E) * V_R - \frac{K_F}{T_E * T_F} * (K_E + S_E)^2 * V_E - \frac{K_F * K_D}{T_E * T_F} * (K_E + S_E) * I_{FD} \\ & + \frac{K_F - K_D}{T_F} * \frac{r_{fd}}{x_{ad}} * (Q_7 + Q_8 + Q_9) \end{aligned} \quad (1.53)$$

$$\dot{V}_R = -\frac{K_A}{T_A} * V_t - \frac{K_A}{T_A} * V_F - \frac{V_R}{T_A} + 0 * V_E + \frac{K_A}{T_A} * V_{REF} \quad (1.54)$$

$$\dot{V}_E = 0 * V_t + 0 * V_F + \frac{V_R}{T_E} - (K_E + S_E) * V_E - \frac{K_D}{T_E} * I_{FD} \quad (1.55)$$

Con $\dot{V}_R = f$,

$$f = \begin{cases} 0 \Leftrightarrow V_R \geq V_{RMAX} \wedge \dot{V}_R > 0 \\ \dot{V}_R \Leftrightarrow V_{RMIN} < V_R < V_{RMAX} \\ 0 \Leftrightarrow V_R \leq V_{RMIN} \wedge \dot{V}_R < 0 \end{cases} \quad (1.56)$$

Q_7 , Q_8 , y Q_9 son variables en función de los parámetros y concatenaciones del flujo de la máquina sincrónica.

Modelo AC2A. El modelo está indicado en la figura 1.30. Representa a los sistemas de excitación sin escobillas controlados por campo de alta respuesta inicial formados por un grupo alternador rectificador. (IEEE Std. 421.5, 2005)

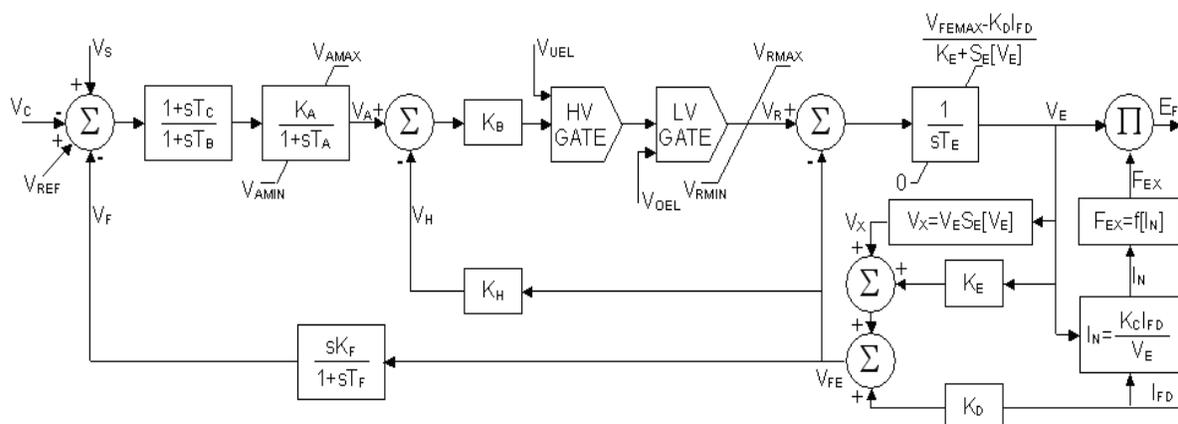


Figura 1.30. Sistema de excitación alternador-rectificador con rectificador no controlado y realimentación de corriente de campo del excitador. (IEEE Std. 421.5, 2005).

El alternador principal del excitador es utilizado con rectificadores no controlados. Este modelo es similar al tipo AC1A, excepto por la inclusión adicional de los lazos de realimentación de corriente de campo que simulan la compensación de la constante de tiempo del excitador y los elementos limitadores de la corriente de campo. La compensación de la constante de tiempo del excitador consiste esencialmente en una realimentación negativa (V_H) la cual se le resta a la señal V_A , reduciendo este valor efectivo, y en proporción a esta reducción, se incrementa el ancho de banda de pequeña señal del sistema de excitación. Para obtener una alta respuesta inicial con este sistema, un voltaje forzado (V_{RMAX}) es aplicado al campo del excitador. (V_E) es limitado por un valor definido (V_{LR}), el cual es usualmente determinado por la relación de respuesta del sistema de excitación especificada. Las señales de salida desde el regulador de voltaje (V_A) y la constante de tiempo de compensación (V_H) son comparadas con la señal de salida (V_L) del limitador en un circuito de control lógico, el cual

funciona proveyendo una clara transición desde el control del regulador al control de límites de excitación en los puntos límites de excitación.

La característica de la compuerta de bajo valor (LV) es que la excitación es controlada por la señal más negativa entre V_H y V_L .

Haciendo las mismas consideraciones que en el sistemas AC1A y observando el diagrama de bloques de la figura 1.30, se tiene:

$$\begin{aligned} \dot{V}_F = & 0 * V_i - \frac{1}{T_F} * V_F + 0 * V_A - \frac{K_F}{T_E * T_F} * (K_E + S_E)^2 * V_E - \frac{K_F * K_D}{T_E * T_F} * (K_E + S_E) * I_{FD} + \\ & + \frac{K_F * K_D}{T_F} * \frac{r_{fd}}{x_{ad}} * (Q_7 + Q_8 + Q_9) + \frac{K_F}{T_F * T_E} * (K_E + S_E) * V_R \end{aligned} \quad (1.57)$$

$$\dot{V}_A = -\frac{K_A}{T_A} * V_i - \frac{K_A}{T_A} * V_F - \frac{V_A}{T_A} + 0 * V_E + \frac{K_A}{T_A} * V_{REF} \quad (1.58)$$

$$\dot{V}_E = 0 * V_i + 0 * V_F + 0 * V_A - \frac{(K_E + S_E)}{T_E} * V_E - \frac{K_D}{T_E} * I_{FD} + \frac{V_R}{T_E} \quad (1.59)$$

La compuerta de bajo valor (LV) está definida por:

$$Si \ V_{AI} \leq V_L: S_G = V_{AI} \quad (1.60)$$

$$Si \ V_{AI} > V_L: S_G = V_L \quad (1.61)$$

$$V_R = \begin{cases} S_G * K_B \Leftrightarrow V_{RMIN} \leq S_G * K_B \leq V_{RMAX} \\ V_{RMAX} \Leftrightarrow S_G * K_B > V_{RMAX} \\ V_{RMIN} \Leftrightarrow S_G * K_B < V_{RMIN} \end{cases} \quad (1.62)$$

$$\dot{V}_A = f \quad (1.63)$$

$$f = \begin{cases} 0 \Leftrightarrow V_A \geq V_{AMAX} \wedge \dot{V}_A > 0 \\ \dot{V}_R \Leftrightarrow V_{AMIN} < V_A < V_{AMAX} \\ 0 \Leftrightarrow V_A \leq V_{AMIN} \wedge \dot{V}_A < 0 \end{cases} \quad (1.64)$$

Q_7 , Q_8 y Q_9 tienen la misma definición que en los sistemas de excitación tipo AC1A

$$E_{FD} = F_{EX} * V_E \quad (1.65)$$

Donde: F_{EX} es la función que determinara la regulación del rectificador.

1.4.3 Sistemas de excitación estáticos ST

Todos los componentes de este sistema son estáticos o estacionarios. Los rectificadores estáticos, controlados o no controlados, proveen corriente de excitación directamente al devanado de campo del generador síncrono principal a través de los anillos rozantes. El suministro de potencia de estos rectificadores proviene del generador principal, o de las barras auxiliares de la subestación, a través de un transformador que reduce el voltaje a un nivel adecuado, o en otras ocasiones desde devanados auxiliares del generador. A continuación se describen las diferentes categorías de este tipo de sistema. (Vanfretti, 2007).

Sistemas de excitación ST de fuente potencial (voltaje) y rectificadores controlados. En estos sistemas la potencia de excitación se provee a través de transformadores desde los terminales del generador principal o desde las barras auxiliares de la subestación, y son regulados por medio de rectificadores controlados. Este tipo de sistema también se conoce como sistema estático alimentado por barras o sistema estático alimentado por transformadores. Una de las particularidades de este sistema es que tiene una constante de tiempo muy pequeña, sin

embargo, el voltaje máximo de salida del excitador es dependiente de la entrada de corriente alterna. De aquí parte la razón de que el voltaje máximo del excitador se reduce durante condiciones de falla, pues existe un voltaje menor en los terminales del generador. Esta limitación del sistema de excitación es superada casi completamente gracias a su respuesta instantánea y la alta capacidad de esfuerzos post-falla del devanado de campo. Además, el sistema es poco costoso y de fácil mantenimiento, lo que lo hace común en sistemas de potencia de gran dimensión. En la figura 1.31 se muestra en diagrama representativo de este sistema.

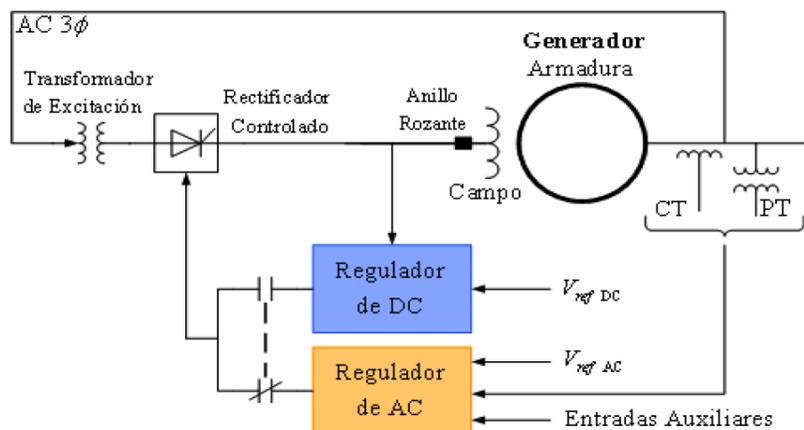


Figura 1.31. Sistema de excitación ST de fuente de potencial y rectificadores controlados (Vanfretti, 2007)

Sistemas de excitación ST de fuente compuesta. La potencia para la fuente de excitación en este caso, está provista tanto por la corriente como por el voltaje en terminales de generador principal. Este se lleva a cabo por medio de un transformador de voltaje de alta potencia o PPT (*power potential transformer*) y un transformador de corriente de núcleo saturable o SCT (*saturable-current transformer*), como se describe en la figura 1.32. Alternativamente, las fuentes de voltaje y corriente pueden ser combinadas por la utilización de un único transformador de excitación que provee tanto transformador de corriente (que permite saturación) y de voltaje conocido como transformador SCTP (*saturable-current potential transformer*).

El regulador controla la salida del excitador a través de la saturación de excitación. Cuando el generador no está alimentando una carga, la corriente de armadura es cero y la fuente de

potencial alimenta totalmente el sistema de excitación. Bajo condiciones de carga, una parte de la potencia de excitación la provee desde la corriente del generador.

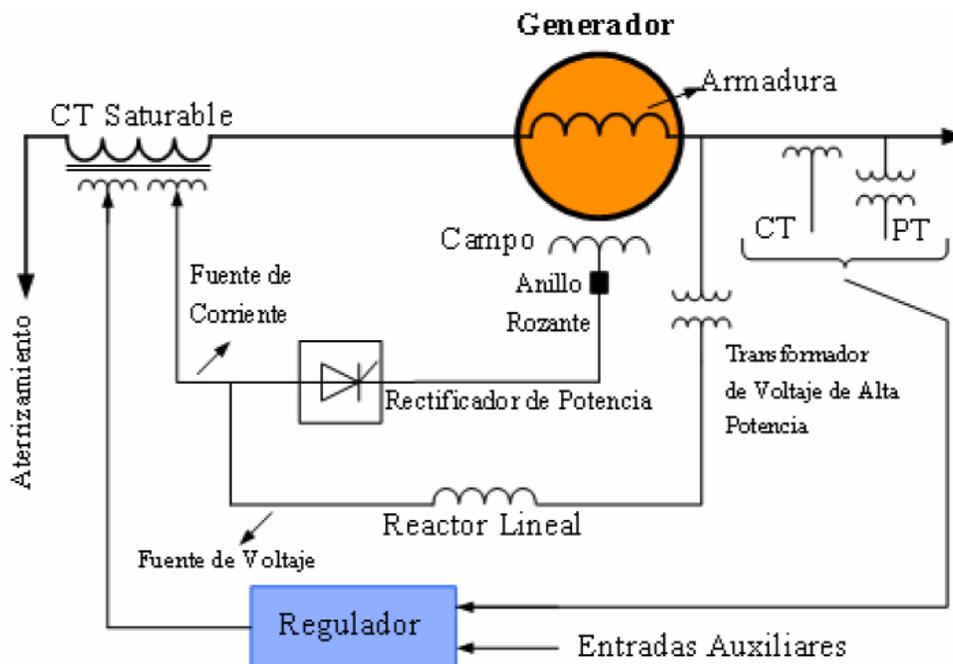


Figura 1.32. Sistema de excitación ST de fuente compuesta (Vanfretti, 2007)

Durante condiciones de falla del sistema, con depresiones severas en el voltaje en terminales del generador, la entrada de corriente permite al excitador proveer una alta capacidad de esfuerzo del devanado de campo. Los sistemas de fuente compuesta y rectificadores controlados utilizan estos rectificadores a la salida del excitador, y la composición de fuente de voltaje y corriente dentro del generador del estator para proveer la potencia de excitación de la máquina. El resultado de dicha configuración es una respuesta muy rápida del sistema y una alta capacidad de esfuerzo. Los modelos seleccionados para este tipo de excitadores son ST1A y ST2A.

Modelo ST1A: este modelo representa todos los sistemas en los cuales el voltaje para la excitación es abastecido por medio de un transformador desde los terminales del generador (o una línea de unidades auxiliares) y es regulado por un rectificador controlado. El máximo voltaje del excitador desarrollado por estos sistemas es directamente relacionado con el voltaje terminal del generador. En estos tipos de sistemas, las constantes de tiempo propias son muy pequeñas y la estabilización del excitador como tal no es requerida; en cambio, debe decidirse

la reducción de la ganancia de transitorios de tales sistemas. El modelo dado es suficientemente versátil para representar la reducción de ganancia de transitorios implementados en lazo directo, por las constantes de tiempo T_B y T_C (en tal caso K_F debería ser cero), o en el lazo de realimentación por una selección apropiada de los parámetros K_F y T_F . (IEEE Std. 421.5, 2005)

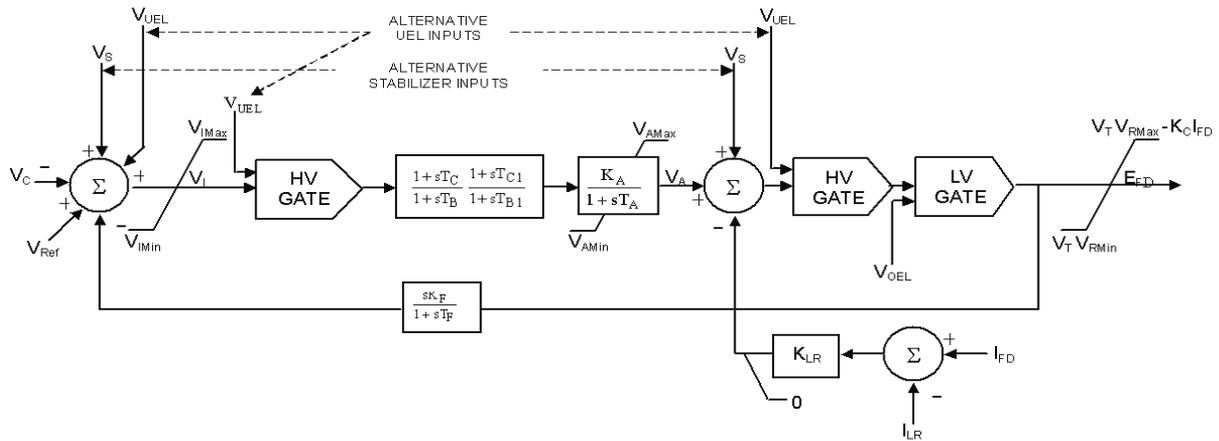


Figura 1.33. Modelo ST1A, excitador con fuente de potencia y rectificador controlado (IEEE Std 421.5, 2005)

Como la reducción de ganancia de transitorios se representa por medio de la constante K_F y T_F , en este caso se toman T_B y T_C como cero. Se tiene:

$$V_E = \begin{cases} V_E \Leftrightarrow V_{MIN} \leq V_E \leq V_{MAX} \\ V_{MAX} \Leftrightarrow V_E \geq V_{MAX} \\ V_{MIN} \Leftrightarrow V_E < V_{MIN} \end{cases} \quad (1.66)$$

$$\text{Si } V_{MIN} \leq V_E \leq V_{MAX} \text{ entonces } V_{EI} = V_E \quad (1.67)$$

$$\dot{V}_R = -\frac{K_A}{T_A} * V_i - \frac{V_R}{T_A} - \frac{K_A}{T_A} * V_F + \frac{K_A}{T_A} * V_{REF} + \frac{K_A}{T_A} * V_S \quad (1.68)$$

$$\dot{V}_F = -\frac{K_A * K_F}{T_A * T_F} * V_i - \frac{K_F}{T_A * T_F} * V_R - \left(\frac{K_A * K_F}{T_A * T_B} + \frac{1}{T_F} \right) * V_F + \frac{K_A * K_F}{T_A * T_F} (V_{REF} + V_S) \quad (1.69)$$

$$\text{Si } V_E > V_{MAX} \text{ entonces } V_{EI} = V_{MAX}. \quad (1.70)$$

$$\dot{V}_R = \frac{K_A}{T_A} * V_{IMAX} - \frac{V_R}{T_A} \quad (1.71)$$

$$\dot{V}_F = \frac{K_A * K_F}{T_A * T_F} * V_{IMAX} - \frac{K_F}{T_A * T_F} * V_R - \frac{V_F}{T_F} \quad (1.72)$$

$$\text{Si } V_E < V_{IMIN} \text{ entonces } V_{EI} = V_{IMIN}. \quad (1.73)$$

$$\dot{V}_R = \frac{K_A}{T_A} * V_{IMIN} - \frac{V_R}{T_A} \quad (1.74)$$

$$\dot{V}_F = \frac{K_A * K_F}{T_A * T_F} * V_{IMIN} - \frac{K_F}{T_A * T_F} * V_R - \frac{V_F}{T_F} \quad (1.75)$$

Tomando la constante $K_C=0$

$$E_{FD} = \begin{cases} V_R \Leftrightarrow V_t * V_{RMIN} \leq V_R \leq V_t * V_{RMAX} \\ V_t * V_{RMAX} \Leftrightarrow V_R > V_t * V_{RMAX} \\ V_t * V_{RMIN} \Leftrightarrow V_R < V_t * V_{RMIN} \end{cases} \quad (1.76)$$

Modelo ST2A. Algunos sistemas de excitación estáticos utilizan fuentes de corriente y voltaje (valores terminales del generador) como fuente de poder. Estos sistemas de excitación con fuente compuesta y rectificadores son modelados como se indica en la figura 1.34. Es necesario que la fuente de poder sea una combinación de fasores del voltaje terminal V_t y de la corriente terminal I_t . Observando la figura 1.27 y realizando el análisis matemático correspondiente se tiene: (IEEE Std. 421.5, 2005)

$$\dot{V}_F = 0 * V_t - \frac{1}{T_F} * V_F + \frac{K_F}{T_E * T_F} * V_R - \frac{K_E * K_F}{T_E * T_F} * E_{FD} + \frac{K_F}{T_E * T_F} * V_E * F_{EX} \quad (1.77)$$

$$\dot{V}_R = -\frac{K_A}{T_A} * V_t - \frac{K_A}{T_A} * V_F - \frac{V_R}{T_A} + \frac{K_A}{T_A} * V_{REF} \quad (1.78)$$

$$\dot{E}_{FD} = 0 * V_i + 0 * V_F + \frac{V_R}{T_E} - \frac{K_E}{T_E} * E_{FD} + \frac{V_E}{T_E} * F_{EX} \quad (1.79)$$

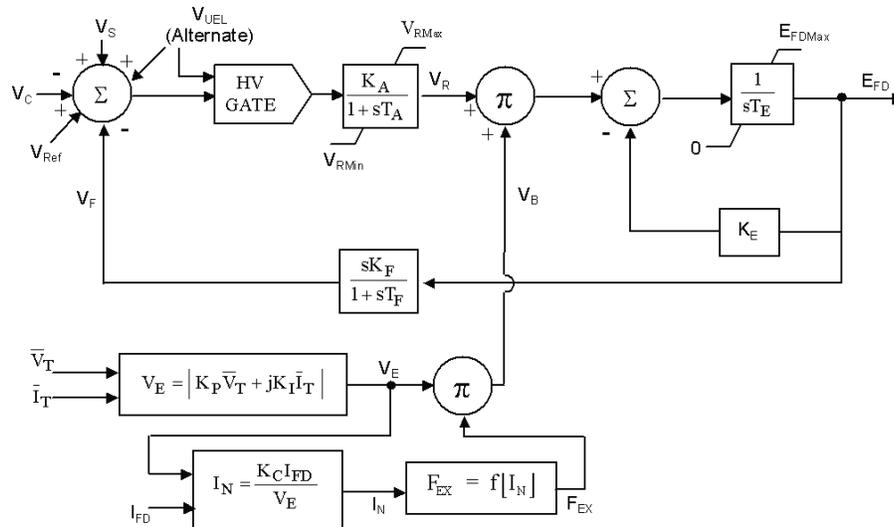


Figura 1.34. Modelo ST2A, excitador con fuente compuesta rectificada (IEEE Std. 421.5, 2005)

Con las siguientes condiciones. Sea $f = \dot{V}_R$

$$f = \begin{cases} 0 \Leftrightarrow V_R \geq V_{RMAX} \wedge f > 0 \\ 0 \Leftrightarrow V_R \leq V_{RMIN} \wedge f < 0 \\ \dot{V}_R \Leftrightarrow V_{RMIN} < V_R < V_{RMAX} \end{cases} \quad (1.80)$$

Sea $g = \dot{E}_{FD}$

$$g = \begin{cases} 0 \Leftrightarrow E_{FD} \geq E_{FDMAX} \wedge g > 0 \\ 0 \Leftrightarrow E_{FD} \leq 0 \wedge g < 0 \\ \dot{E}_{FD} \Leftrightarrow 0 < E_{FD} < E_{FDMAX} \end{cases} \quad (1.81)$$

$$V_E = |K_P * V_i| \angle 0^\circ + j K_I * I_i \angle \beta \quad (1.82)$$

CAPÍTULO II

ANÁLISIS DINÁMICO DE LOS MODELOS DE LOS SISTEMAS DE EXCITACIÓN DEL GENERADOR SINCRÓNICO.

En este capítulo se hace un estudio dinámico de los distintos modelos de los sistemas de excitación descritos en el capítulo anterior, obteniendo la respuesta de su comportamiento como sistema de control al variar los parámetros que conforman los distintos elementos de los sistemas de control de excitación; por último se generan un conjunto de tablas en donde se muestra el análisis antes mencionado

2.1 ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO DINÁMICO DE LOS SISTEMAS DE EXCITACIÓN

El estudio dinámico de los modelos de sistemas de excitación de la máquina sincrónica se basa en las teorías de respuesta transitoria de los sistemas de control. En este aspecto, el análisis dinámico de cualquier modelo que representa un sistema físico incluye los estudios en lazo abierto y lazo cerrado de dicho sistema. Estos análisis se realizan para pequeñas y grandes perturbaciones a la entrada de los sistemas de excitación, en lo que es conocido como respuesta en frecuencia y respuestas en el tiempo de los sistemas de control. A través de estas pruebas, y con base en la teoría de estabilidad de los sistemas de control, se obtienen los datos necesarios para poder establecer cómo es el comportamiento de los sistemas de excitación ante variaciones de cada uno de los parámetros que los conforman. Como se define en

las teorías de control, tanto las respuestas en frecuencia y como los estudios de estabilidad se apoyan en herramientas gráficas-analíticas, como lo son los diagramas de Bode, el lugar de raíces, así como la respuesta en el tiempo del sistema en estudio. La figura 2.1 muestra la representación clásica de un sistema de excitación para estudios de estabilidad. En esta figura las variables relevantes son las siguientes:

- V_R es el voltaje de referencia del regulador.
- E_t es la variable a controlar (el voltaje en bornes del generador o corregido mediante la caída de tensión de la línea de alimentación).
- V_C señal filtrada y adaptada en el lazo de control.
- V_r es la señal del excitador.
- E_{fd} es el voltaje aplicado al rotor de la máquina síncrona.

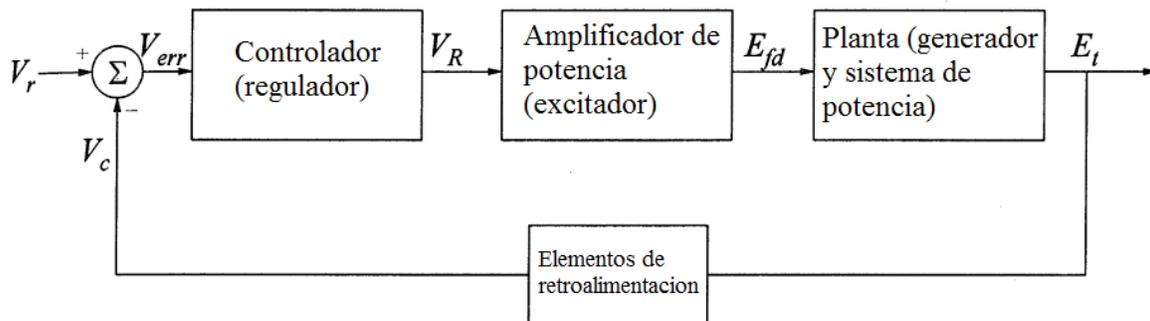


Figura 2.1. Sistema de excitación representado en la forma clásica de estudio de control

El desempeño del sistema de control de excitación depende de las características del sistema de excitación, del generador y del sistema de potencia. En el estudio del comportamiento dinámico de los sistemas de excitación es usual separar los temas de estabilidad (o respuesta) ante grandes perturbaciones o ante perturbaciones pequeñas, también conocidas como pequeña y gran señal, respectivamente. En señales “grandes” la no linealidad de las componentes es significativa, mientras que para pequeña señal, la respuesta es aproximadamente lineal. (Kundur, 1994).

2.2 CARACTERIZACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DE LOS SISTEMAS DE EXCITACIÓN ANTE SEÑALES GRANDES

En este tipo de estudios es necesario representar el desempeño del sistema de excitación para transitorios severos. Para permitir una máxima flexibilidad en el diseño y aplicación de equipos de excitación, se ha caracterizado el desempeño de los sistemas de excitación mediante los siguientes parámetros:

- a) Voltaje máximo de excitación. Es el máximo voltaje continuo que el sistema de excitación es capaz de abastecer desde sus terminales bajo condiciones específicas. Este voltaje máximo es indirectamente un indicador de la capacidad del campo electromagnético del interior de la máquina para almacenar energía, por lo que un alto voltaje máximo tiende a mejorar la estabilidad transitoria en el sistema de potencia. Tanto la fuente de tensión y la fuente compuesta de los sistemas de excitación estáticos, dependen del voltaje y corriente del generador respectivamente, el voltaje máximo está definido por la fuente de corriente y de voltaje. En los sistemas de excitación rotacionales, el voltaje máximo está determinado por la razón de velocidad.
- b) Corriente máxima de excitación. Es la máxima corriente continua que el sistema de excitación es capaz de abastecer desde los terminales para un tiempo específico.
- c) Respuesta en el tiempo de la tensión de excitación. Es el tiempo en segundos que tarda el voltaje de excitación en alcanzar 95% de la diferencia entre el límite máximo de excitación y la tensión nominal de campo, bajo una condición específica. También se define el tiempo de respuesta de la tensión de excitación como la salida de voltaje de excitación en función del tiempo, para una condición específica.
- d) Alta respuesta inicial del sistema de excitación: es cuando el sistema de excitación posee una respuesta inicial de voltaje en 0.1seg o menos. Esta representa una alta y rápida respuesta del sistema de excitación.

- e) Respuesta nominal de los sistemas de excitación. Se acostumbra a usar la curva de respuesta de voltaje de los sistemas de excitación presentada en la figura 2.2

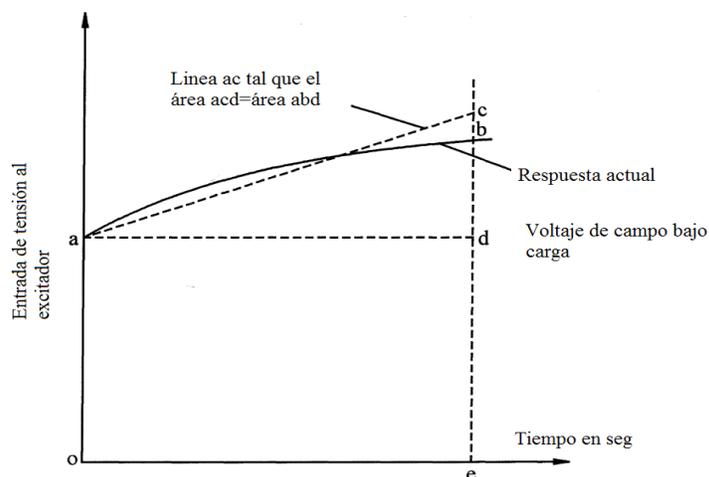


Figura 2.2. Respuesta nominal del sistema de excitación

La respuesta de la figura 2.2 usa el valor $oe=0.5\text{seg}$ y ao es fijado por la respuesta del voltaje de campo, bajo una condición de carga específica. Las bases para considerar un tiempo nominal de 0.5seg , es que en una perturbación severa el rotor del generador normalmente tiene sus picos entre 0.4 y 0.7seg . A partir de esta curva la respuesta nominal se caracteriza mediante la razón entre el incremento del voltaje de salida del sistema de excitación dividido por la razón del voltaje de campo de la siguiente forma. (Kundur, 1994).

$$\text{Respuesta nominal} = \frac{cd}{(ao) * (oe)} \quad (2.1)$$

2.3 CARACTERIZACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DE LOS SISTEMAS DE EXCITACIÓN ANTE SEÑALES PEQUEÑAS

Esta caracterización define una manera de evaluar la respuesta de lazo cerrado del sistema de control de excitación para cambios incrementales pequeños, esto para condiciones de

operación normales del sistema. Además provee una manera conveniente para determinar o verificar los parámetros del modelo del sistema de excitación. El comportamiento de pequeña señal utiliza índices clásicos de la teoría de sistemas de control realimentados, por ello se clasifica en: (Kundur, 1994).

- Índices asociados con la respuesta en el tiempo.
- Índices asociados con la respuesta en frecuencia.

2.3.1 Índices temporales

Se utilizan las definiciones asociadas a la respuesta típica de un sistema de segundo orden frente a un escalón.

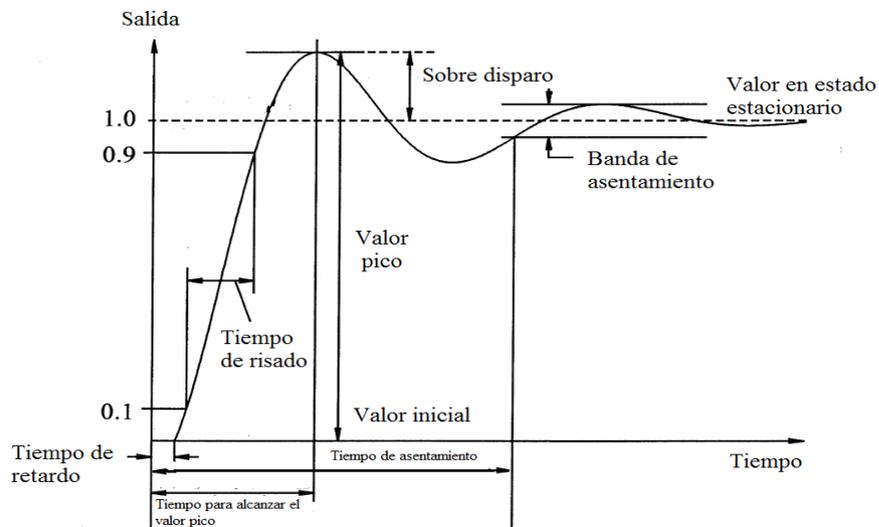


Figura 2.3. Respuesta típica de un sistema de control ante una entrada escalón

La respuesta en el tiempo típica de los sistemas de excitación frente a un escalón en la entrada de referencia es mostrada en la figura 2.3. Los índices representativos de esta respuesta son: el tiempo de risado (T_r), sobredisparo (Sd) y tiempo de asentamiento (T_s). De estos parámetros, los valores de T_r y el T_s conviene que sean pequeños, mientras que el valor

de S_d se recomienda que este entre 5 y el 15% del valor en estado estacionario. (IEEE Std. 421.2, 1990)

2.3.2 Índices de la respuesta en frecuencia

Similar a lo ocurrido para los índices temporales, la respuesta en frecuencia sigue la caracterización típica de la teoría de control, separando las respuestas de lazo abierto y lazo cerrado respectivamente. Así, la respuesta en frecuencia de lazo abierto de un sistema de control de excitación, junto con sus principales indicadores, se muestra en la figura 2.4

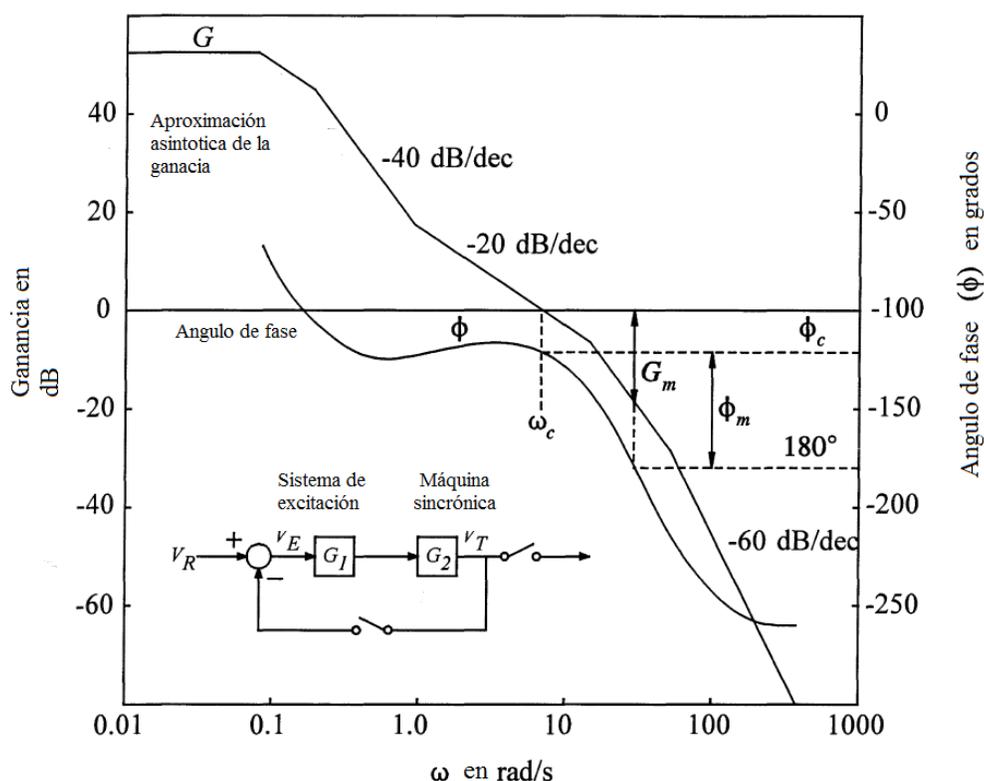


Figura 2.4. Respuesta de frecuencia típica a lazo abierto de los sistemas de excitación con el generador en vacío

Los índices asociados con el lazo abierto para la respuesta en frecuencia son:

- Ganancia de baja frecuencia G .

- Frecuencia de corte ω_C .
- Margen de fase ϕ_m
- Margen de ganancia G_m .

El efecto de estas variables en los sistemas de excitación muestra que valores grandes de G mejoran la regulación de voltaje en estado estacionario, un valor grande en ω_C indica una respuesta rápida de la excitación, valores elevados de ϕ_m y G_m proveen una mayor estabilidad sobre el lazo de control de la excitación. En general, un $\phi_m \geq 40^\circ$ y un $G_m \geq 6$ dB se consideran valores buenos de diseño para obtener sistemas de excitación estables en la práctica. La respuesta de lazo cerrado con el circuito del generador abierto se muestra en la figura 2.5

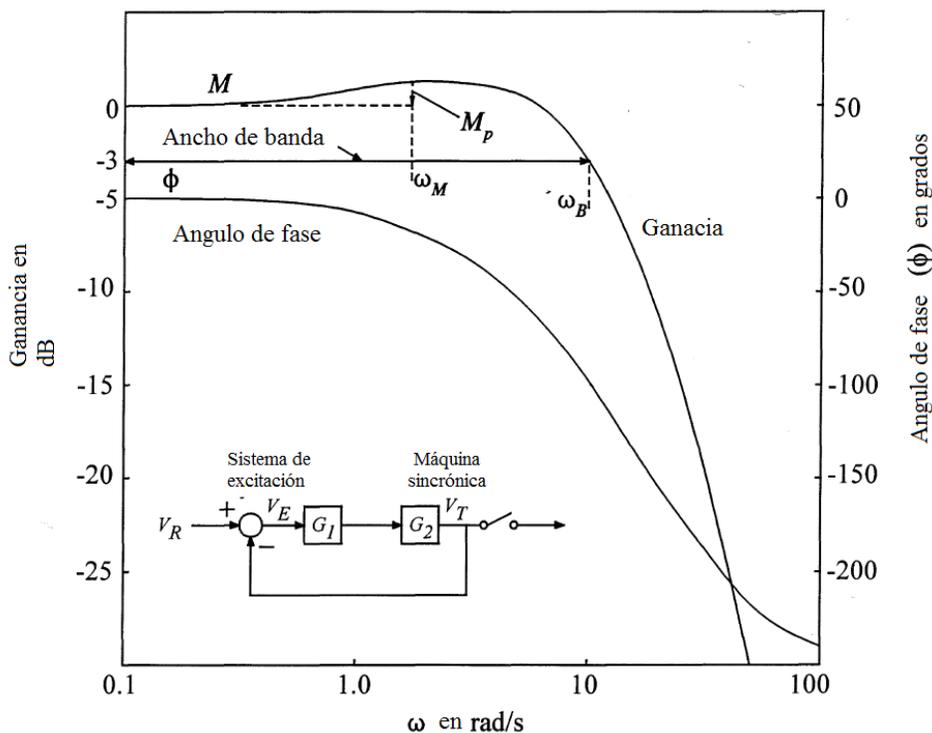


Figura 2.5. Respuesta típica de frecuencia de los sistemas de excitación en lazo cerrado, para el generador en vacío

Los índices más importantes asociados con el lazo cerrado son ω_B (ancho de banda) y el valor pico M_p . Un alto valor de M_p (>1.6) es indicativo de un sistema oscilatorio exhibiendo un gran sobrepaso en su respuesta transitoria. En general, M_p estará entre 1.1 y 1.5. (Kundur, 1994)

En relación al ancho de banda, se puede decir que un valor alto del mismo, indica una respuesta rápida. Estos resultados serán retomados nuevamente más adelante.

Otro tipo de estudio que se hace para la respuesta de pequeña señal es el que se lleva cabo en el dominio de la frecuencia compleja (plano-S). Bajo este análisis, las características dinámicas pueden ser representadas a través de un mapa de los valores propios (o raíces características) de su función de transferencia en el dominio S (o plano S). Las ubicaciones típicas de la raíces de un sistema de excitación se desarrolla abriendo la retroalimentación de voltaje y con la máquina trabajando en vacío. En la figura 2.6 se muestra como es la ubicación típica de las raíces características de un sistema de de excitación. La localización de las raíces en lazo abierto de los sistemas de excitación dependen directamente de las características de las funciones de transferencia G_1 y G_2 , la ganancia K en lazo directo no influye en esta localización, su mayor influencia se ve reflejada en el gráfico de lugar de las raíces en lazo cerrado.

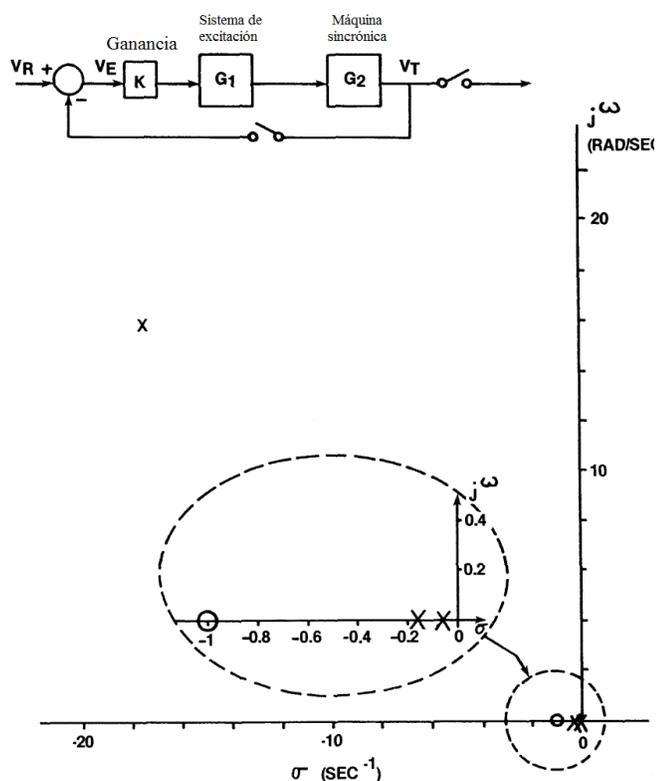


Figura 2.6. Ubicación típica de los polos y ceros de los sistemas de excitación en lazo abierto con la máquina trabajando en vacío

El criterio para este análisis establece que los polos que están más a la izquierda del eje $j\omega$ (vertical) representan modelos que son más rápidamente amortiguados que los modelos con polos más cerca del eje $j\omega$. Polos que están a la derecha del eje $j\omega$ representan un sistema inestable. (IEEE Std. 421.2, 1990)

2.4 PRUEBAS DINÁMICAS A LOS MODELOS DE LOS SISTEMAS DE EXCITACIÓN DEL GENERADOR SINCRÓNICO

En general, se aplican dos pruebas a los sistemas de excitación, las pruebas de respuesta en el tiempo y las pruebas de respuesta en frecuencia. La primera consiste en aplicar una señal de entrada que genere un transitorio (bien sea Escalón o impulso). En el caso de los sistemas de excitación, esta señal es inyectada a la entrada del voltaje de referencia V_{REF} . Al inyectar este transitorio se registra la respuesta a la salida del sistema, y se tendría entonces la información necesaria para obtener el tiempo de subida, el sobre disparo, entre otros. Si el sistema al que se le está ejecutando la prueba tiene un polo real dominante o un par de polos complejos dominantes (cerca de eje imaginario $j\omega$ en el plano S), una prueba de la respuesta transitoria podría ser útil para la medición de la posición de estos polos respecto al plano S .

La prueba en frecuencia consiste en inyectar una señal conocida en la entrada de prueba y medir su respuesta a la salida del sistema al que se le está ejecutando el ensayo, respecto a la señal de entrada. Existen distintos métodos para realizar estas pruebas, incluyendo métodos que utilizan señales sinusoidales y señales de ruido. La prueba en frecuencia tiene la ventaja que la función de transferencia del elemento bajo prueba es inmediatamente evidente.

Para el estudio de los modelos de los sistemas de excitación, el estándar IEEE 421.5 indica una serie de valores típicos de los parámetros de estos modelos, sin embargo, cada fabricante de los sistemas de excitación define un intervalo de valores para estos parámetros. Ahora bien, si se conoce el modelo en diagrama de bloques de un sistema físico, y si se aplica el estudio descrito anteriormente, se puede definir los valores que deben tener los parámetros del modelo

en estudio, de acuerdo a los límites de estabilidad de los sistemas de control. Justamente, bajo esta base se realizan las pruebas que se desarrollan a continuación. El estudio se realiza bajo la siguiente metodología:

- Se Define el modelo del sistema de excitación a utilizar, en donde se establecerán los parámetros de los elementos que lo conforman. También se define el modelo de la máquina síncrona a la que se alimentará a través de sistema de excitación
- Utilizando el software Matlab®, se monta el modelo del sistema (excitación y maquina) y se definen como valores iniciales de los parámetros, los definidos para el modelo del sistema de excitación en el estándar IEEE 421.5.
- Una vez que se tiene el modelo del sistema definido en el programa, se procede a realizar las pruebas descritas anteriormente, con la variación de los valores de cada uno de los parámetros por separado, para así definir el impacto de cada uno de ellos sobre el sistema de estudio.

Los modelos de los sistemas de excitación fueron definidos en el capítulo I, por lo que se trabajara con estos 6 modelos. También se utiliza el modelo lineal aproximado de la máquina síncrona en estas pruebas. La obtención de este modelo escapa a los objetivos de este trabajo, sin embargo, para una mayor información acerca de este se recomienda revisar la referencia (2).

2.4.1 Estudio dinámico a los modelos de los modelos de sistemas de excitación

La definición de cada uno de los componentes y el diagrama de bloques de cada uno de los modelos, se desarrolló en el capítulo II, por lo que los estudios se hacen directamente sobre los elementos que conforman dichos modelos. Este estudio analiza el efecto de la variación de los

cada uno de los parámetros sobre el modelo completo del sistema que se este estudiando. En este primer análisis se trabaja sobre el modelo DC1A.

En principio hay que definir la configuración para el desarrollo de los estudios antes mencionados. La configuración es sencilla, desde el punto de vista de control simplemente es conectar el sistema de control (sistema de excitación) G_1 con la planta (generador) G_2 desarrollar los estudios a lazo abierto y lazo cerrado.

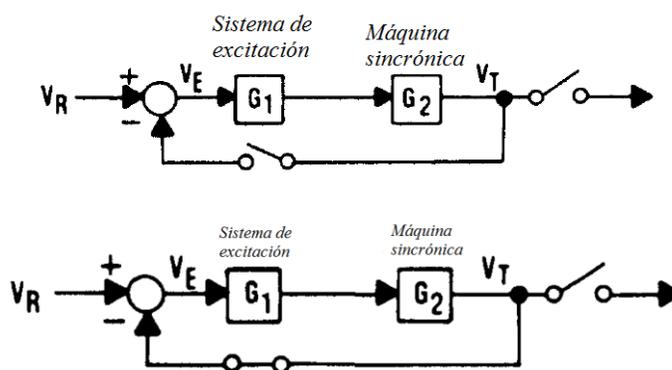


Figura 2.7. Sistema para el estudio dinámico a lazo abierto y lazo cerrado

La función G_1 será una función de transferencia que estará definida por el modelo del sistema de excitación con el que se trabaja para el análisis, en este caso será el modelos DC1A. A través del algebra de bloques se puede encontrar esta función de transferencia. Partiendo del sistema mostrado en la figura 1.24, y despreciando los circuitos limitadores y protección, así como también la saturación, se tendrá:

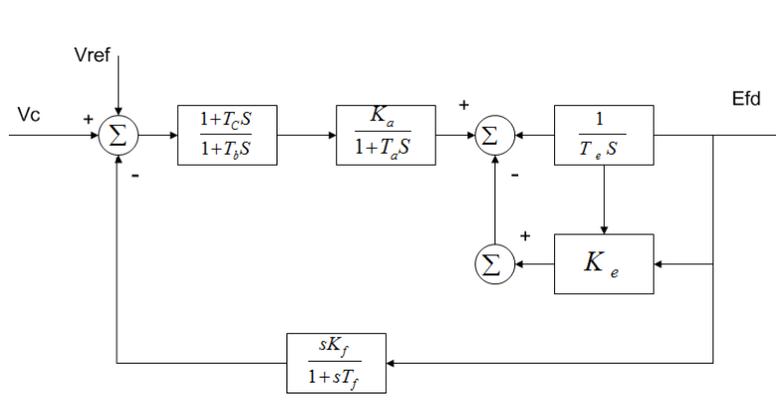


Figura 2.8. Diagrama de bloques para el análisis dinámico del sistema de excitación DC1A

La función G_2 representa el modelo lineal simplificado de la máquina sincrónica (figura 2.9).

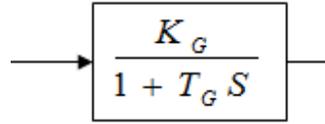


Figura 2.9. Modelo lineal simplificado de la máquina sincrónica

La función de transferencia para G_1 será:

$$G_1 = \frac{(1+T_f s) * K_a * (1+T_C s)}{(1+T_f s) * (T_e + K_e s) * (1+T_a s) * (1+T_b s) + K_f s * K_a} \quad (2.2)$$

....Para lazo abierto, la función de transferencia $G_1 * G_2$ será:

$$G_1 G_2 = \frac{(1+T_f s) * K_a * (1+T_C s) * K_G}{[(1+T_f s) * (T_e + K_e s) * (1+T_a s) * (1+T_b s) + K_f s * K_a] * (1+T_G s)} \quad (2.3)$$

Como se muestra en la figura 3.7, para lazo cerrado se usa realimentación unitaria por lo que la función de transferencia será

$$G_1 G_2 H = \frac{(1+T_f s) * K_a * (1+T_C s) * K_G}{[(1+T_f s) * (T_e + K_e s) * (1+T_a s) * (1+T_b s) + K_f s * K_a] * (1+T_G s) + (1+T_f s) * K_a * (1+T_C s) * K_G} \quad (2.4)$$

En donde $H=1$. Este procedimiento se realiza para cada una de los modelos de sistemas de excitación. La reducción de los sistemas se realizó para cada uno de los modelos de sistemas de excitación; con la función de transferencia obtenida se realizaron los análisis que se exponen más adelante en este mismo capítulo.

La función de transferencia de la ecuación 2.5 también es válida para los modelos DC2A y AC1A, ya que en estos análisis no se toma en cuenta los circuitos limitadores y de protección, así como tampoco la compensación del efecto desmagnetizante de la corriente I_{FD} (reacción de armadura) de los modelos AC (también se desprecia para los modelos ST)

...Las funciones de transferencia para los modelos AC2A para lazo abierto, 2.6 y lazo cerrado 2.7.

$$G_1 G_2 = \frac{K_a * K_B * (1+sT_C) * (1+sT_F) * K_G}{[(1+sT_b) * (1+sT_a) * (K_E + sT_E) + K_H * K_B] * (1+sT_F) + K_B * (1+sT_C) * K_a * sK_F] * (1+sT_G)} \quad (2.6)$$

$$G_1 G_2 H = \frac{K_a * K_B * (1+sT_C) * (1+sT_F) * K_G}{[(1+sT_b) * (1+sT_a) * (K_E + sT_E) + K_H * K_B] * (1+sT_F) + K_B * (1+sT_C) * K_a * sK_F] * (1+sT_G) + K_B * (1+sT_C) * (1+sT_F) * K_G} \quad (2.7)$$

Para el modelo ST1A, las funciones de transferencia en lazo abierto y lazo cerrado serán las ecuaciones 3.7 y 3.8, respectivamente.

$$G_1 G_2 = \frac{(1+sT_C) * (1+sT_{C1}) * K_A * (1+sT_F) * K_G}{[(1+sT_b) * (1+sT_{b1}) * (1+sT_a) * (1+sT_F) + (1+sT_C) * (1+sT_{C1}) * K_A * sK_F] * (1+sT_G)} \quad (2.8)$$

$$G_1 G_2 H = \frac{(1+sT_C) * (1+sT_{C1}) * K_A * (1+sT_F) * K_G}{[(1+sT_b) * (1+sT_{b1}) * (1+sT_a) * (1+sT_F) + (1+sT_C) * (1+sT_{C1}) * K_A * sK_F] * (1+sT_G) + (1+sT_C) * (1+sT_{C1}) * K_A * (1+sT_F) * K_G} \quad (2.9)$$

Las funciones de transferencia a lazo abierto (2.10) y a lazo cerrado (2.11) del modelo ST2A se muestran a continuación:

$$G_1 G_2 = \frac{K_a * (1+sT_F) * K_G}{[(1+sT_a) * (K_E + sT_E) * (1+sT_F) + K_a * sK_F] * (1+sT_G)} \quad (2.10)$$

$$G_1 G_2 H = \frac{K_a * (1+sT_F) * K_G}{[(1+sT_a) * (K_E + sT_E) * (1+sT_F) + K_a * sK_F] * (1+sT_G) + K_a * (1+sT_F) * K_G} \quad (2.11)$$

Otra forma de obtener la función de transferencia es a través de ecuaciones de estado. Si se conocen las ecuaciones diferenciales que definen un sistema, en función de sus variables de entrada y de salida, se puede representar ese conjunto de ecuaciones diferenciales en forma matricial, donde $x(t)$ (entrada) será un vector $r \times 1$ e $y(t)$ (salida) será un vector $m \times 1$, por lo cual se tendrá

$$\dot{x}(t) = f(x(t), u(t)) \quad (2.12)$$

$$y(t) = g(x(t), u(t)) \quad (2.13)$$

En el caso de que el sistema sea lineal entonces las ecuaciones de estado podrán escribirse de la forma:

$$\dot{x}(t) = A(t) * x(t) + B(t) * u(t) \quad (2.14)$$

$$y(t) = C(t) * x(t) + D(t) * u(t) \quad (2.15)$$

Donde las matrices $A(t)$, $B(t)$, $C(t)$, y $D(t)$ son, en el caso general, matrices variantes en el tiempo de dimensiones $A(t)$: $n \times n$, $B(t)$: $n \times r$, $C(t)$: $m \times n$ y $D(t)$: $m \times r$. Una vez obtenido el sistema en variables de estado, y siendo el sistema lineal e invariante en el tiempo, se aplica la transformada de Laplace a las ecuaciones de representación de estado, de donde se tiene:

$$sX(s) - x(0) = A * X(s) + B * U(s) \quad (2.16)$$

$$Y(s) = C * X(s) + D * U(s) \quad (2.17)$$

La función de transferencia da la relación que existe entre la entrada y la salida de un sistema, por lo tanto:

$$sX(s) - A * X(s) = B * U(s) + x(0) \quad (2.18)$$

$$(sI - A) * X(s) = B * U(s) + x(0) \quad (2.19)$$

$$X(s) = (sI - A)^{-1} * B * U(s) + (sI - A)^{-1} x(0) \quad (2.20)$$

Sustituyendo en la ecuación de salida del sistema se obtiene:

$$Y(s) = C(sI - A)^{-1} B * U(s) + C(sI - A)^{-1} x(0) + D * U(s) \quad (2.21)$$

$$Y(s)=[C(sI-A)^{-1}+B+D]*U(s)+(sI-A)^{-1}X(0) \quad (2.22)$$

En esta expresión se observa que la salida del sistema es función, por una parte de la entrada de control al mismo y por otra, de las condiciones iniciales del sistema. Si se asume que las condiciones iniciales son nulas, la función de transferencia del sistema será:

$$F(s) = \frac{Y(s)}{U(s)} = C * (sI - A)^{-1} B + D \quad (2.23)$$

Como

$$(sI - A)^{-1} = \frac{1}{|sI - A|} \text{adj}(sI - A)^T \quad (2.24)$$

Se tiene que el polinomio característico del sistema es $[sI-A]$, y por tanto, los polos del sistema coinciden con los autovalores de la matriz A . (Luis Moreno,2003).

Una vez aclarado lo anterior se procederá a realizar el análisis dinámico de los modelos de sistemas de excitación, para esto se usarán los valores establecidos por la norma IEEE 421.5 para los parámetros de los sistemas de excitación (tabla 2.1).

Tabla 2.1. Valores recomendados por estándar para los parámetros de los sistemas de excitación en estudio

<i>Valores recomendados para los parametros de los sistemas de excitación por el estandar IEEE</i>						
<i>Modelo</i>						
<i>Parametro</i>	<i>DC1A</i>	<i>DC2A</i>	<i>AC1A</i>	<i>AC2A</i>	<i>ST1A</i>	<i>ST2A</i>
<i>Tc</i>	0	0	0	0	1	
<i>Tc1</i>					0	
<i>Tb</i>	0	0	0	0	1	
<i>Tb1</i>					0	
<i>Ka</i>	46	300	400	400	210	120
<i>Ta</i>	0.06	0.01	0.02	0.01	0	0.15
<i>Ke</i>	comp.	1	1	1		1
<i>Te</i>	0.46	1.33	0.8	0.6		0.5
<i>Kf</i>	0.1	0.1	0.03	0.03	0	0.05
<i>Tf</i>	1	0.675	1	1	0	1
<i>Kh</i>				1		
<i>Kb</i>				25		

Estudio dinámico del sistema, en base a la variación de los parámetros T_c y T_b del bloque adelanto-atraso de fase. En primer lugar, se analiza la variación de la ubicación de los polos el lugar de las raíces del sistema.

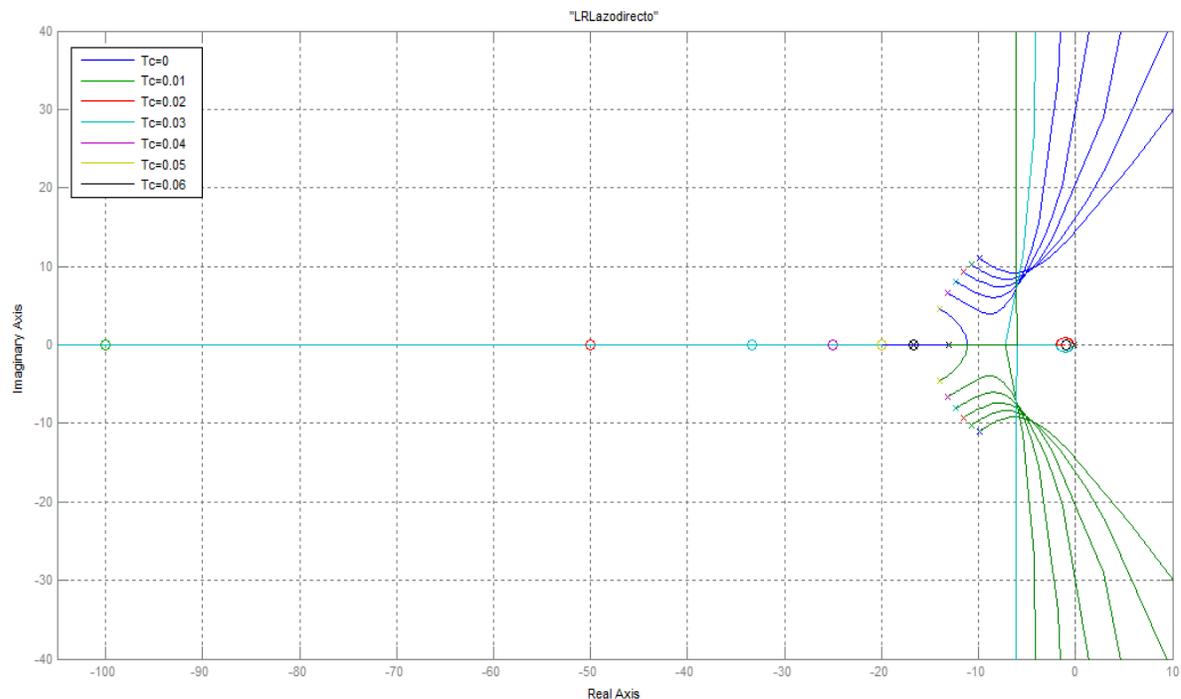


Figura 2.10. Lugar de las raíces del modelo de sistema de excitación conectado al modelo de la maquina sincrónica, en lazo abierto

En la figura 2.10 se observa como para valores menores de $T_c < 0.04$ se debe tener cuidado, ya que el sistema pudiera llegar a ser inestable (específicamente para ganancias ≤ 586), es por eso que se pueden recomendar valores de $T_c \geq 0.04$ seg. Por encima de este valor se crean polos cada vez más lejanos del eje $j\omega$, lo que mejora la respuesta amortiguada del sistema. El diagrama de BODE se estudia tanto para lazo abierto como para lazo cerrado. En lazo abierto, para cualquier valor de T_c el margen de ganancia se encuentra por encima de 6 dB (inclusive con $T_c=0$ seg), como se indica en la figura 2.11. En relación al margen de fase, cualquier valor de T_c satisface el criterio de ser mayor de 40° , sin embargo, para valores mayores de 1 hacen que este comience a disminuir, estabilizándose en valores cercanos a 50° , solo estando por debajo de 40° para valores mucho más grandes de 100seg. En la figura 2.12 se muestra la tendencia antes mencionada. La frecuencia de corte ω_c mantiene un valor pequeño, lo cual no cumple con las condiciones de control, y así se varié T_c , no se impacta directamente sobre este

valor, es decir, esta condición no se ve mejorada a través de variaciones de T_c . Del análisis a lazo cerrado se obtienen valores de M_p mayores a 1.5, aumentando a medida que aumenta T_c , por lo que este valor tampoco es mejorado a través de este parámetro, al igual que el ancho de banda ω_b

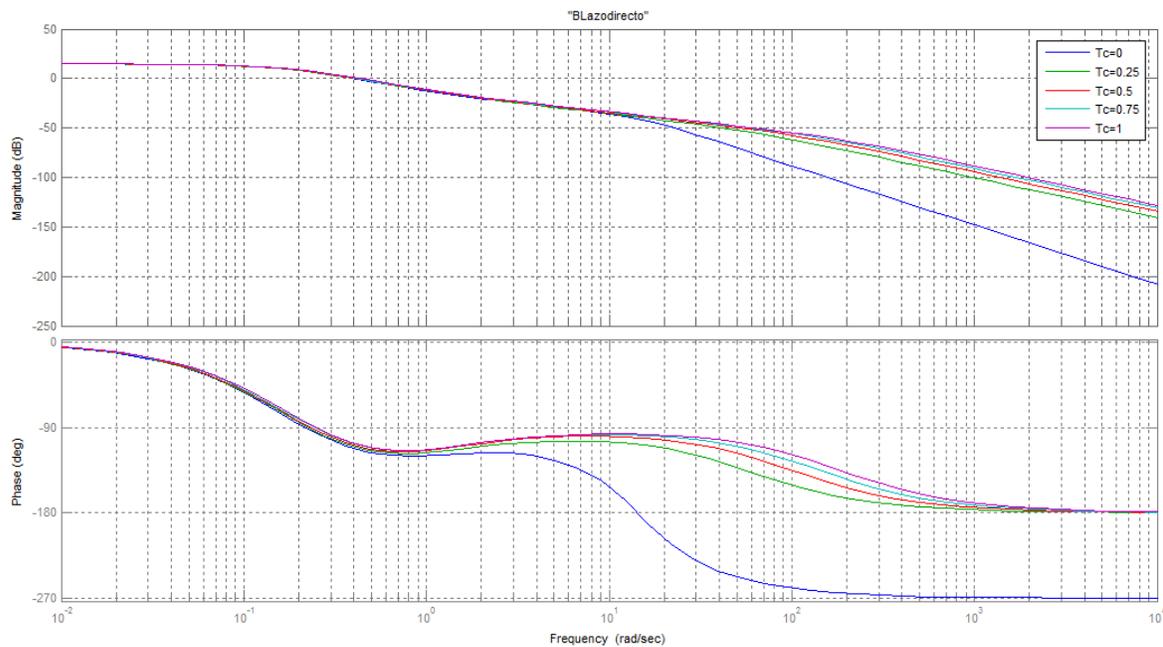


Figura 2.11. Diagrama de Bode del sistema a lazo abierto, para variaciones de T_c .

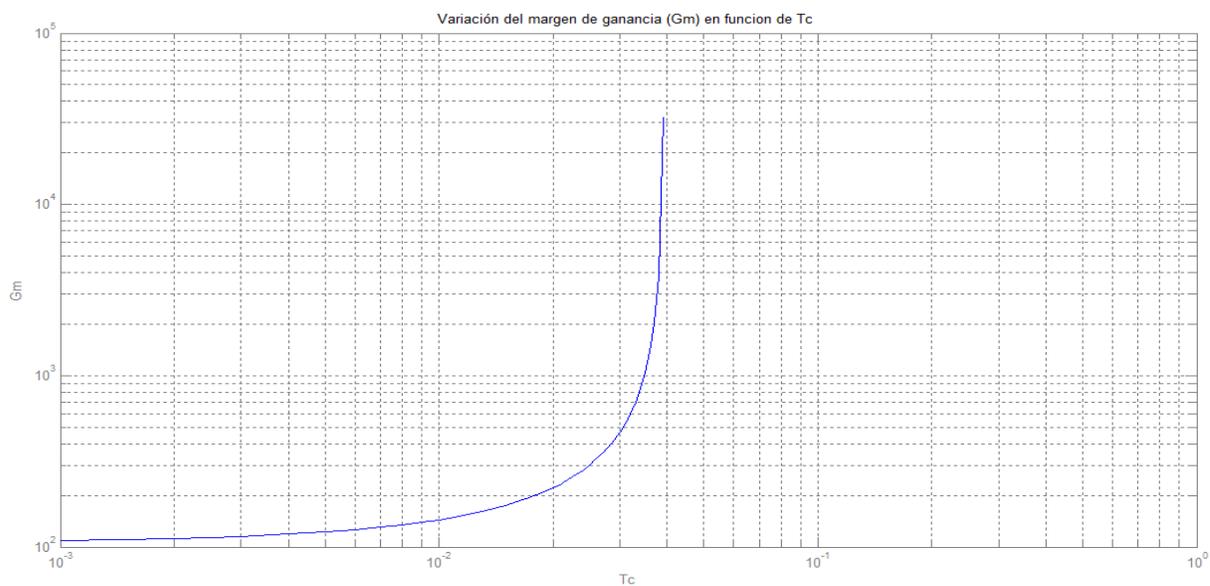


Figura 2.12. Variación de Gm vs T_c .

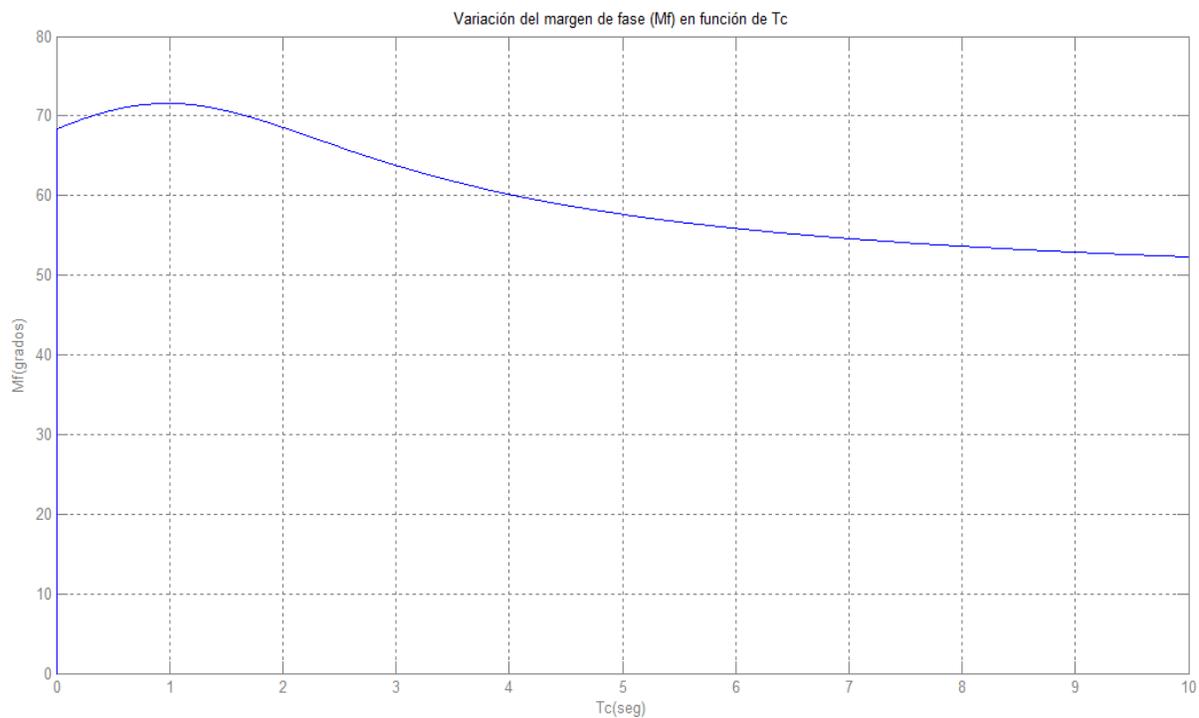


Figura 2.13. Variación de Mf vs Tc

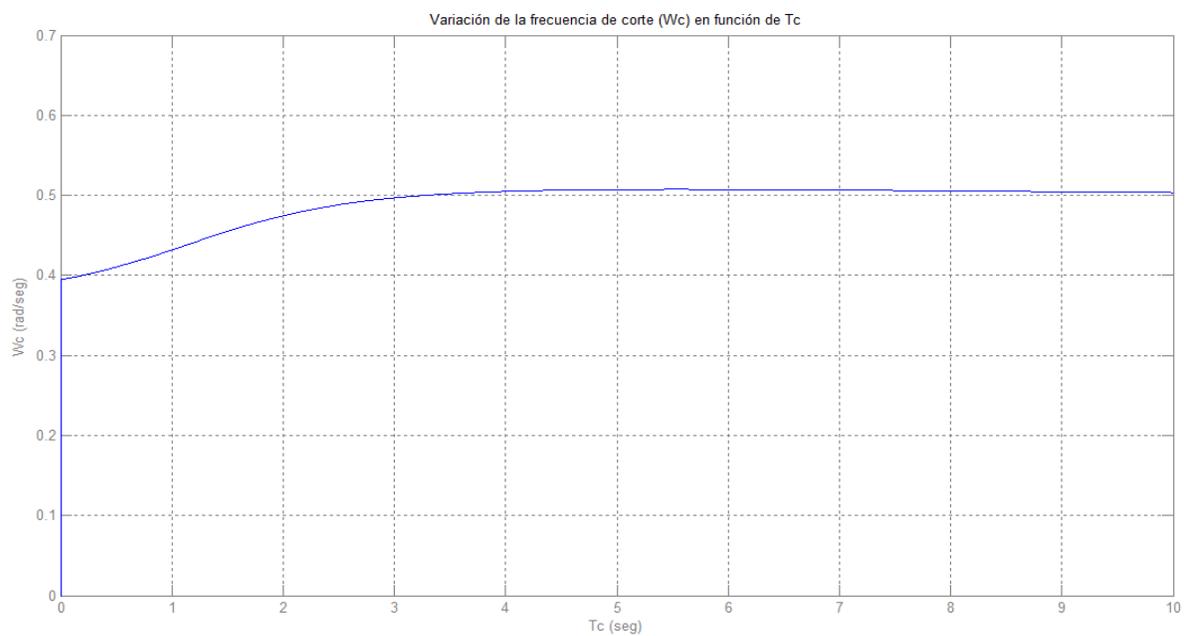


Figura 2.14. Variación de W_c vs Tc.

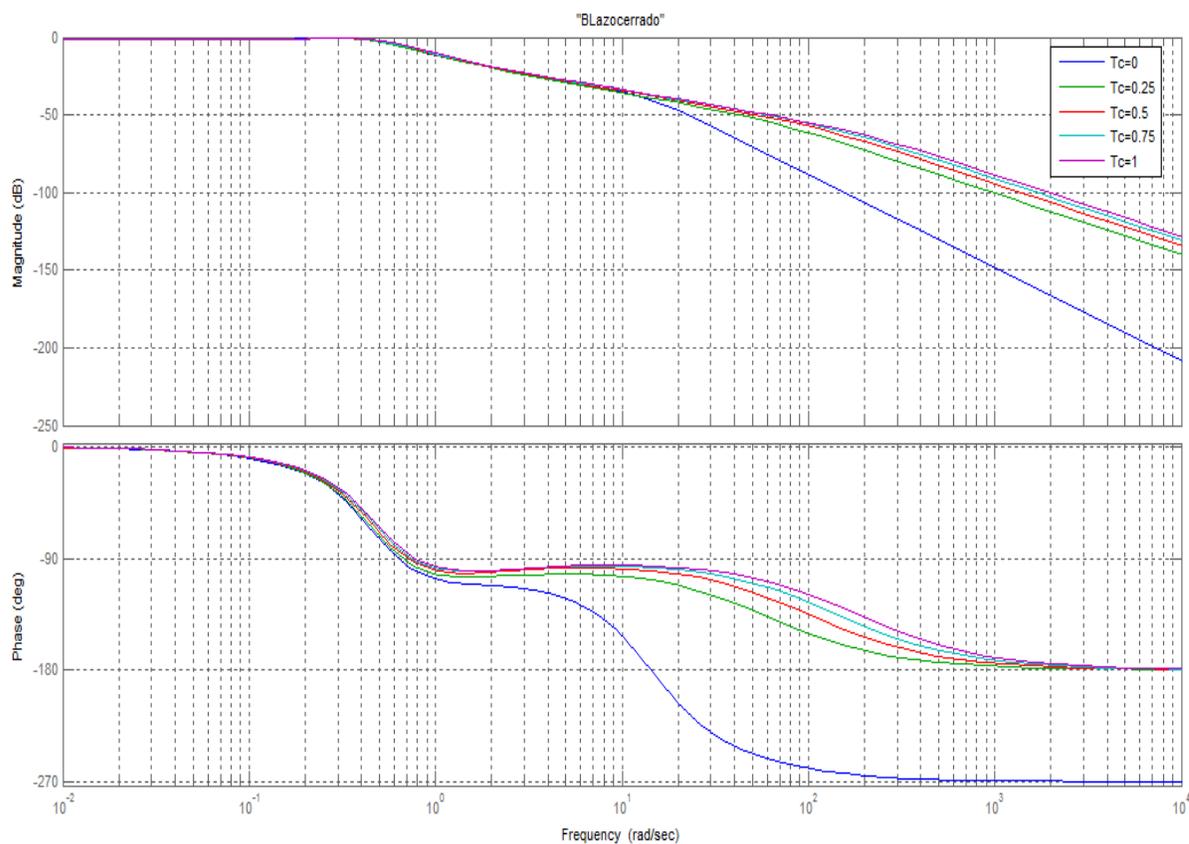


Figura 2.15. Diagrama de Bode del sistema a lazo cerrado, para variaciones de T_c

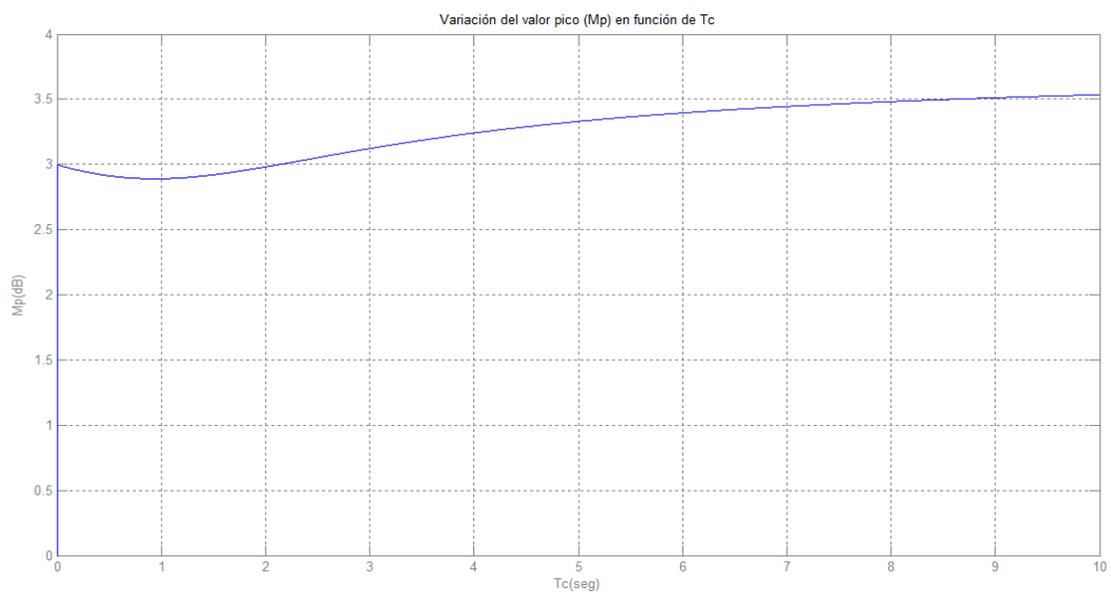


Figura 2.16. Variación de M_p vs T_c

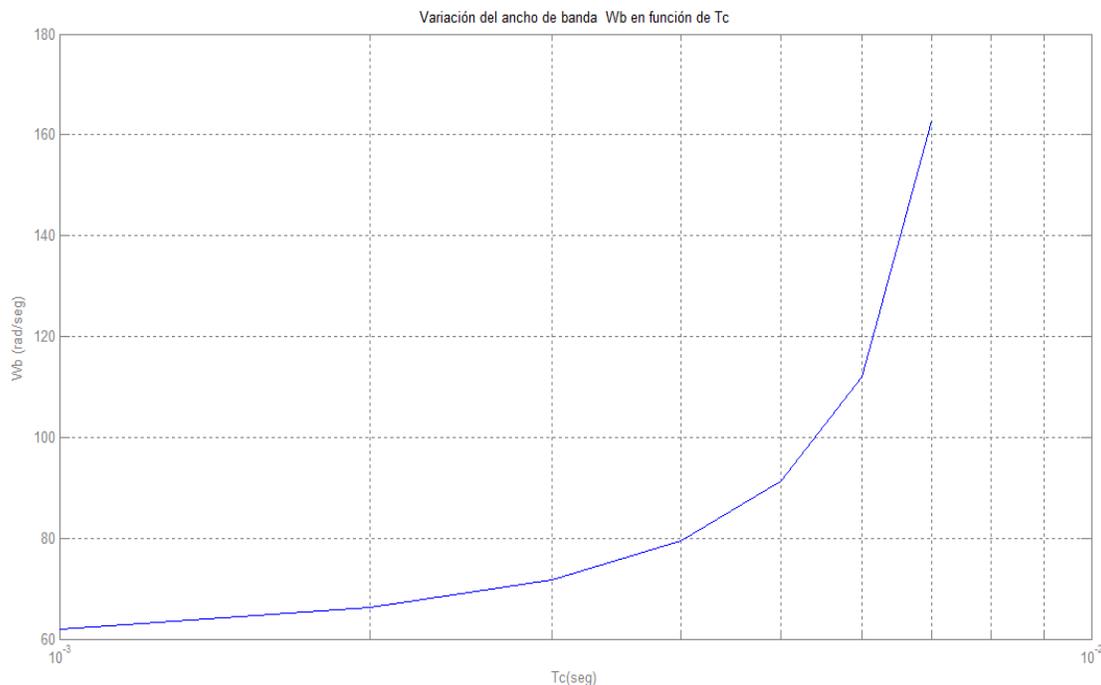


Figura 2.17. Variación de ω_b vs T_c

Una vez realizado el análisis del diagrama de Bode, se realiza el último análisis, como lo es la respuesta del sistema en el tiempo. En este caso a partir de un valor de $T_c \geq 2.62$ el sobre disparo supera el 15% del valor de estado estacionario, valor sugerido para el diseño de sistemas de control. El valor de T_r tiende a disminuir a medida que aumenta el valor de T_c , estabilizándose en un valor cercano a 1.4seg; por otro lado T_s presenta un comportamiento algo peculiar, este disminuye a medida que se aumenta T_c , pero justamente al T_c alcanzar un valor alrededor de 2.62seg, T_s empieza a aumentar, tendencia que se mantiene para valores de $T_c > 2.62$ seg, por lo que este valor se define como valor límite de T_c . Cabe recordar que el elemento que se está trabajando representa un compensador en adelanto o atraso de fase, según sea la relación entre T_c y T_b . En este análisis se partió de que ambos valores son iguales a cero, por lo que a lo largo de la prueba se tiene que $T_c > T_b$, lo que indica que es compensador en adelanto de fase. Para valores de $T_c \approx 3 + T_b$ se consigue el valor límite de 15% de sobre disparo, lo cual representa una condición de funcionamiento para este compensador en modo de adelanto de fase

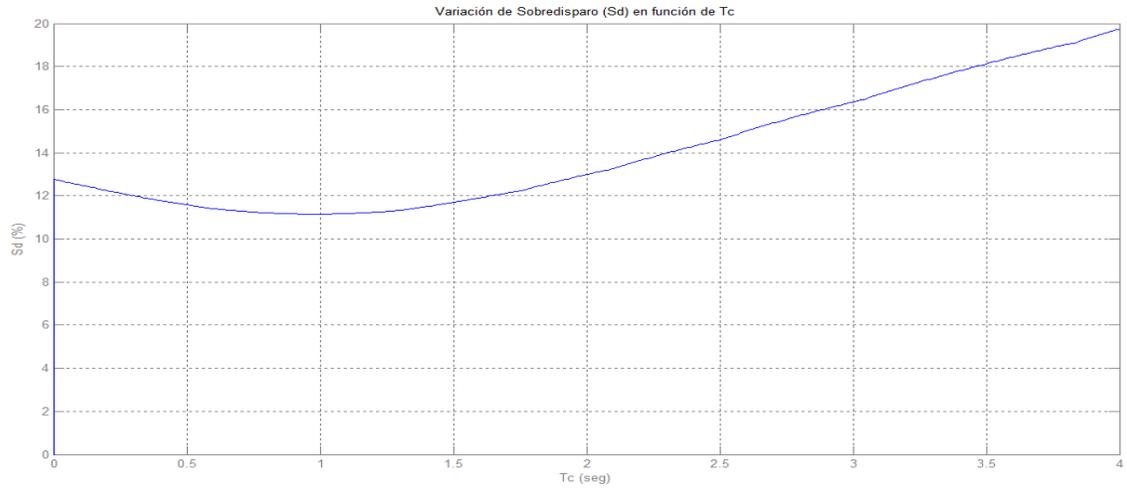


Figura 2.18. Variación de Sd vs Tc.

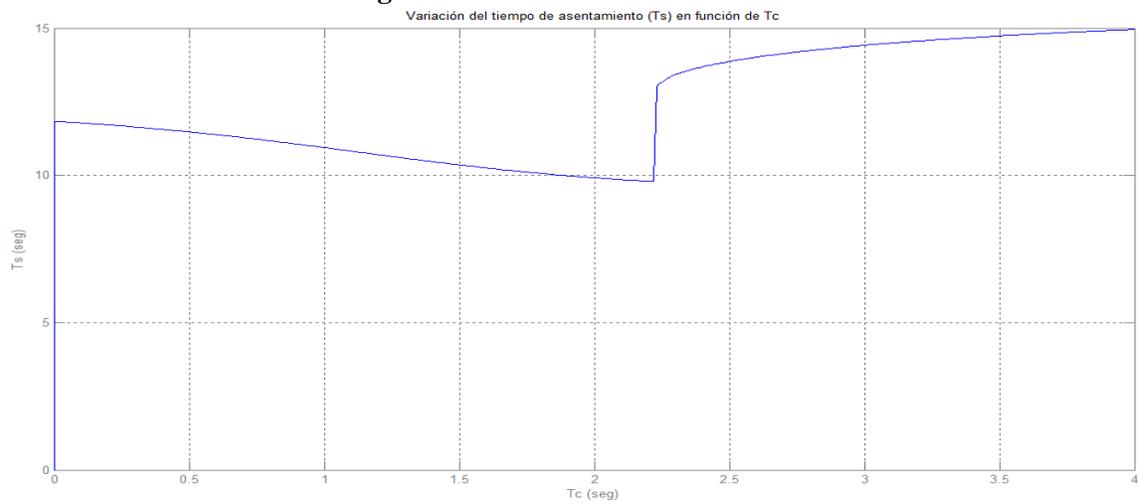


Figura 2.19. Variación de Ts vs Tc.

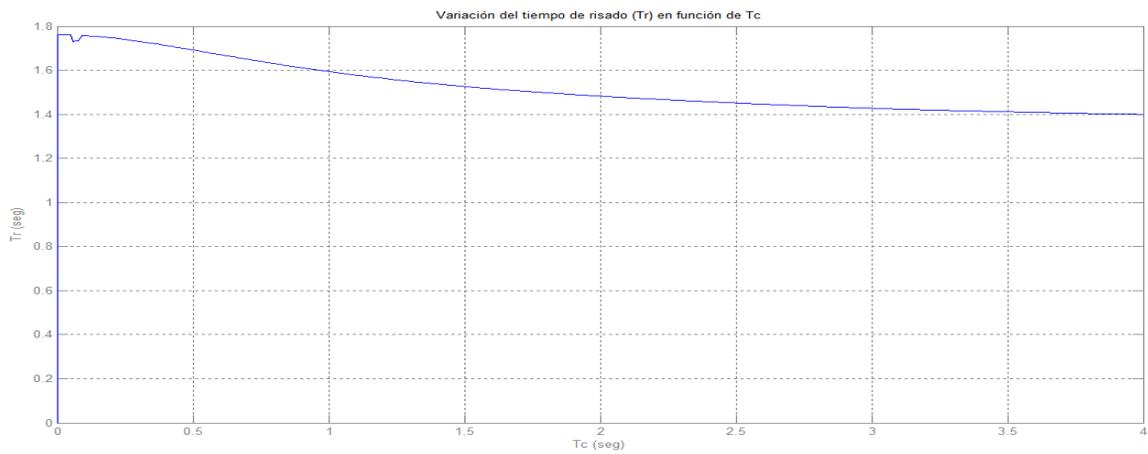


Figura 2.20. Variación de Tr vs Tc.

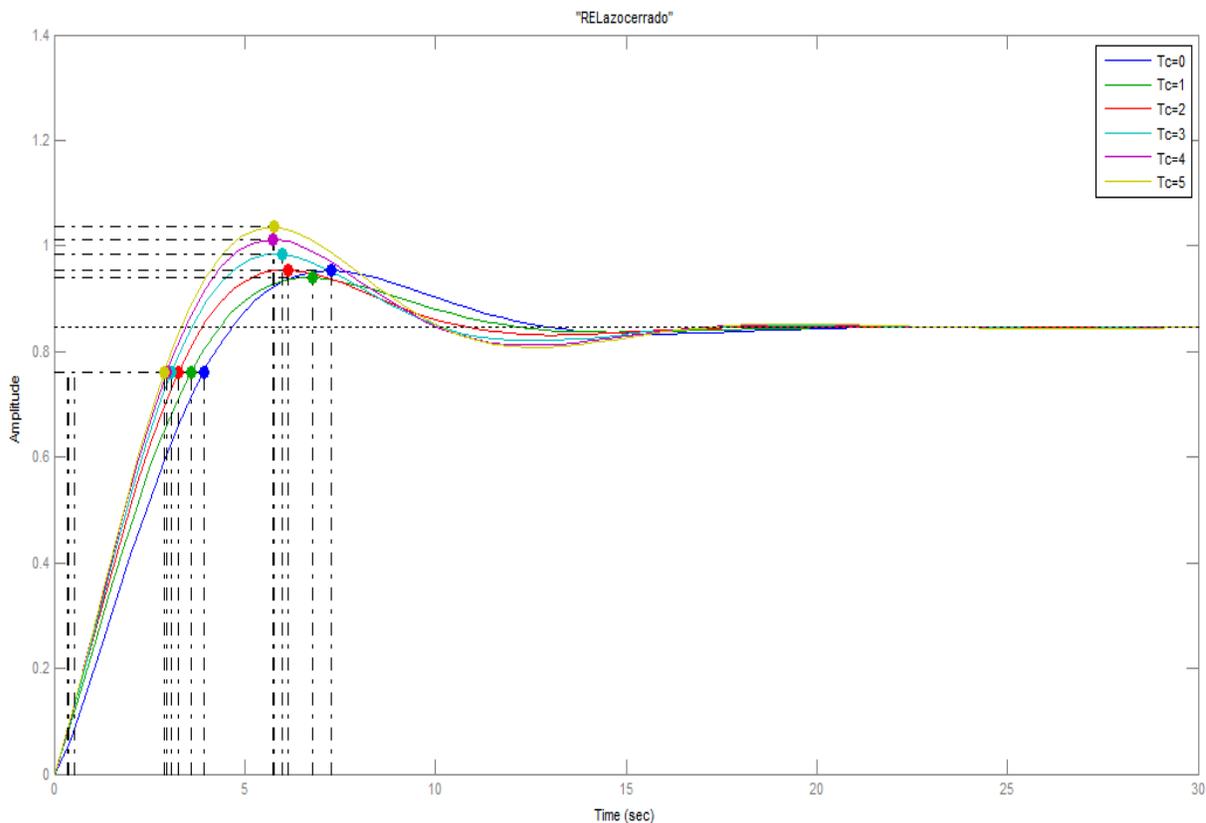


Figura 2.21. Respuesta en tiempo del sistema para diferentes valores de T_c .

A partir del análisis anterior se puede plantear un cuadro resumen del mismo, en donde se expone como es el comportamiento de los índices más significativos desde el punto de sistemas de control y cuál sería el intervalo de valores recomendando para el parámetro en estudio.

Tabla 2.2. Tabla resumen del análisis dinámico

EFECTOS DE LOS PARAMETROS DE LOS SISTEMAS DE EXCITACIÓN SOBRE LOS ÍNDICES DE CONTROL											
ELEMENTO	PARAMETRO	POLOS	M_g	M_f	ω_c	M_p	ω_b	T_r	T_s	S_d	INTERVALO
COMP. ADELANTO O ATRASO	T_c	$0 \leq T_c \leq 0.039$ con $G \leq 587$ estable $0.04 < T_c$ estable	$0 \leq T_c$ Mg alto	$0 \leq T_c$ Mf alto	$0 \leq T_c$ ω_c bajo	$0 \leq T_c \leq 1$ baja M_p $1 < T_c$ Sube M_p	$0 \leq T_c$ Sube ω_b	$0 \leq T_c$ T_r bajo	$0 \leq T_c < 2.4$ baja T_s $2.4 \leq T_c$ sube T_s	$0 \leq T_c \leq 1.3$ baja S_d $1.3 < T_c < 2.62$ sube S_d dentro del 15%	$0.04 \leq T_c \leq 2.62$ para $T_c \geq T_b$

En la tabla 2.2 se muestra en forma resumida todo el análisis dinámico expuesto anteriormente, y con base en este, se da un intervalo en donde podrán ser manejados el valor

de T_c con la certeza de estar dentro de los límites recomendados para la estabilidad de los sistemas de control. En adelante se mostrará un cuadro resumen por modelo de excitación, con el análisis de cada uno de los parámetros que lo conforman, así como también una tabla en donde se muestran las tendencias de los índices de control al aumentar los valores de estos parámetros.

Tabla 2.3. Comportamiento de los índices de control con aumentos de los parámetros del modelo de excitación DC1A

INDICE	T_c	T_b	K_a	T_a	K_e	T_e	K_f	T_f
M_g								
M_f								
ω_c								
M_p								
ω_b								
T_r								
T_s								
S_d								

Tabla 2.4. Tabla resumen del análisis dinámico al modelo DC1A de los sistemas de excitación

EFFECTOS DE LOS PARÁMETROS DE LOS SISTEMAS DE EXCITACIÓN SOBRE LOS ÍNDICES DE CONTROL (DC1A)											
ELEMENTO	PARÁMETRO	POLOS	Mg	Mf	ωc	Mp	ωb	Tr	Ts	Sd	INTERVALO
COMP. ADELANTO O ATRASO	Tc	0≤Tc≤0.039 con G≤S87 estable 0.04<Tc estable	0≤Tc Mg alto	0≤Tc Mf alto	0.04≤Tc G alta	0≤Tc≤1 baja Mp 1<Tc Sube Mp	0≤Tc Sube ωb	0≤Tc Tr bajo	0≤Tc<2.4 baja Ts 2.4≤Tc sube Ts	0≤Tc≤1.3 baja Sd 1.3<Tc<2.62 sube Sd; Sd<15%	0.04≤Tc≤2.62 para Tc≥Tb
	Tb	0≤Tb crea polos cerca del origen; hay que estudiar la Gcrit.	0≤Tb≤7 baja Mg 7≤Tb sube Mg	0≤Tb≤7 baja Mf 7≤Tb sube Mg	0≤Tb baja G (valores bajos)	0≤Tb≤6 Sube Mp 6<Tb Baja Mp	0<Tb Baja ωb	0≤Tb≤0.4 baja Tr 0.4<Tb sube Tr	0≤Tb sube Ts	0≤Tb≤1 sube Sd hasta el 15% Tb>7 Sd baja	0≤Tb≤1 para Tb≥Tc
AMP. DEL AVR	Ka	0≤Ka crea polos alejándose del eje real; hay que estudiar Gcrit	0<Ka baja Mg (valores altos)	0<Ka baja Mf (valores altos)	10≤Ka Sube G (valores bajos)	0<Ka Sube Mp (valores bajos)	0<Ka Sube ωb (valores bajos)	0<Ka baja Tr	0<Ka≤12 Ts baja 12<Ka Ts sube	0≤Ka<5 Sd ctte 5≤Ka sube Sd Ka=62 Sd>15%	10≤Ka<62 hay que estudiar el sistema
	Ta	0≤Ta crea polos acercándose al eje jw; hay que estudiar Gcrit	0<Ta≤8.6 baja Mg 8.6<Ta sube Mg (valores bajos)	0<Ta≤7.1 baja Mf 7.1<Ta sube Mf	0<Ta baja G (valores bajos)	0<Ta≤7 Sube Mp 7<Ta Baja Mp (valores bajos)	0<Ta Baja ωb (valores bajos)	0<Ta≤0.4 baja Tr 0.4<Ta sube Tr	0<Ta sube Ts	0≤Ta<6.8 sube Sd 6.8≤Ta baja Sd Ta≈1.57 Sd>15%	0<Ta≤1.57 hay que estudiar el sistema
EXCITADOR	Ke	0≤Ke crea polos alejándose del eje jw; hay que estudiar la Gcrit	0≤Ke sube Mg	0≤Ke sube Mf	0≤Ke sube G	0≤Ke Baja Mp (valores bajos)	0≤Ke Sube Mp	0≤Ke sube Tr	0<Ke≤3.5 baja Ts 3.5<Ke sube Ts	0<Ke baja Sd Ke<0.68 Sd<15%	0.68<Ke≤3.5 hay que estudiar el sistema
	Te	0<Te crea polos acercándose a los ejes jw y real; hay que estudiar la Gcrit	0.2<Te≤2 baja Mg 2<Te sube Mg (valores altos)	0.<Te≤7 baja Mf 7<Te sube Mf (valores altos)	0.<Te baja G (valores bajos)	0≤Te≤6.5 Sube Mp 6.5<Te Baja Mp (valores bajos)	0<Te Baja ωb (valores bajos)	0≤Te sube Tr	0≤Te sube Ts	0<Te≤8.9 sube Sd 8.9<Te baja Sd Te<1.5 Sd<15%	0≤Te<1.5 hay que estudiar el sistema
COMP. DE EXCITACIÓN	Kf	0<Kf crea polos alejándose a los ejes jw y real; hay que estudiar la Gcrit	0≤Kf baja Mg (valores altos)	0≤Kf baja Mf (valores altos)	0.<Kf baja G (valores bajos)	0≤Kf<0.2 Sube Mp 0.2≤Kf Baja Mp	0<Kf Sube ωb	0≤Kf sube Tr	0≤Kf sube Ts	0<Kf≤0.17 sube Sd 0.17<Kf baja Sd 2.24>Kf Sd=0	0<Kf hay que estudiar el sistema
	Tf	0<Tf crea polos acercándose a los ejes jw y real; hay que estudiar la Gcrit	0≤Tf≤0.01 sube Mg 0.01<Tf baja Mg (valores altos)	0≤Tf sube Mf (valores altos)	0≤Tf≤0.01 sube G 0.01<Tf baja G (valores bajos)	0<Tf Baja Mp (valores bajos)	0<Tf≤0.2 Sube ωb 0.2<Tf Baja ωb	0≤Tf≤0.25 sube Tr 0.25<Kf baja Tr	0≤Tf baja Ts	0<Tf baja Sd 0.77<Tf Sd<15%	0.77<Tf hay que estudiar el sistema

Tabla 2.4. Comportamiento de los índices de control con aumentos de los parámetros del modelo de excitación DC2A (AC1A).

INDICE	T_c	T_b	K_a	T_a	K_e	T_e	K_f	T_f
M_g								
M_f								
ω_c								
M_p								
ω_b								
T_r								
T_s								
S_d								

La topología de los dos modelos estudiados es igual, sin embargo, el estándar IEEE 421.5 especifica valores típicos para sus parámetros diferentes, es por eso que los resultados obtenidos para el modelo DC1A no son aplicables al DC2A. Ahora bien, en los modelos de excitación de corriente alterna (AC) y estáticos (ST) se trabaja con rectificadores electrónicos (ver capítulo I), estos introducen elementos al modelo de los excitadores en cuestión. Sin embargo, el impacto introducido por los rectificadores viene dado directamente por el efecto de la corriente I_{FD} . En este análisis, por ser esta señal un lazo interno del sistema de excitación, y por ser una variable que no es controlada directamente por el sistema, se desprecia, por lo que $I_{FD}=0$, con lo cual la señal que se le multiplica a la salida V_E será igual a 1 (primer estado de operación de los rectificadores), por lo tanto $V_E=E_{FD}$.

Tabla 2.6. Tabla resumen del análisis dinámico al modelo DC2A (AC1A) de los sistemas de excitación

EFFECTOS DE LOS PARÁMETROS DE LOS SISTEMAS DE EXCITACIÓN SOBRE LOS ÍNDICES DE CONTROL (DC2A) (AC1A)											
ELEMENTO	PARÁMETRO	POLOS	Mg	Mf	ωc	Mp	ωb	Tr	Ts	Sd	INTERVALO
COMP. ADELANTO O ATRASO	Tc	0<Tc crea polos sobre el eje real, alejándose de jw	0≤Tc sube Mg (valores altos)	0≤Tc<1.1 sube Mf 1.1≤Tc baja Mf	0<Tc sube ωc (valores altos)	0≤Tc<10 Baja Mp 10≤Tc Sube Mp (valores bajos)	0≤Tc Sube ωb	0≤Tc Tr baja Tc>20 Tr ctte	0≤Tc<1.9 baja Ts 1.9≤Tc sube Ts	0≤Tc≤1 baja Sd 1<Tc sube Sd; Sd>15%	0≤Tc≤1,9 para Tc≥Tb hay que estudiar el sistema
	Tb	0≤Tb crea polos cerca del origen; hay que estudiar la Gcrit.	0<Tb baja Mg	0≤Tb≤2 baja Mf 2≤Tb Mg<40º	0<Tb baja ωc (valores bajos)	0≤Tb Sube Mp	0<Tb Baja ωb (valores bajos)	0≤Tb≤3.5 baja Tr 3.5<Tb sube Tr	0≤Tb sube Ts	0≤Tb≤31 sube Sd Sd>15%	2≤Tb≤3.5 para Tb≥Tc hay que estudiar el sistema
AMP. DEL AVR	Ka	0≤Ka crea polos alejándose del eje real; hay que estudiar Gcrit	0<Ka baja Mg (valores altos)	10≤Ka baja Mf (valores altos)	10≤Ka Sube ωc	20≤Ka Sube Mp	20≤Ka Sube ωb	0.2<Ka baja Tr	0<Ka≤8.6 Ts baja 8.6<Ka Ts sube	0≤Ka<4 Sd =0 4≤Ka sube Sd Ka>36 Sd>15%	10≤Ka<36 hay que estudiar el sistema
	Ta	0≤Ta crea polos acercándose al eje jw y alejándose del real; hay que estudiar Gcrit	0.01<Ta baja Mg (valores altos)	0<Ta≤30 baja Mf 30<Ta sube Mf Ta>3 Mf<40º	0<Ta baja ωc (valores bajos)	0≤Ta Sube Mp (valores bajos)	0<Ta Baja ωb (valores bajos)	0<Ta≤3.3 baja Tr 3.3<Ta sube Tr	0<Ta sube Ts	0≤Ta<34 sube Sd 34≤Ta baja Sd Sd>15%	0.<Ta≤3.3 hay que estudiar el sistema
EXCITADOR	Ke	0≤Ke crea polos alejándose del eje jw y del eje real; hay que estudiar la Gcrit	0≤Ke sube Mg	0≤Ke sube Mf	0≤Ke sube ωc	0<Ke Baja Mp (valores bajos)	0≤Ke Sube ωb	0≤Ke sube Tr	0<Ke≤35 baja Ts 35<Ke sube Ts	0<Ke baja Sd Ke>7 Sd<15%	7<Ke≤35 hay que estudiar el sistema
	Te	0<Te crea polos acercándose a los ejes jw y real; hay que estudiar la Gcrit	0<Te sube Mg (valores altos)	0.<Te≤21 baja Mf 21<Te sube Mf 18≤Te≤24 Mf<40º	0.<Te baja ωc (valores bajos)	0≤Te Sube Mp (valores bajos)	0<Te Baja ωb	0≤Te sube Tr	0≤Te sube Ts	0<Te≤20 sube Sd 20<Te baja Sd Sd>15%	0<Te<18 hay que estudiar el sistema
COMP. DE EXCITACIÓN	Kf	0<Kf crea polos alejándose del eje real; hay que estudiar la Gcrit	0≤Kf sube Mg (valores altos)	0≤Kf sube Mf Kf>0.2 Mf>40º	0.<Kf sube ωc (valores altos)	0<Kf Baja Mp (valores bajos)	0≤Kf Sube ωb (valores altos)	0≤Kf sube Tr	0≤Kf sube Ts	0<Kf baja Sd Kf>0.48 Sd<15% Kf>2 Sd=0	0.48<Kf hay que estudiar el sistema
	Tf	0<Tf crea polos acercándose a los ejes jw y real; hay que estudiar la Gcrit	0≤Tf≤0.01 sube Mg 0.01<Tf baja Mg (valores altos)	0≤Tf sube Mf Tf>0.54 Mf>40º	0≤Tf baja ωc (valores altos)	0<Tf≤11.5 Baja Mp 11.5<Tf Sube Mp (valores bajos)	0<Tf Baja ωb	0≤Tf baja Tr	0<Tf≤7 baja Ts 7<Tf≤17 Sube Ts Tf>17 baja Ts	0<Tf≤6 baja Sd 6<Tf<10 Sd=0 10≤Tf sube Sd 2<Tf<18 Sd<15%	2<Tf<18 hay que estudiar el sistema

En relación al modelo AC1A, si no se toma en cuenta el efecto de los rectificadores, es básicamente el modelo DC2A (ya que tampoco se toman en cuenta los limitadores para este análisis, única diferencia entre el DC1A y el DC2A). Ya que los valores recomendados para el AC1A son cercanos a los recomendados para el DC2A, el análisis de este último es aplicable al modelo AC1A. A continuación se muestra los valores que recomienda el estándar IEEE 421.5 para los modelos estudiados en este trabajo.

Tabla 2.5. Comportamiento de los índices de control con aumentos de los parámetros del modelo de excitación AC2A.

INDICE	T_c	T_b	K_a	T_a	K_e	T_e	K_f	T_f	K_b	K_h
M_g										
M_f										
ω_c										
M_p										
ω_b										
T_r										
T_s										
S_d										

Tabla 2.8. Tabla resumen del análisis dinámico al modelo AC2A de los sistemas de excitación.

EFECTOS DE LOS PARÁMETROS DE LOS SISTEMAS DE EXCITACIÓN SOBRE LOS INDICES DE CONTROL (AC2A)											
ELEMENTO	PARÁMETRO	POLOS	Mg	Mf	wc	Mp	wb	Tr	Ts	Sd	INTERVALO
COMP. ADELANTO O ATRASO	Tc	0<Tc crea polos sobre el eje real, alejándose de jw y cero cerca del origen	0≤Tc sube Mg (valores altos)	0≤Tc<0.7 sube Mf 0.7≤Tc baja Mf	0<Tc sube wc (valores altos)	0<Tc≤0.9 Baja Mp 0.9<Tc Sube Mp (valores bajos)	0≤Tc Sube wb (valores altos)	0<Tc≤9.6 baja Tr 9.6<Tc Sube Tr Tc=20 Tr ctte	0≤Tc<1.5 baja Ts 1.5≤Tc sube Ts	0<Tc≤0.8 baja Sd 0.8<Tc sube Sd; Sd>15%	0≤Tc para Tc≥Tb hay que estudiar el sistema
	Tb	0≤Tb<0.04 crea polos en el semi plano derecho; 0.04≥Tb hay que estudiar la Gcrit.	0<Tb≤0.2 baja Mg 0.2<Tb Sube Mg	0<Tb baja Mf 5.8≤Tb Mg<40º	0<Tb baja wc	0≤Tb Sube Mp (pico en Tb=0.09)	0<Tb≤0.08 Sistema inestable 0.08<Tb Baja wb	0<Tb≤0.7 baja Tr 0.7<Tb sube Tr	0≤Tb sube Ts	0<Tb≤0.08 sistema inestable 0.08<Tb Sube Sd Sd>15%	0.08<Tb≤5.8 para Tb≥Tc hay que estudiar el sistema
AMP. DEL AVR	Ka	0≤Ka crea polos alejándose de los ejes real y jw ; hay que estudiar Gcrit	0<Ka baja Mg (valores altos)	0<Ka baja Mf (valores altos)	0<Ka20 Sistema inestable 20≤Ka Sube wc	0<Ka Sube Mp (valores bajos)	0≤Ka<20 Sistema inestable 20<Ka Sube wb	0≤Ka<20 sube Tr 20>Ka Baja Tr	0<Ka≤440 Ts baja 440<Ka Ts sube	10≤Ka<30 Sd =0 4≤Ka sube Sd Ka>180 Sd>15	20≤Ka<180 hay que estudiar el sistema
	Ta	0≤Ta crea polos acercándose a los eje jw y real; hay que estudiar Gcrit	0<Ta≤1.6 baja Mg 1.6<Ta Sube Mg	0≤Ta baja Mf 5.7<Ta Mf<40º	0<Ta baja wc	0<Ta Sube Mp (valores bajos)	0<Ta Baja wb	0≤Ta sube Tr	0≤Ta sube Ts	0≤Ta sube Sd Sd>15	0.<Ta≤5.7 hay que estudiar el sistema
EXCITADOR	Ke	0≤Ke crea polos alejándose del eje jw y acercándose al eje real; hay que estudiar la Gcrit	0≤Ke sube Mg	0≤Ke sube Mf	0≤Ke Sube wc	0<Ke Baja Mp	0≤Ke Sube wb	0≤Ke sube Tr	0≤Ke sube Ts	0<Ke baja Sd Sd>15	0<Ke hay que estudiar el sistema
	Te	0<Te crea polos sobre el eje real acercándose aL ejes jw; hay que estudiar la Gcrit	0<Te baja Mg	0.<Te baja Mf 70<Te Mf<40º	0.<Te baja wc (valores bajos)	0<Te Sube Mp	0<Te baja wb	0<Te≤12 baja Tr 12<Tr	0≤Te sube Ts	0<Te sube Sd Sd>15%	0<Te<18 hay que estudiar el sistema
COMP. DE EXCITACIÓN	Kf	0<Kf crea polos alejándose del eje real; y acercándose al eje jw; hay que estudiar la Gcrit	0≤Kf sube Mg (valores altos)	0≤Kf<0.08 sube Mf 0.08≤Kf<0.13 bajaMf 0.13≤Kf Mf sube	0.<Kf baja wc (valores altos)	0<Kf Baja Mp (valores bajos)	0<Kf Sube wb	0≤Kf sube Tr	0≤Kf sube Ts	0<Kf≤0.03 baja Sd 0.03<Kf≤0.09 Sube Sd 0.09<Kf Baja Sd Kf>0.4 Sd<15%	0.4<Kf hay que estudiar el sistema
	Tf	0<Tf crea polos acercándose a los ejes jw y real; hay que estudiar la Gcrit	0≤Tf baja Mg	0≤Tf<2.3 sube Mf Tf>02.3 Baja Mf Tf<0.6 Mf>40º	0≤Tf baja wc (valores altos)	0<Tf≤3,78 Baja Mp 3.78<Tf Mp sube	0<Tf Baja wb	0≤Tf baja Tr	0<Tf baja Ts	0<Tf≤3 baja Sd 3<Tf sube Sd 1.4<Tf<5.8 Sd<15%	1.4<Tf<5.8 hay que estudiar el sistema
COMP.	Kb	0<Tc crea polos que se aleján de jw y el eje real; hay que estudiar la Gcrit.	0≤Tc sube Mg (valores altos)	0≤Kb sube Mf Mf>40º	0<Kb sube wc	0<Kb Sube Mp (casi constante)	0≤Kb Sube wb	0<Kb sube Tr	0<Kb≤2 baja Tr 2<Kb Sube Tr Tc≈ctte	0<Kb Sd ctte Sd>15%	0≤Kb hay que estudiar el sistema
	Kh	0≤Tb<0.04 crea polos alejándose del eje jw; y acercándose al eje real; hay que estudiar la Gcrit	0<Kh sube Mg	0<Kh≤1.4 baja Mf 1.4<Kh Mg>40º	0<Kh sube wc	0≤Kh baja Mp	0≤Kh sube wb	0≤Kh sube Tr	0≤Kh sube Ts	0<Tb baja Sd Kh>6.1 Sd<15%	0<Kh≤6.1 hay que estudiar el sistema

Tabla 2.6. Comportamiento de los índices de control con aumentos de los parámetros del modelo de excitación ST1A.

INDICE	T_c	T_b	T_{c1}	T_{b1}	K_a	T_a	K_f	T_f
M_g								
M_f								
ω_c								
M_p								
ω_b								
T_r								
T_s								
S_d								

Tabla 2.7. Tabla resumen del análisis dinámico al modelo ST2A de los sistemas de excitación

INDICE	K_a	T_a	K_e	T_e	K_f	T_f
M_g						
M_f						
ω_c						
M_p						
ω_b						
T_r						
T_s						
S_d						

EFFECTOS DE LOS PARÁMETROS DE LOS SISTEMAS DE EXCITACIÓN SOBRE LOS ÍNDICES DE CONTROL (ST1A)

ELEMENTO	PARÁMETRO	POLOS	Mg	Mf	ωc	Mp	ωb	Tr	Ts	Sd	INTERVALO
COMP. ADELANTO O ATRASO	Tc	0<Tc crea ceros sobre el eje real, acercándose a jw	0≤Tc Mg No varía (valores altos)	0≤Tc<3 sube Mf 3≤Tc baja Mf	0≤Tc ωc no varía	0≤Tc≤2.9 Baja Mp 2.9≤Tc≤3.1 Mp=ctte Tc<3.1 Sube Mp	0≤Tc ωb no varía	0≤Tc Tr baja Tc>27 Tr ctte	0≤Tc<13 baja Ts 13≤Tc sube Ts	0≤Tc<1 baja Sd 1≤Tc≤5.3 Sd=0 0.3<Tc Sd<15%	1≤Tc≤5.3 para Tc≥Tb
	Tb	0<Tb crea polos sobre el eje real, acercándose a jw	0≤Tb Mg no varía (valores altos)	0≤Tb baja Mf Mg>40e	0≤Tb ωc no varía	0≤Tb≤21 Sube Mp 21<Tb Baja Mp	0<Tb ωb no varía	0<Tb≤0.2 baja Tr 0.2<Tb sube Tr	0<Tb≤1.2 baja Ts 1.2<Tb Sube Ts	0≤Tb≤2 Sd=0 2<Tb<23 Sube Sd 7<Tb≤77 Sd>15%	0≤Tb≤2 para Tb≥Tc
COMP. ADELANTO O ATRASO	Tc1	0≤Tc1 crea ceros acercándose al eje real	0≤Tc1 Mg no varía (valores altos)	0≤Tc1 sube Mf (valores altos)	10≤Tc1 ωc no varía	0≤Tc1≤17 baja Mp 17<Tc1 Sube Mp (valores bajos)	0≤Tc1 ωb no varía	0<Tc1 sube Tr	0<Tc1 Sube Ts	0≤Tc1≤6 Sd=0 6≤Ta sube Sd Sd<15%	0≤Ka<6 Para Tc1>Tb1
	Tb1	0≤Ta crea polos acercándose al eje jw	0≤Tb1 Mg no varía (valores altos)	0<Tb1≤1 baja Mf 1<Tb1 sube Mf 2<Tb1<56 Mf<40e	0≤Tb1 ωc no varía	0≤Tb1≤6 Sube Mp 6<Tb1 Baja Mp (valores bajos)	0<Tb1 ωb no varía	0<Tb1 sube Tr	0<Tb1 sube Ts	0≤Tb1≤1 Sd=0 1<Tb1 sube Sd Sd>15%	0.<Tas1 Para Tb1>Tc1
AMP. DEL AVR	Ka	0≤Ka crea polos constantes sobre el eje real	0≤Ka Mg no varía (valores altos)	20<Ka baja Mf (valores altos)	0≤Ka ωc no varía	20<Ka Sube Mp (valores bajos)	0≤Ka ωb no varía	0≤Kas20 sube Tr 20<Ka Baja Ts	0<Kas20 sube Ts 20<Ke baja Ts	0<Ka Sd no varía Sd=0	20<Ka
	Ta	0<Te crea un polo sobre el eje real alejándose de eje jw	0<Ta Mg no varía (valores altos)	0.<Ta≤6 baja Mf 6<Ta sube Mf 2≤Te≤46 Mf<40e	0<Ta ωc no varía	0≤Tas5 Sube Mp 5<Mp Baja Mp (valores bajos)	0<Ta ωb no varía	0≤Ta sube Tr	0≤Ta sube Ts	0<Tas6 sube Sd 6<Te baja Sd Sd>15%	6<Ta
COMP. DE EXCITACIÓN	Kf	0<Kf crea polos sobre el eje real	0≤Kf sube Mg (valores altos)	0<Kf≤0.2 baja Mf Kf>0.2 sube Mf 0.3<Kf Mf>40e	0≤Kf ωc no varía	0<Tf≤0.2 sube Mp 2<Tf baja Mp (valores bajos)	0≤Kf ωb no varía	0≤Kf sube Tr	0≤Kf sube Ts	0.1<Kf≤2.3 baja Sd Kf>2.3 Sd=0	2.3<Kf hay que estudiar el sistema
	Tf	0<Tf crea polos y ceros acercándose al eje jw sobre el eje real	0≤Tf Mg no varía (valores altos)	0<Tf Mf no varía Mf>40e	0≤Tf baja ωc (valores altos)	0<Tf Mp ctte (valores bajos)	0≤Tf ωb no varía	0<Tf Tr no varía Ts ctte	0<Tf Ts no varía Ts ctte	0≤Tf Sd no varía Sd=0	2<Tf<18 hay que estudiar el sistema

Tabla 2.12. Tabla resumen del análisis dinámico al modelo ST2A de los sistemas de excitación.

EFFECTOS DE LOS PARÁMETROS DE LOS SISTEMAS DE EXCITACIÓN SOBRE LOS ÍNDICES DE CONTROL (ST2A)											
ELEMENTO	PARÁMETRO	POLOS	Mg	Mf	ωc	Mp	ωb	Tr	Ts	Sd	INTERVALO
AMP. DEL AVR	Ka	0<Ka crea polos sobre el eje real, alejándose de jw hay que estudiar la Gcrit	0≤Ka baja Mg	0<Ka baja Mf Mf>40º	0≤Ka Sube ωc	0≤Ka Sube Mp	0≤Ka Sube ωb	0<Ka Tr baja	0<Ka≤15 baja Ts 15<Ka≤20 sube Ts 20<Ka≤74 Baja Ts 74<Ka Sube Ts	0≤Ka<8 Sd=0 8≤Ka sube Sd 59<Ka Sd<15%	0≤Tc≤59 hay que estudiar el sistema
	Ta	0<Tb crea polos acercándose a los ejes real y jw hay que estudiar la Gcrit	0<Ta Baja Mg	0<Ta baja Mf 3.9<Ta Mg>40º	0<Ta Baja ωc	0≤Ta Sube Mp	0<Ta Baja ωb	0<Ta≤1.2 baja Tr 1.2<Ta sube Tr	0≤Ta sube Ts	0≤Ta Sube Sd Sd>15%	0≤Tb≤2 para Tb≥Tc hay que estudiar el sistema
EXCITADOR	Ke	0≤Ke crea polos alejándose de los ejes real y jw Hay que estudiar la Gcrit	0<Ke Sube Mg (valores altos)	0≤Ke sube Mf Mf>40º	0≤Ke Sube ωc	0<Ke baja Mp	0≤Ke sube ωb	0≤Ke sube Ts	0<Ke≤10 baja Ts 10<Ke Sube Ts	0<Ke Baja Sd 20≤Ke Sd=0 2.5<Ke Sd<15%	20≤Ka Hay que estudiar el sistema
	Te	0≤Te crea polos acercándose al eje jw y real; hay que estudiar la Gcrit	0<Te≤5 Baja Mg 5<Te Sube Mg	0<Te≤19 baja Mf 19<Te sube Mf 7<Te<36 Mf<40º	0≤Te Baja ωc	0≤Te≤19 Sube Mp 19<Te Baja Mp (valores bajos)	0<Te Baja ωb	0<Te≤2 baja Tr 2<Te Sube Tr	0<Te sube Ts	0≤Te≤19 Sube Sd 19<Te baja Sd Sd>15%	19<Te Hay que estudiar el sistema
COMP. DE EXCITACIÓN	Kf	0≤Kf crea polos alejándose de los ejes real y jw eje; hay que estudiar la Gcrit	0≤Kf Sube Mg (valores altos)	0≤Kf sube Mf Mf>40º	0≤Kf Sube ωc	0<Kf≤0.2 baja Mp 0.2<Kf Mp ctte (valores bajos)	0≤Kf Sube ωb	0<Kf sube Tr	0<Kf sube Ts	0<Kf≤1.2 Baja Sd 1.2<Kf Sd=0 0.4<Kf Sd<15%	20<Ka
	Tf	0<Te crea polos acercándose a los ejes real y jw; hay que estudiar Gcrit	0<Tf baja Mg	0.<Tf≤1.3 sube Mf 1.3<Ta baja Mf 0.4≤Tf≤3.4 Mf>40º	0<Tf baja ωc	0<Tf≤1.6 baja Mp 1.6<Mp sube Mp (valores bajos)	0<Tf Baja ωb	0≤Tf baja Tr	0<Tf≤1.6 baja Ts 1.6<Tf sube Ts	0<Tf≤1.3 baja Sd 1.3<Tf sube Sd Sd>15%	6<Ta

En virtud de estos resultados, se puede establecer un criterio que defina el impacto de la variación de cada uno de los parámetros sobre el comportamiento de los sistemas de excitación y así crear una guía de sintonización de dichos parámetros, en función de la respuesta de estos sistemas (en conjunto con la máquina), una vez conectados con los demás componentes del sistema de potencia. Retomando lo que se mencionó a comienzo del capítulo, se tiene que:

- Una frecuencia de corte (ω_c) y un ancho de banda (ω_b) que tengan valores altos representan un respuesta rápida del sistema de excitación.
- Valores altos del margen de fase (ϕ_m) y un margen de ganancia (M_g) por encima de 40° y 6dB respectivamente, mejora la estabilidad sobre el lazo de control.
- Un pico máximo (M_p) alto (mayor de 1.5dB) origina un sistema oscilatorio con un alto sobre disparo (S_d).
- Polos más a la izquierda (alejándose) del eje $j\omega$ hacen que el sistema sea más rápidamente amortiguado, es decir, se disminuye el tiempo de asentamiento (T_s).
- Polos más a la derecha (acercándose) del eje $j\omega$ hacen que el sistema sea más lentamente amortiguado, aumentando el T_s , inclusive pudiendo llegar a ser un sistema inestable.

Bajo estas premisas se pueden definir los impactos de las variaciones de los parámetros sobre el sistema en sí, no solo con la máquina trabajando en vacío, sino también con dicho sistema conectado al sistema de potencia.

De la tabla 2.13 se puede deducir que independientemente del modelo, el efecto de los parámetros es, en general, igual. La única diferencia se da al momento de cambiar los valores de estos y ver el efecto en conjunto, ya que el comportamiento sería el mismo, pero se tendrían otros límites de acción, es decir, otros valores límite para cumplir con los índices sugeridos para la estabilidad de un sistema de control. Usando estas tablas puede hacerse una primera sintonización de los parámetros, y posteriormente, tomando ya en cuenta los componentes no lineales y reales de la máquina y el sistema, se puede tener como base la tabla 2.13 para realizar una sintonización fina del excitador. Esto es analizado en el siguiente capítulo. IV.

Tabla 2.13. Impacto de la variaciones de los parámetros sobre los distintos modelos de sistemas de excitación.

IMPACTO DE LAS VARIACIONES DE LOS PARÁMETROS SOBRE LOS DISTITOS MODELOS DE SISTEMAS DE EXCITACIÓN							
MODELO PARÁMETRO	IMPACTO	DC1A	DC2A	AC1A	AC2A	ST1A	ST2A
Tc	POSITIVO	Mejora estabilidad sobre el lazo de control, Mejora el tiempo de respuesta	Mejora estabilidad sobre el lazo de control, Mejora el tiempo de respuesta	Mejora estabilidad sobre el lazo de control, Mejora el tiempo de respuesta	Mejora estabilidad sobre el lazo de control, Mejora el tiempo de respuesta	Mejora estabilidad sobre el lazo de control, Mejora el tiempo de respuesta, Dismuye las oscilaciones	
	NEGATIVO	Aumenta las oscilaciones y sobre disparo					
Tb	POSITIVO	Baja las oscilaciones y el sobre disparo					
	NEGATIVO	Desmejora la estabilidad sobre el lazo de control, Aumenta el tiempo de respuesta	Desmejora la estabilidad sobre el lazo de control, Aumenta el tiempo de respuesta, Aumentan las oscilaciones y el sobredisparo	Desmejora la estabilidad sobre el lazo de control, Aumenta el tiempo de respuesta, Aumentan las oscilaciones y el sobredisparo	Desmejora la estabilidad sobre el lazo de control, Aumenta el tiempo de respuesta, Aumentan las oscilaciones y el sobredisparo	Desmejora la estabilidad sobre el lazo de control, Aumenta el tiempo de respuesta, Aumentan las oscilaciones y el sobredisparo	
Tc1	POSITIVO					Aumento la estabilidad del lazo de control	
	NEGATIVO					Aumenta las oscilaciones y el sobredisparo	
Tb1	POSITIVO					Aumento la estabilidad del lazo de control, Disminuye las oscilaciones y el sobredisparo	
Ka	POSITIVO	Mejora el tiempo de respuesta		Mejora el tiempo de respuesta			
	NEGATIVO	Desmejora la estabilidad sobre el lazo de control, Aumenta las oscilaciones y el sobre disparo	Desmejora la estabilidad sobre el lazo de control, Aumenta las oscilaciones y el sobre disparo	Desmejora la estabilidad sobre el lazo de control, Aumenta las oscilaciones y el sobre disparo	Desmejora la estabilidad sobre el lazo de control, Aumenta las oscilaciones y el sobre disparo	Desmejora la estabilidad sobre el lazo de control, Aumenta las oscilaciones	Desmejora la estabilidad sobre el lazo de control, Aumenta las oscilaciones y el sobre disparo
Ta	POSITIVO	Disminuye las oscilacione	Disminuye las oscilacione	Disminuye las oscilacione	Disminuye las oscilacione	Disminuye las oscilacione	Disminuye las oscilacione
	NEGATIVO	Empeora la estabilidad sobre el lazo de control, Aumenta el tiempo de respuesta	Empeora la estabilidad sobre el lazo de control, Aumenta el tiempo de respuesta	Empeora la estabilidad sobre el lazo de control, Aumenta el tiempo de respuesta	Empeora la estabilidad sobre el lazo de control, Aumenta las oscilaciones y el tiempo de respuesta	Empeora la estabilidad sobre el lazo de control, Aumenta el tiempo de respuesta	Empeora la estabilidad sobre el lazo de control, Aumenta el tiempo de respuesta
Ke	POSITIVO	Mejora la estabilidad sobre el lazo de control	Mejora la estabilidad sobre el lazo de control	Mejora la estabilidad sobre el lazo de control	Mejora la estabilidad sobre el lazo de control		Mejora la estabilidad sobre el lazo de control
	NEGATIVO	Aumenta las oscilaciones y sobre dispar, Aumenta el tiempo de respuesta	Aumenta las oscilaciones y sobre disparo, Aumenta el tiempo de respuesta	Aumenta las oscilaciones y sobre disparo, Aumenta el tiempo de respuesta	Aumenta las oscilaciones, Aumenta el tiempo de respuesta		Aumenta las oscilaciones y sobre disparo, Aumenta el tiempo de respuesta
Te	POSITIVO	Disminuye el sobre disparo					
	NEGATIVO	Empeora la estabilidad sobre el lazo de control, Aumenta las oscilaciones y el tiempo de respuesta	Empeora la estabilidad sobre el lazo de control, Aumenta las oscilaciones y el tiempo de respuesta	Empeora la estabilidad sobre el lazo de control, Aumenta las oscilaciones y el tiempo de respuesta	Empeora la estabilidad sobre el lazo de control, Aumenta las oscilaciones y el tiempo de respuesta		Empeora la estabilidad sobre el lazo de control, Aumenta las oscilaciones y el tiempo de respuesta
Kf	POSITIVO	Mejora la estabilidad sobre el lazo de control, Mejora la respuesta del sistema de excitación, Disminuye la oscilaciones y el tiempo de asentamiento	Mejora la estabilidad sobre el lazo de control, Mejora la respuesta del sistema de excitación, Disminuye la oscilaciones y el tiempo de asentamiento	Mejora la estabilidad sobre el lazo de control, Mejora la respuesta del sistema de excitación, Disminuye la oscilaciones y el tiempo de asentamiento	Mejora la estabilidad sobre el lazo de control, Mejora la respuesta del sistema de excitación, Disminuye la oscilaciones y el tiempo de asentamiento	Disminuyo las oscilaciones y el sobredisparo	Mejora la estabilidad sobre el lazo de control, Mejora la respuesta del sistema de excitación, Disminuye la oscilaciones y el tiempo de asentamiento
	NEGATIVO					Aumento el tiempo de respuesta	
Tf	NEGATIVO	Disminuye la estabilidad sobre el lazo de control y Aumenta el tiempo de respuesta	Disminuye la estabilidad sobre el lazo de control y Aumenta el tiempo de respuesta	Disminuye la estabilidad sobre el lazo de control y Aumenta el tiempo de respuesta	Disminuye la estabilidad sobre el lazo de control y Aumenta el tiempo de respuesta		Disminuye las oscilaciones y el sobre disparo
Kb	POSITIVO				Mejora la estabilidad en el lazo de control, Mejora el tiempo de respuesta Bajo el sobre disparo		
	NEGATIVO				Aumento de oscilaciones		
Kh	POSITIVO				Mejora la estabilidad en el lazo de control, Mejora el tiempo de respuesta Bajo el sobre disparo, Disminuyo las oscilaciones		

2.5 INTRODUCCIÓN A LA OBTENCIÓN DE LOS PARÁMETROS DE LOS SISTEMAS DE EXCITACIÓN

Con el análisis hecho anteriormente se puede lograr una sintonización de los parámetros de los sistemas de excitación, sin embargo, la obtención estricta de estos parámetros es mucho más compleja. En principio, los ensayos generalmente realizados se basan en pruebas en sitio a los distintos modelos de excitación, es decir, se trabaja con el modelo que establece el estándar IEEE para el sistema de estudio, y a través de las pruebas en sitio se valida el modelo y los parámetros de los mismos, lo cual permite tener certeza de los parámetros con los que se definieron los elementos de estos sistemas.

Otro procedimiento, utiliza herramientas computacionales en donde, una vez conocida la forma y respuesta de los modelos, se puede identificar la función de transferencia que rige este modelo, y posteriormente las ecuaciones de estado del mismo. Una vez obtenidas estas ecuaciones, a través de un proceso de optimización se logra obtener la mejor combinación de valores para los parámetros de los modelos de los sistemas de excitación.

Existen diversos artículos en donde se utilizan herramientas matemáticas y estadísticas con el fin de obtener estos parámetros. Sin embargo, uno de los procedimientos más populares para estos estudios es la utilización de algoritmos genéticos para lograr esta obtención de parámetros.

CAPÍTULO III

MODELADO DE LOS SISTEMAS DE EXCITACIÓN DEL GENERADOR SINCRÓNICO CONECTADO AL SISTEMA DE POTENCIA UTILIZANDO PSAT Y NEPLAN®.

En este capítulo se definen los requerimientos de los sistemas de excitación, desde el punto de vista de la máquina síncrona y del sistema de potencia. Luego se plantean 5 simulaciones en donde se comprueba los resultados del capítulo anterior y posteriormente estudia el comportamiento de los sistemas de excitación para diferentes perturbaciones, así como dentro de un pequeño sistema de potencia; por último se analiza el efecto de la incorporación de los PSS como dispositivo de control de sistema de potencia. En este capítulo también se hace una introducción de los programas NEPLAN® y PSAT, con los cuales fueron elaboradas las simulaciones antes mencionadas.

3.1 REQUERIMIENTOS DE LOS SISTEMAS DE EXCITACIÓN DEL GENERADOR SINCRÓNICO

Antes de conectar el sistema de excitación al sistema de potencia (en conjunto con la máquina) se necesita tener claro cuáles son los requerimientos de estos sistemas de excitación, y así configurar la excitación para un funcionamiento correcto de los mismos. En este sentido, se tienen que tomar en cuenta los elementos que afecta de forma directa los sistemas de

excitación como loson la máquina síncronica y el sistema de potencia. Ambos exigirán un comportamiento específico del sistema de excitación que se encuentre relacionado a ellos.

3.1.1 Requerimientos de la máquina síncronica

El requerimiento básico es que el sistema de excitación provea y automáticamente ajuste la corriente de campo del generador para mantener el voltaje en terminales a un valor dado cuando la salida varíe entre la capacidad continua del generador. Los límites de capacidad del generador estarán definidos por las curvas en V del mismo, así como en el diagrama circular, en las cuales encuentra: (Kundur, 1994).

- Límite de corriente de armadura.
- Límite de calentamiento.
- Límite de corriente de campo

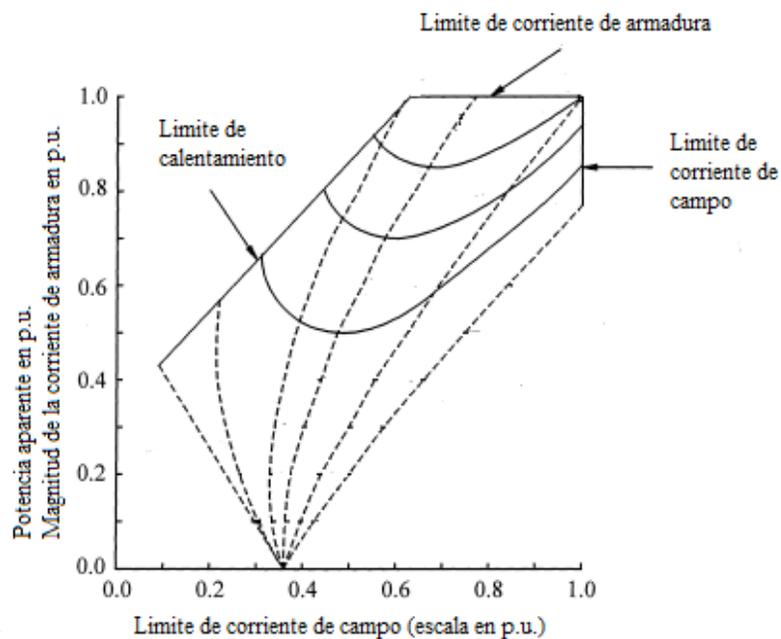


Figura 3.1. Curvas en V de la máquina síncronica

En adición, el sistema de excitación debe ser capaz de responder a disturbios transitorios con esfuerzos en el devanado de campo consistentes con las capacidades instantáneas y de corto plazo del generador. Las capacidades del generador están limitadas por varios factores como aislamiento y calentamiento del rotor (alto voltaje y alta corriente de campo respectivamente), calentamiento del estator (alta corriente de armadura), un calentamiento extremo bajo una operación de subexcitación y un calentamiento en una condición de exceso de flujo (V/Hz). Los límites térmicos tienen características dependientes del tiempo, y la capacidad de sobre carga de corto plazo puede durar desde quince hasta sesenta segundos. Para asegurar una mejor utilización del sistema de excitación, este debe ser capaz de sobreponer las necesidades del sistema tomando las ventajas de corto plazo del generador, sin exceder los límites

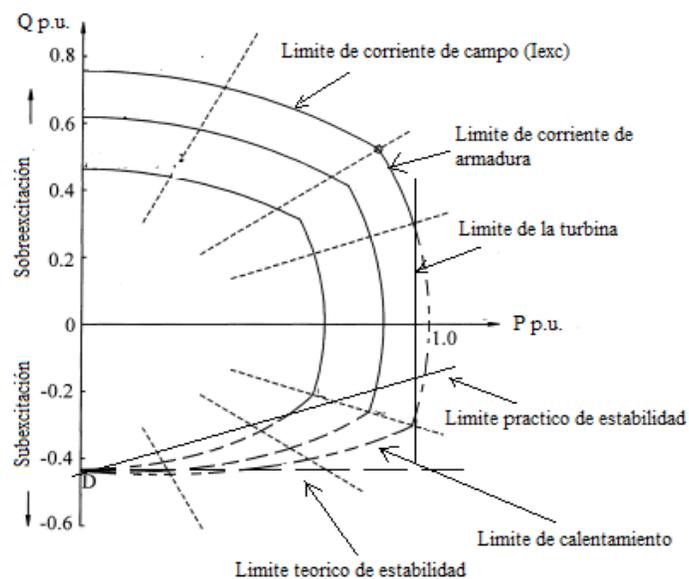


Figura 3.2. Curva de capacidad reactiva (diagrama circular) de la máquina síncrona

3.1.2 Requerimientos del sistema de potencia.

Desde el punto de vista de los sistemas de potencia, los sistemas de excitación deben contribuir al control efectivo de voltaje y a la mejora de la estabilidad del sistema. Debe ser

capaz de responder lo suficientemente rápido ante un disturbio para mejorar la estabilidad transitoria y de modular el campo del generador de manera que se mejore la estabilidad en pequeña señal. (Kundur, 1994).

En resumen, para cumplir con los requerimientos antes mencionados de manera satisfactoria, el sistema de excitación debe:

- Satisfacer un criterio de respuesta especificado.
- Proveer de funciones de limitación y protección, requeridas para prevenir el daño del generador y otros equipos.
- Satisfacer requerimientos específicos de flexibilidad de en la operación.
- Satisfacer fiabilidad y disponibilidad, por medio de la incorporación de detección de fallas internas y capacidad de aislamiento.

3.2 NOCIONES FUNDAMENTALES DE PSAT

El PSAT es un toolbox de programa MATLAB® para el análisis del comportamiento y control de sistemas de potencia. Este incluye flujo potencia, flujo de potencia continuado, flujo de potencia óptimo, análisis de estabilidad en pequeña señal, y análisis de simulaciones en el dominio del tiempo. El acceso a todas las operaciones puede hacerse desde la interface gráfica de usuario, así como también desde el área de trabajo de simulink a través de una librería gráfica que permite un desarrollo y diseño de sistemas de potencia de una manera más amigable para el usuario.

PSAT cuenta con diversos controles de la máquina sincrónica, entres estos están el gobernador de turbina, el regulador automático de tensión (AVR), estabilizador de sistemas de potencia (PSS), límite de sobre excitación y regulación secundaria de voltaje. Los sistemas de excitación están definidos dentro de los AVR, por lo que se trabaja en base a

estos a lo largo de las simulaciones. Específicamente, PSAT define tres tipos de excitadores, AVR tipo I, el cual parte del modelo estándar de AVR italianos (ENEL), AVR tipo II, que es el modelo tipo I del estándar IEEE (DC1A), y un AVR tipo III, que es utilizado para el desarrollo de evaluaciones de estabilidad. Todos estos modelos no pueden ser modificados en su topología, más si en el valor de los parámetros que los conforman. (Milano,2008).

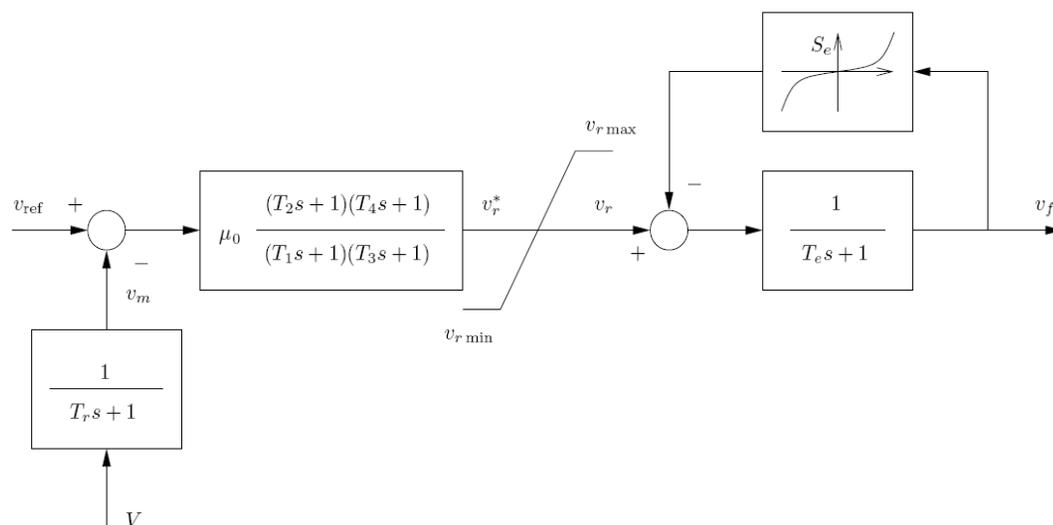


Figura 3.3. AVR tipo I de PSAT.

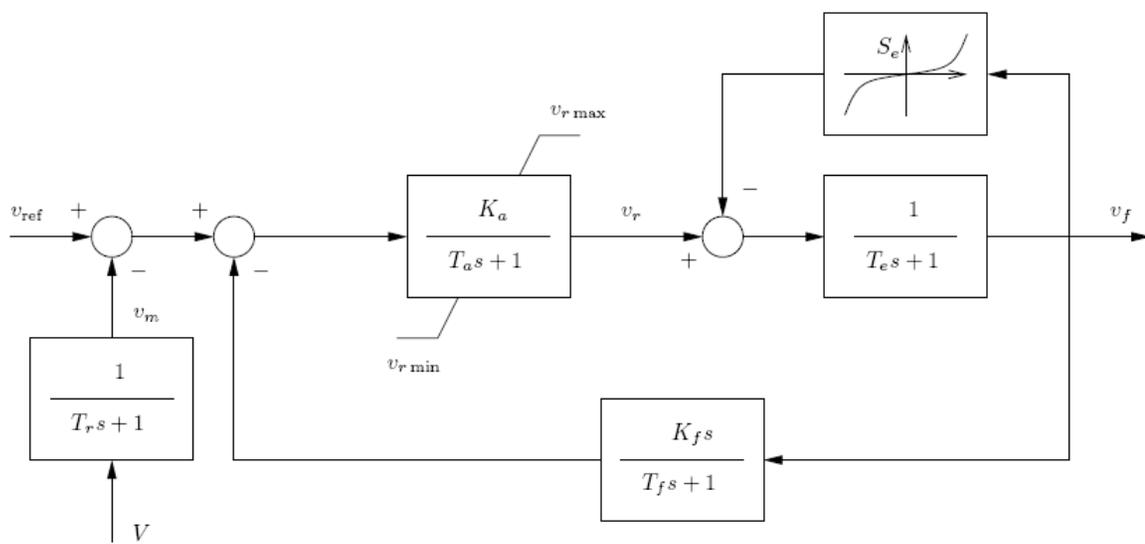


Figura 3.4. AVR tipo II PSAT

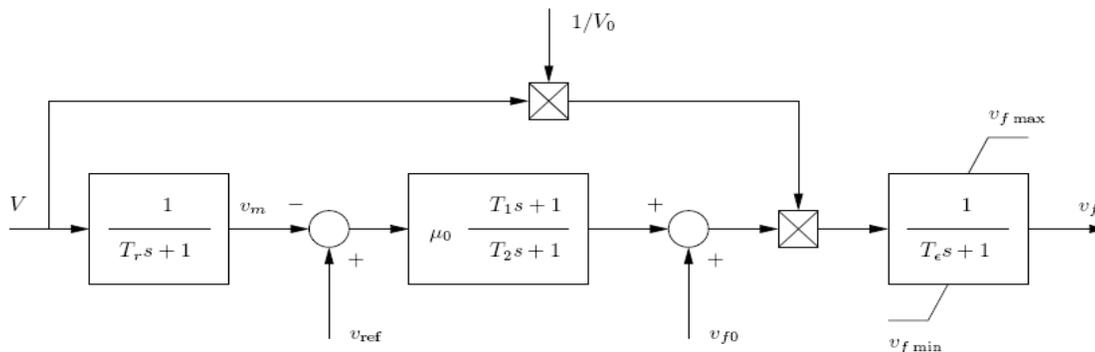


Figure 16.5: Exciter Type III.

Figura 3.5. AVR tipo III PSAT.

El PSS que se usará para el análisis fue definido en el capítulo 1. PSAT incluye tres controladores PSS, de los cuales en este trabajo se usará el PSS tipo II.

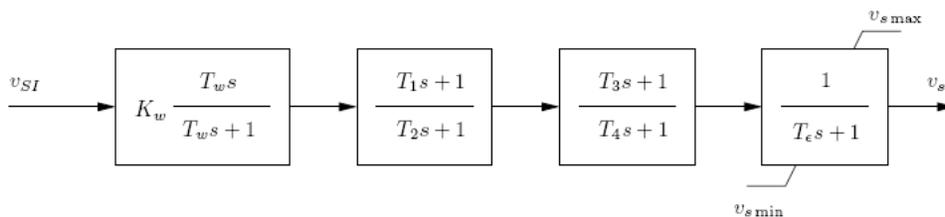


Figura 3.6. PSS tipo II PSAT.

3.3 NOCIONES FUNDAMENTALES DE NEPLAN®

Al igual que PSAT, NEPLAN® es un software de análisis de sistema de potencia. A través de este se puede realizar todos los estudios pertinentes desde el punto de vista de los sistemas de potencia en general. Permite la creación de pequeñas y grandes redes eléctricas, así como la incorporación de cada uno de sus elementos, y así lograr simulaciones muy

cercanas a la realidad. Actualmente es una la más completas herramientas de simulación de sistemas eléctricos de potencia.

NEPLAN® posee un amplio repertorio de reguladores de tensión cargados en su base, a través de los cuales se pueden realizar estudios del comportamiento de estos conectados al sistema de potencia. Sin embargo, se trabajó a través de los circuitos controladores del programa (CCT) a través de los cuales se pueden configurar la forma de los controladores que se vayan a utilizar para algún estudio en particular. Utilizando esta herramienta se pudo configurar los AVR a los modelos definidos en el capítulo II, y así obtener resultados que mantengan la línea de trabajo desarrollada en el capítulo III. La versión de NEPLAN® utilizada en este trabajo fue la 5.2. Para mayor comprensión del desarrollo de estudios con ayuda de este software se recomienda estudiar las referencias tal y tal.

3.4 SIMULACIONES DE LOS SISTEMAS DE EXCITACIÓN DEL GENERADOR SINCRÓNICO CONECTADOS CON EL SISTEMA DE POTENCIA.

El desarrollo de las simulaciones persigue comprobar los análisis expuestos en el capítulo II, así como analizar el comportamiento de los sistemas de excitación cuando se encuentran instalados en un sistema de potencia. Se presentará primero simulaciones trabajadas bajo PSAT, y luego se presentan las trabajadas en NEPLAN®. Por último se desarrolla una simulación en donde se estudia el efecto de distintos modelos de sistemas de excitación interconectados en un sistema de potencia, esta simulación se trabajará en ambos software.

3.4.1 Primera simulación. Generador conectado a una barra infinita a través de una línea

En esta primera simulación se presenta un generador conectado a una barra infinita a través de una línea ($L1:Z=j0.192$), caso que fue tomado de la referencia tal. En este caso se realizó

la simulación del modelo clásico en cuanto a sistemas de tensión se refiere. Se le conecta y desconecta el sistema a través de un interruptor que a los 0.001seg se abre, separando el generador de la barra infinita, y a los 0.4176seg se cierra, volviendo a conectar la máquina. De esta manera se puede observar el desenvolvimiento ante tal característica. Este análisis se hará tanto con control de excitación como sin la acción de este control. Una vez definido el efecto de usar el control de excitación, se varían los parámetros del sistema de excitación, a fin de comprobar los resultados obtenidos en el capítulo II.

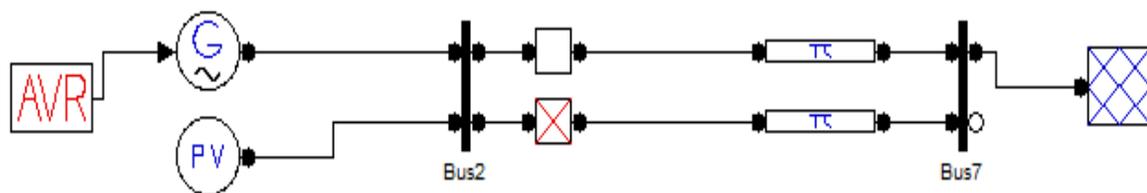


Figura 3.7. Generador conectado a una barra infinita.

Tabla 3.1. Datos del generador

<i>Datos del generador</i>			
X_d	1.93	T_{do}'	5.2seg
X_d'	0.23	T_{do}''	0.026seg
X_d''	0.195	T_{qo}'	0.81seg
X_q	1.71	T_{qo}''	0.027seg
X_q'	0.5	r_s	0.0107 Ω
X_q''	0.3	H	3.74kWseg/kVA
X_l	0.17		

Tabla 3.2. Datos del sistema de excitación.

<i>Datos del sistema de excitación</i>			
T_r	0.003	T_f	1.16
K_a	50	K_e	-0.06
T_a	0.02	T_e	0.57
V_m	1	A	8.00E-05
K_f	0.092	B	2.1

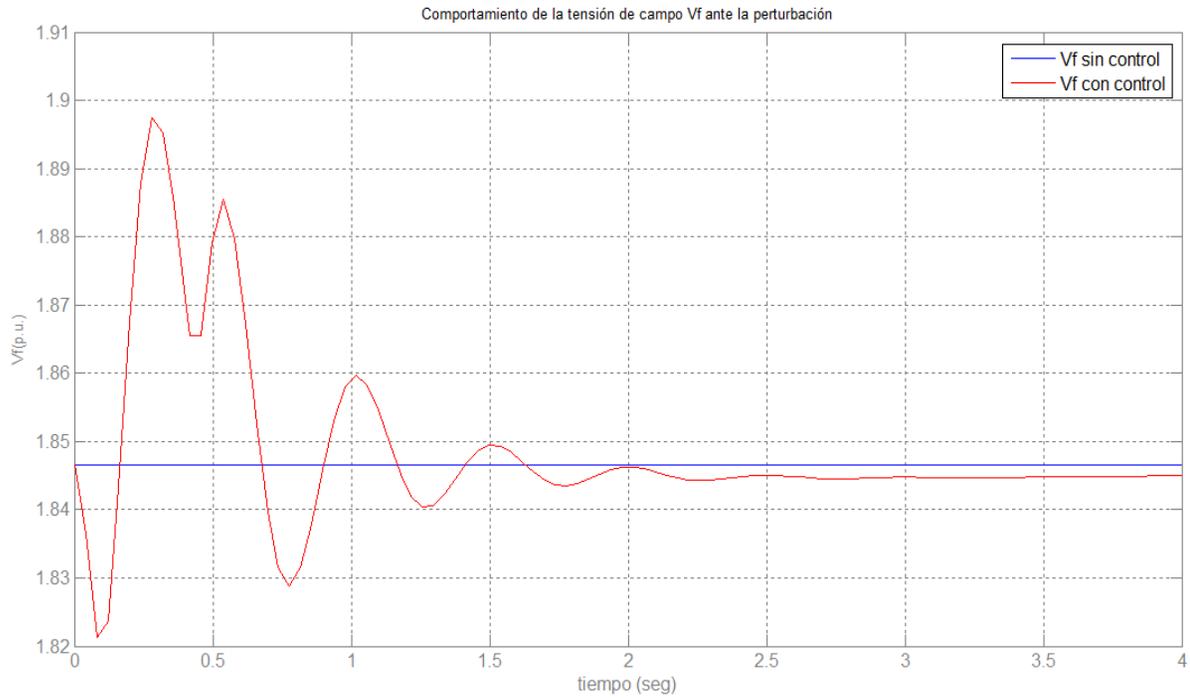


Figura 3.8. Comportamiento de la tensión de campo V_f con y sin control

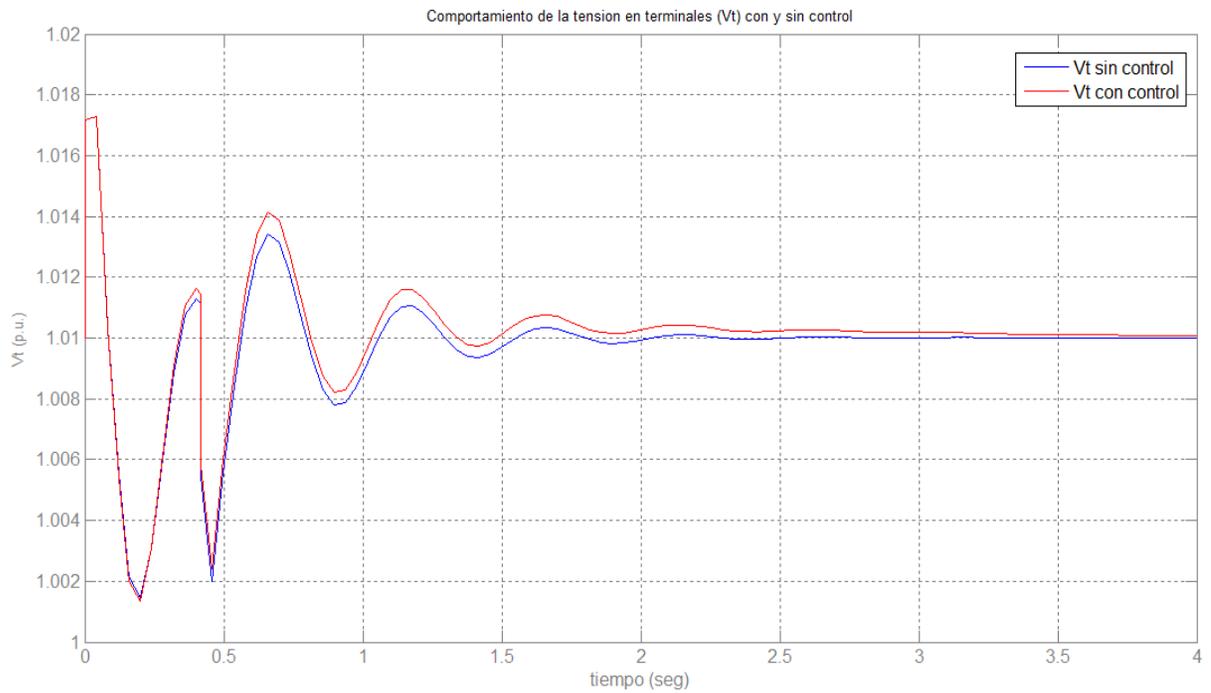


Figura 3.9. Comportamiento de la tensión en los terminales (V_t) del generador con y sin control.

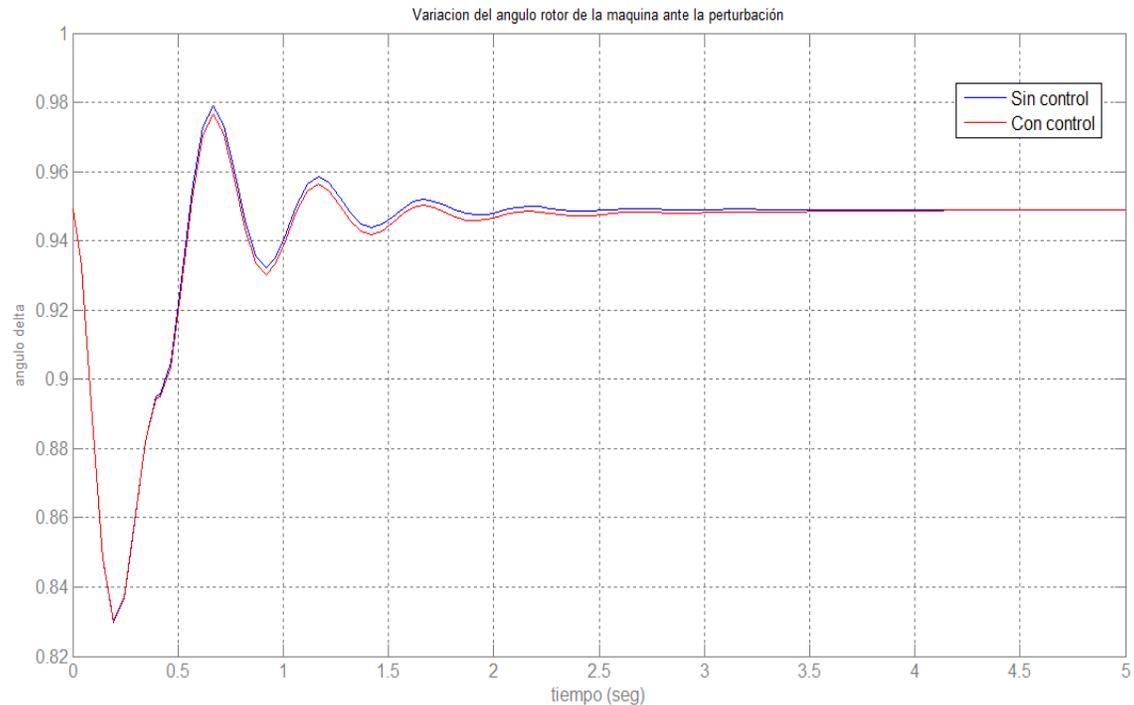


Figura 3.10. Comportamiento del ángulo del rotor (δ) de la máquina con y sin control.

En principio, los resultados obtenidos con el PSAT muestran similitud con los resultados de la referencia, con lo cual se muestra como este programa es eficiente para realizar este tipo de estudios. En relación con los resultados, se observa como con el control de excitación activo, la tensión de campo de la máquina reacciona ante la variación, tratando de regular la tensión de salida de la máquina, mientras que sin control, esta tensión se mantiene constante (fig. 3.8).

Con respecto a la tensión salida de la máquina, a pesar de tener mayor sobredisparo, tiene una respuesta más rápida ante la perturbación (fig. 3.9). En la figura 3.10 se muestra el comportamiento del ángulo del rotor de la máquina, el impacto sobre este elemento de la máquina no se ha explicado formalmente, y aunque su estudio estricto escapa de los objetivos de este trabajo, se explicará el efecto que tiene la variación de la tensión de campo sobre el ángulo δ de la máquina sincrónica.

Partiendo del circuito equivalente de la máquina sincrónica (fig 3.11), y para una potencia constante (gracias al efecto del controlador de turbina) se estudiará el impacto sobre este sistema ante una variación de la tensión interna del generador de un valor inicial

E_g a un nuevo valor E_g' . Se muestra entonces el diagrama fasorial para la condición inicial de funcionamiento (fig 3.12); bajo esta condición de operación, la potencia de salida (por fase) puede ser expresada de dos maneras, en términos de las condiciones terminales del generador, y en función del ángulo δ con los efectos de la resistencia del estator despreciados. (Anderson, 2003).

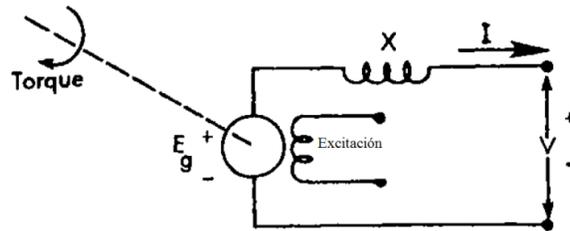


Figura 3.11. Circuito equivalente de la máquina sincrónica

$$P = V * I * \cos\theta \quad (3.1)$$

$$P = \left(\frac{E_g * V}{X} \right) \sin\delta \quad (3.2)$$

La premisa para el control de excitación es mantener la tensión constante en los terminales de la máquina sincrónica, por lo que para tensión y potencia constante se tendrá.

$$I * \cos\theta = k_1 \quad (3.3)$$

$$E_g \sin\delta = k_2 \quad (3.4)$$

Donde k_1 y k_2 son constantes.

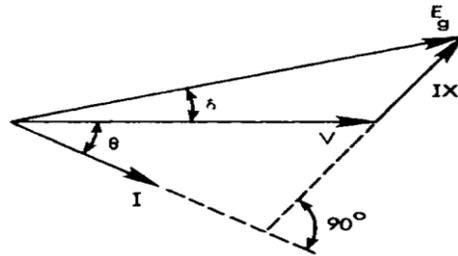


Figura 3.12. Diagrama fasorial para las condiciones iniciales.
Tomando en cuenta las constantes k_1 y k_2 el diagrama fasorial se tiene:

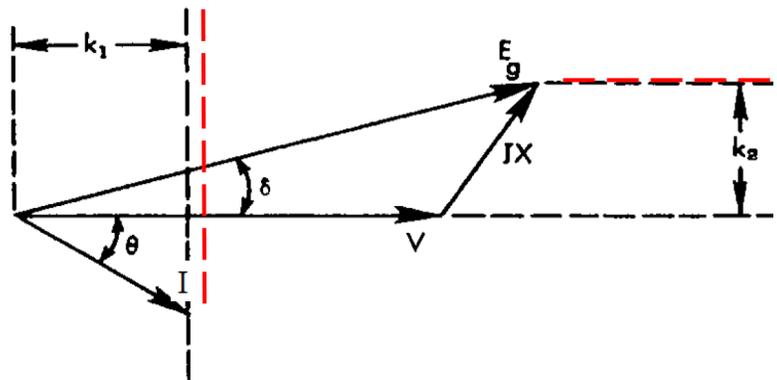


Figura 3.13. Diagrama fasorial ya con los parámetros constantes indicados.

Si la tensión de excitación es aumentada, la punta del fasor E_g se moverá a lo largo de la línea resaltada en la figura 3.13, y la punta del fasor I tendrá un comportamiento similar sobre la línea vertical resaltada en la figura 3.13. Ahora bien, en la figura 3.14 se observa una comparación del diagrama fasorial antes y después de la variación de la excitación.

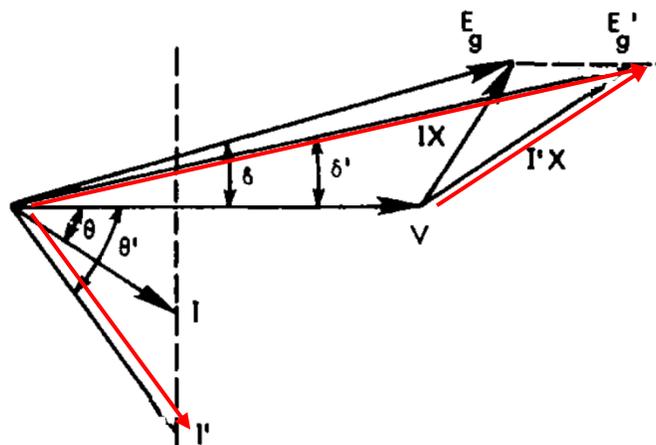


Figura 3.14. Diagrama fasorial antes y después de la variación en la excitación.

En este caso se ve como para potencia y tensión constante, un aumento en la excitación crea una reducción del ángulo δ . En el caso de la simulación, al conectar la línea se presenta una disminución de la tensión en terminales, lo que provoca un aumento de la tensión de excitación, creando una disminución del ángulo δ , hasta alcanzar un nuevo punto de operación. Este comportamiento es observado en la gráfica 3.10.

Un segundo estudio que se le puede hacer a esta simulación es la variación de cada uno de los parámetros de los sistemas de excitación. En este aspecto se observa en la figura 3.15 se observa, tal como se observó en el capítulo I, al aumentar la ganancia K_a el sobre paso y las oscilaciones a la salida del sistema de excitación se ven aumentadas, así como también el tiempo de respuesta de la excitación es mejorado.

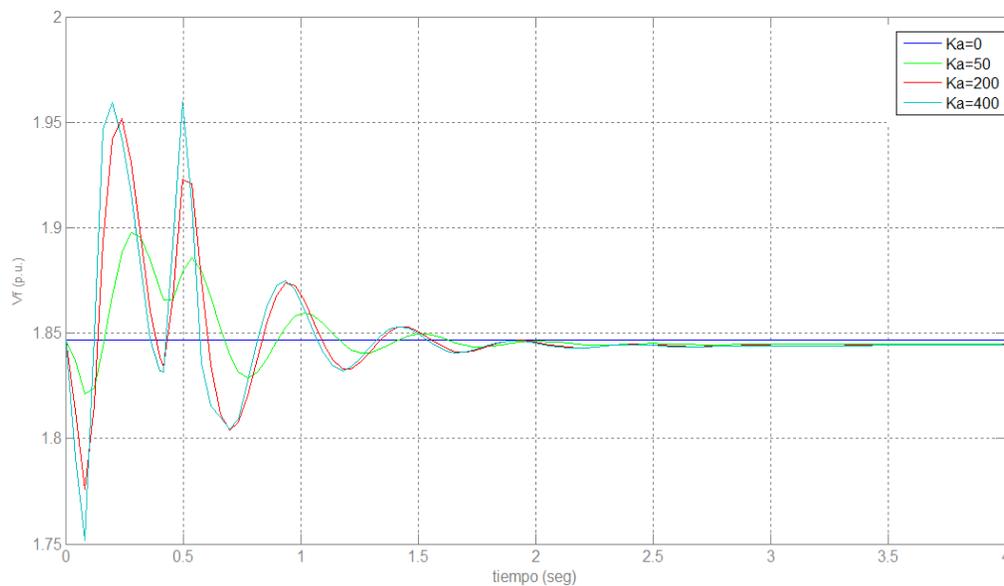


Figura 3.15. Variación del comportamiento de la Vf en función de Ka.

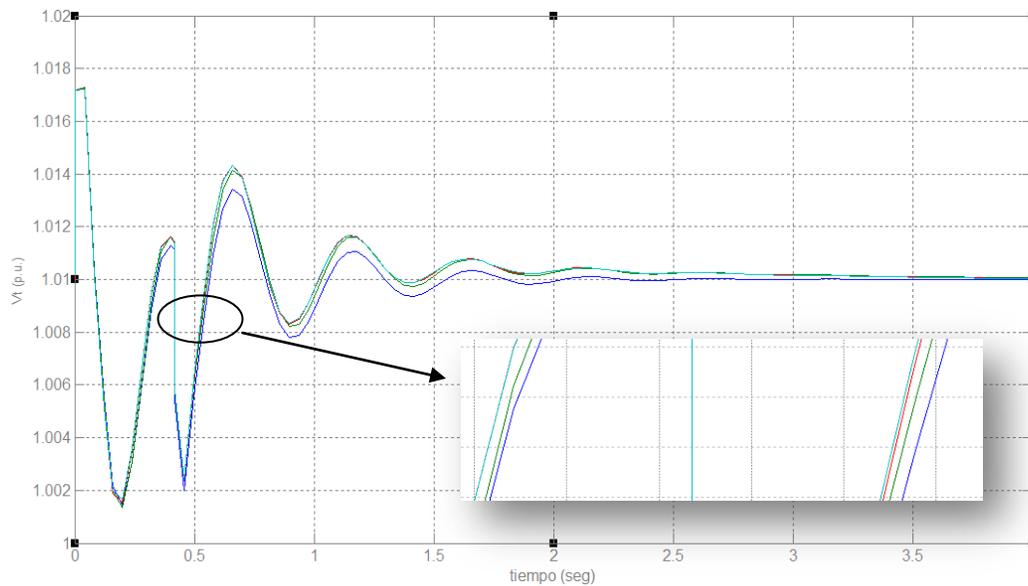


Figura 3.16. Variación del voltaje en terminales V_t en función de K_a .

En la figura 3.16 se ve el mismo impacto, pero en los terminales del generador, aunque en menor magnitud, manteniendo la tendencia indicada en la tabla 2.13 del capítulo II.

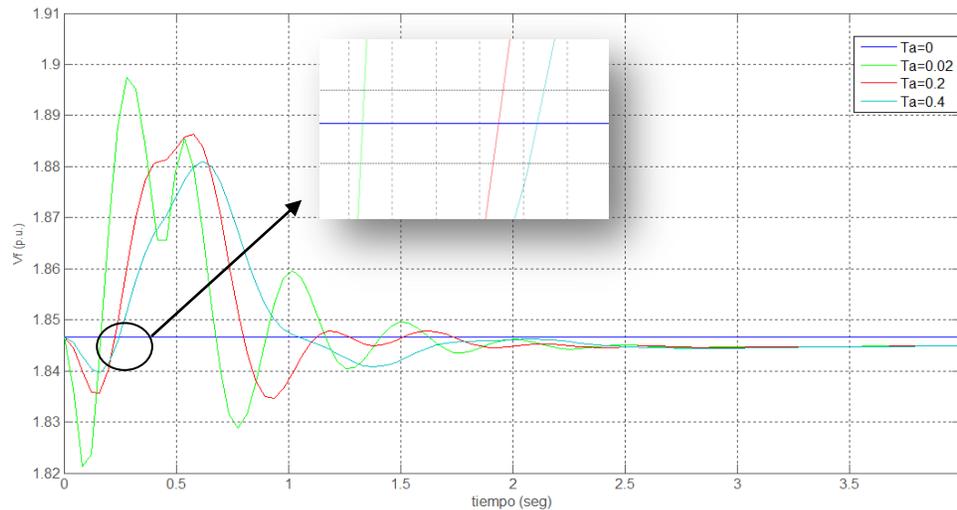


Figura 3.17. Variación del comportamiento de la V_f en función de T_a .

Ante variaciones de T_a se disminuye el sobre disparo y las oscilaciones, y se aumenta el tiempo de respuesta del sistema, efectos que se muestra tanto para la salida del controlador y a la salida de la máquina (figura 3.17 y 3.18 respectivamente). Aunque el impacto en la salida de la máquina sincrónica sea pequeño, si se toma en cuenta que estos valores están

expresados en p.u., estos cambios representan variaciones considerables de valores reales en el sistema de potencia, como en los perfiles de tensión a la salida de las plantas generadoras.

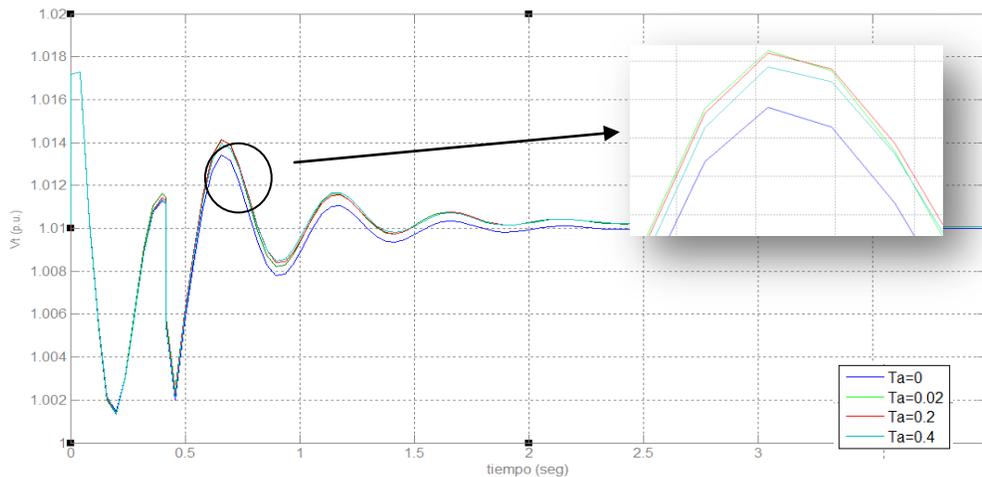


Figura 3.18. Variación del voltaje en terminales V_t en función de T_a

Al variar K_f se mejora el sobre disparo, así como también el tiempo de respuesta del sistema, tanto en la salida del controlador como en los terminales de la máquina. Este parámetro forma parte del compensador del sistema de excitación, y es agregado justamente para mejorar en gran medida la respuesta de la excitación ante una perturbación, efecto que se aprecia en las figuras 3.19 y 3.20.

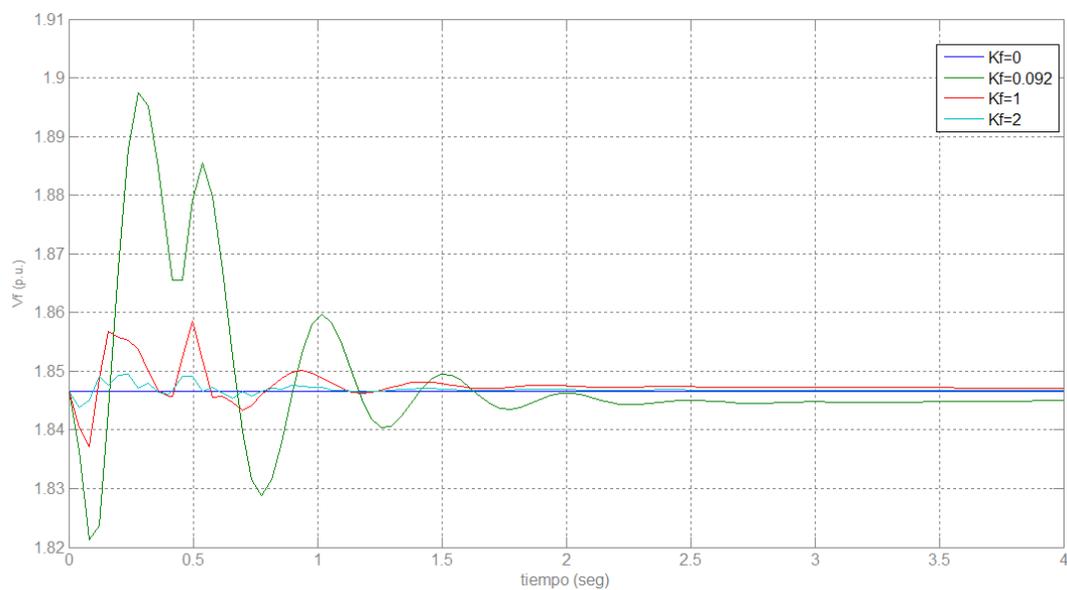


Figura 3.19. Variación del comportamiento de la Vf en función de Kf.

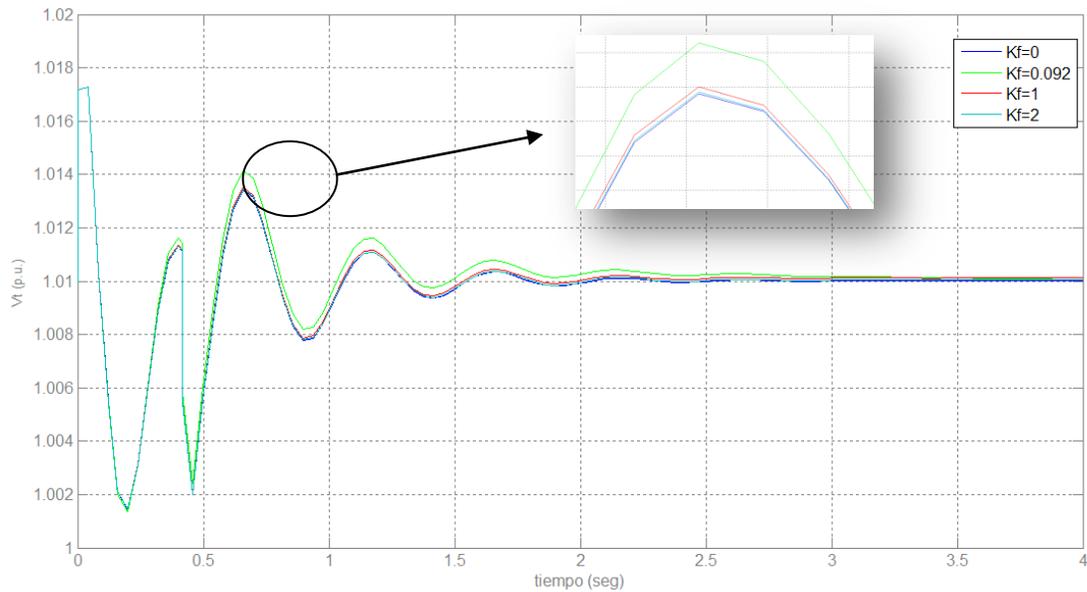


Figura 3.20. Variación del voltaje en terminales Vt en función de Kf

Con T_f se logra el efecto contrario, se desmejora la característica de la respuesta tanto del controlador como de la máquina. La variación se hace con valores altos, tomando en cuenta que T_f es un constante de tiempo, pero se trabaja de esta forma para demostrar efectivamente que el comportamiento es el indicado en la tabla 2.13 del capítulo II. Este comportamiento se muestra en la figura 3.21 para la salida del controlador, y la figura 3.22 para la salida de la máquina sincrónica.

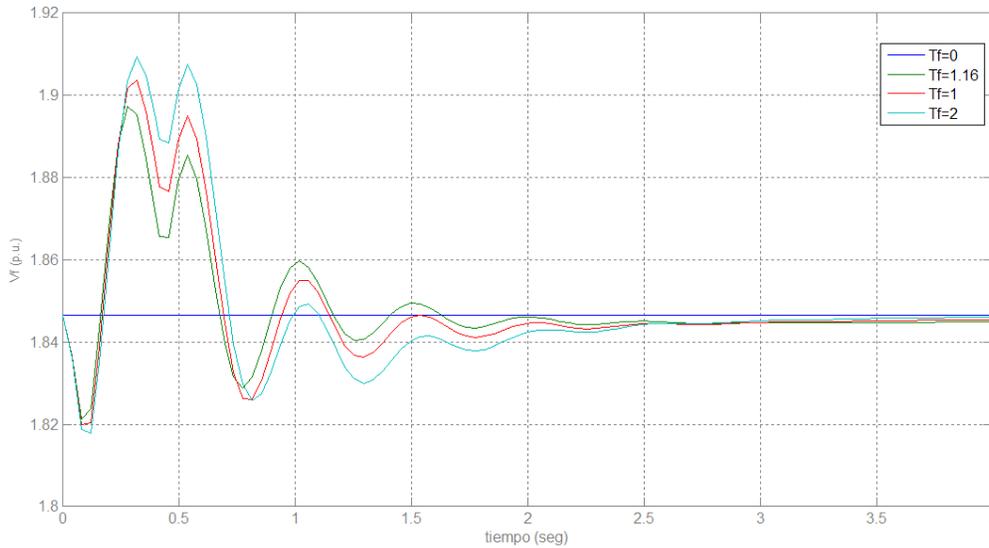


Figura 3.21. Variación del comportamiento de la V_f en función de T_f .

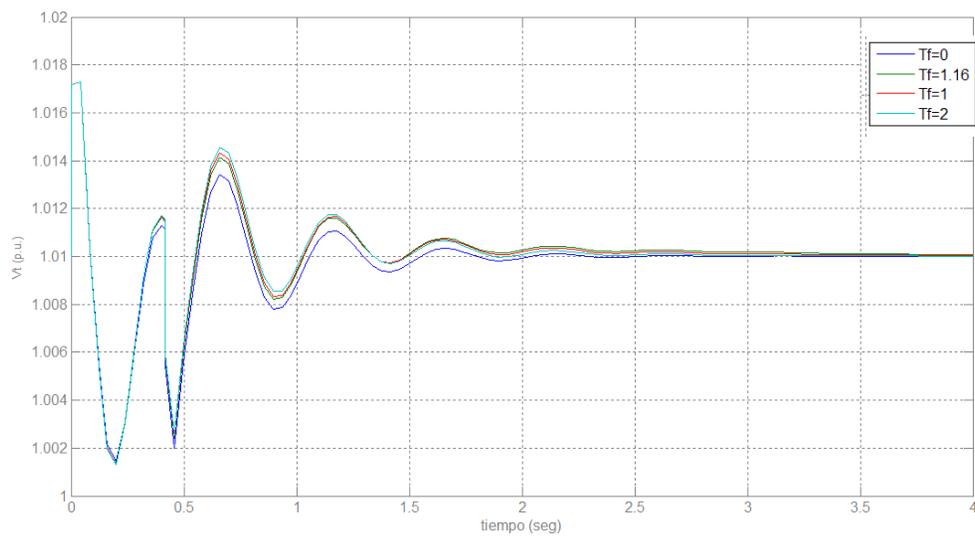


Figura 3.22. Variación del voltaje en terminales V_t en función de T_f

Para T_e el resultado no es diferente, el mismo se comporta tal como lo que se indica en el capítulo II; sin embargo, en la práctica este parámetro depende de las condiciones físicas del excitador, y podría no ser un elemento accesible para su regulación, por lo que no es recomendable hacer una sintonización del sistema de excitación en base a este parámetro (al igual que con K_e). Las figuras 3.23 y 3.24 muestran el comportamiento de las salidas de controlador y la máquina respectivamente, ante variaciones de este parámetro.

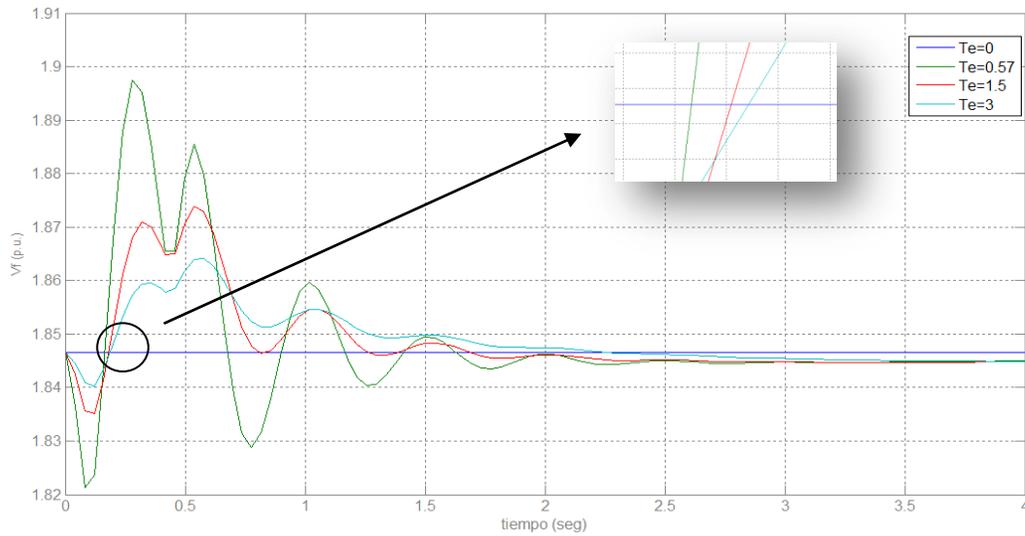


Figura 3.23. Variación del comportamiento de la Vf en función de Te.

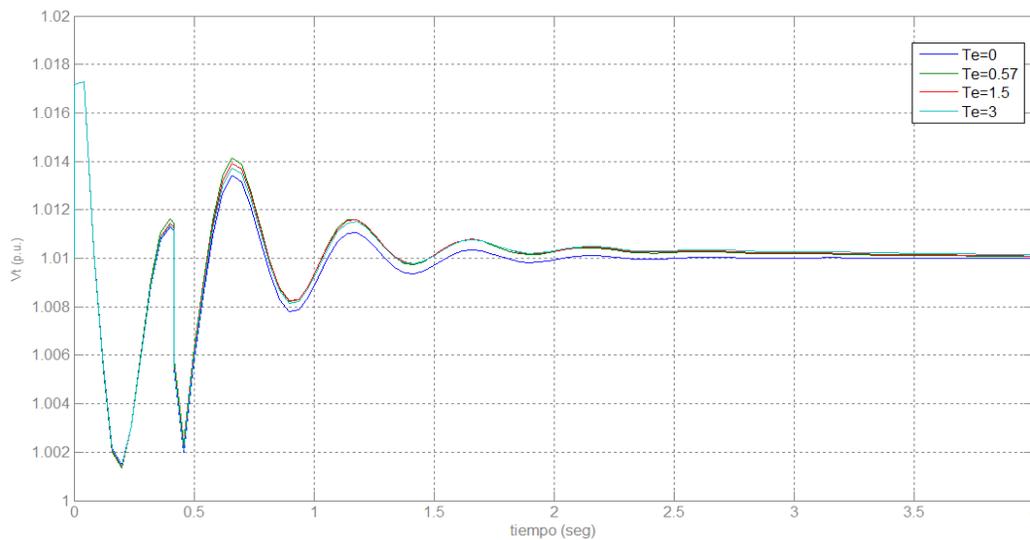


Figura 3.24. Variación del comportamiento de la Vt en función de Te.

3.4.2 Segunda simulación: sistema de potencia simple de áreas interconectadas.

Este sistema consiste en dos áreas similares interconectadas, cada área tiene dos generadores que aportan 900MVA a una tensión de 20kV. El sistema del área 1 exporta 400MW al área 2; el sistema en general tiene como referencia la barra 3. En primer lugar, se inyecta una falla trifásica en la barra 8, la cual es despejada a los 0.07seg después de

inyectada; luego se varían las cargas en un 10%. En ambos casos se estudia como es el comportamiento de los distintos modelos de sistemas de excitación ante dicha perturbación. El sistema es mostrado en la figura 3.25. A continuación se muestra los datos de dicho sistema.

Tabla 3.3. Datos de los generadores de la segunda simulación.

<i>Datos de los generadores</i>				
	G1	G2	G3	G4
kV	20	20	20	20
MVA	900	900	900	900
P(W)	700	700	700	700
H	6.5	6.5	6.5	6.5
rs	0.001111	0.001111	0.001111	0.001111
Xd	1.8	1.8	1.8	1.8
Xd'	0.3	0.3	0.3	0.3
Xd''	0.25	0.25	0.25	0.25
Xq	1.7	1.7	1.7	1.7
Xq'	0.55	0.55	0.55	0.55
Xq''	0.25	0.25	0.25	0.25
Xl	0.2	0.2	0.2	0.2
Tdo'	8	8	8	8
Tdo''	0.03	0.03	0.03	0.03
Tqo'	0.4	0.4	0.4	0.4
Tqo''	0.05	0.05	0.05	0.05
A	0.015	0.015	0.015	0.015
B	9.6	9.6	9.6	9.6

Tabla 3.4. Datos de líneas de la segunda simulación.

	L1(5-6)	L2(6-7)	L3(7-8)	L4(8-9)	L5(9-10)	L6(10-11)
Long.(km)	25	10	110	110	10	25
Rl(Ω/km)	0.0529	0.0529	0.0529	0.0529	0.0529	0.0529
X(Ω/km)	0.529	0.529	0.529	0.529	0.529	0.529
C(μf/km)	0.0105	0.0105	0.0105	0.0105	0.0105	0.0105
B(μS/km)	3.958	3.958	3.958	3.958	3.958	3.958

Tabla 3.5. Datos de transformadores y cargas de la segunda simulación.

<i>Datos de los transformadores y de las cargas</i>						
	Transformadores				Cargas	
	T1	T2	T3	T4	C1	C2
rt	20/230kV	20/230kV	20/230kV	20/230kV		
Zcc	0.15	0.15	0.15	0.15		
MVA	900	900	900	900		
P(W)					1003.718	1814.275

$Q(VA)$					107.738	105.422
---------	--	--	--	--	---------	---------

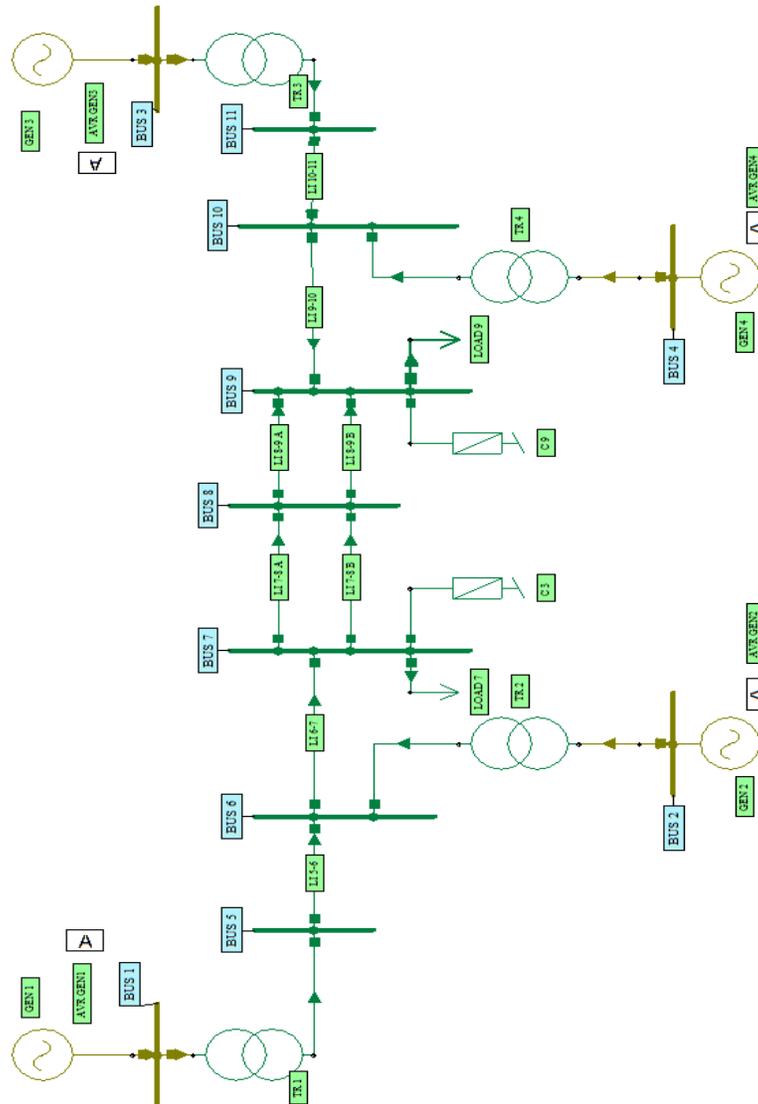


Figura 3.25. Sistema de potencia simple de 2 áreas interconectadas.

Primer análisis: estudia la respuesta de los sistemas de excitación de las máquinas que conforman el sistema de potencia, para tal fin se trabajará con el modelo DC1A del estándar IEEE 421.5, y con los valores de parámetros que especifica el estándar antes mencionado (tabla 2.1).

Siguiendo la misma secuencia de la simulación anterior, se muestra el comportamiento de la tensión de campo V_f (figuras 3.26 y 3.27), el cual presenta una respuesta aceptable

ante la perturbación, manteniendo una leve oscilación, esto por causa de la estabilidad del sistema.

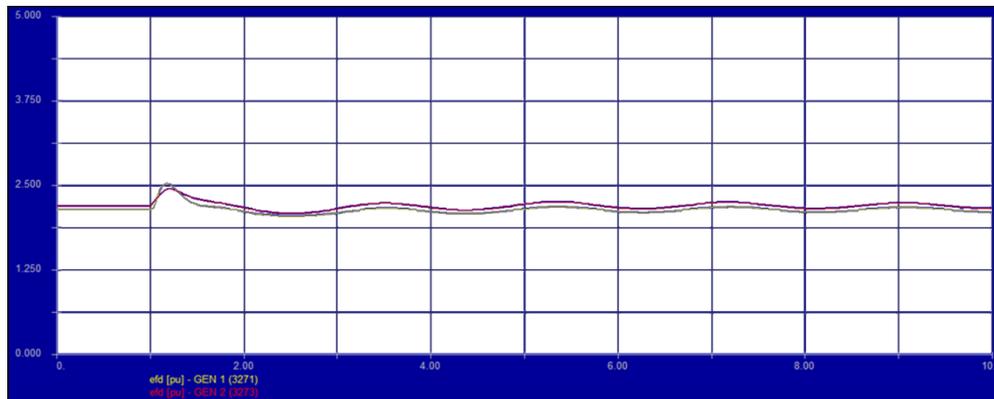


Figura 3.26. Comportamiento de la tensión de campo V_f ante la perturbación (generadores 1 y 2).

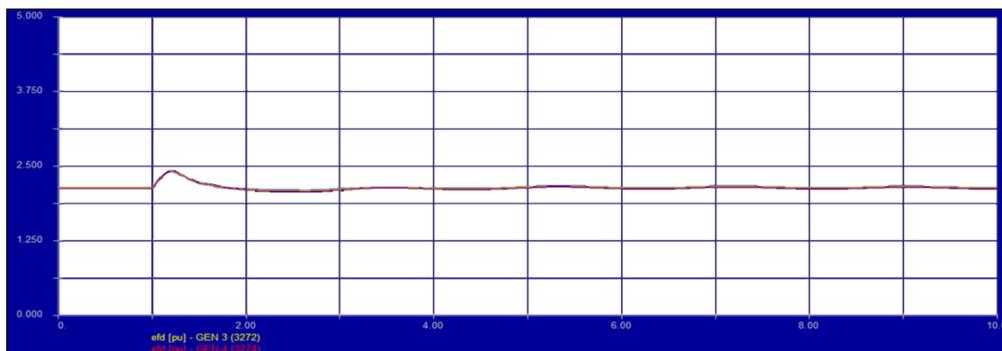


Figura 3.27. Comportamiento de la tensión de campo V_f ante la perturbación (generadores 3 y 4).

En las figuras 3.28 y 3.29 se muestra el comportamiento de la tensión en los terminales del generador. Se observa como los generadores 1 y 2, correspondientes al área A, sufren una mayor inestabilidad luego de remover el fallo, mientras que en los generadores 3 y 4, el margen de inestabilidad es menor, sobre todo en el generador 3, que es el generador definido como de referencia. Con respecto al ángulo del rotor, para los generadores 1 y 2, no se alcanza un nivel de estabilidad, mientras que en el generador 4 la situación es más favorable, ya que esta máquina tiende a alcanzar la estabilidad una vez despejado el fallo, este comportamiento se muestra en la figura 3.30. Mientras que en el generador 3, por ser el generador de referencia, la tensión se mantiene constante.

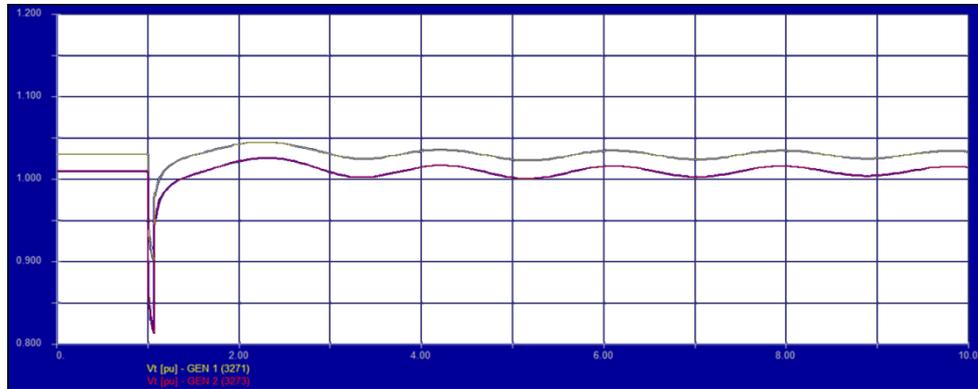


Figura 3.28. Tensión en terminales V_t de los generadores 1 y 2.

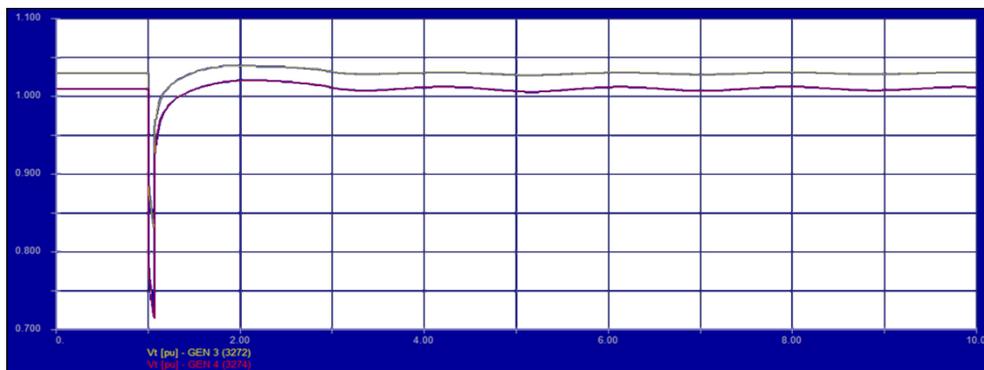


Figura 3.29. Tensión en los terminales de los generadores 3 y 4.

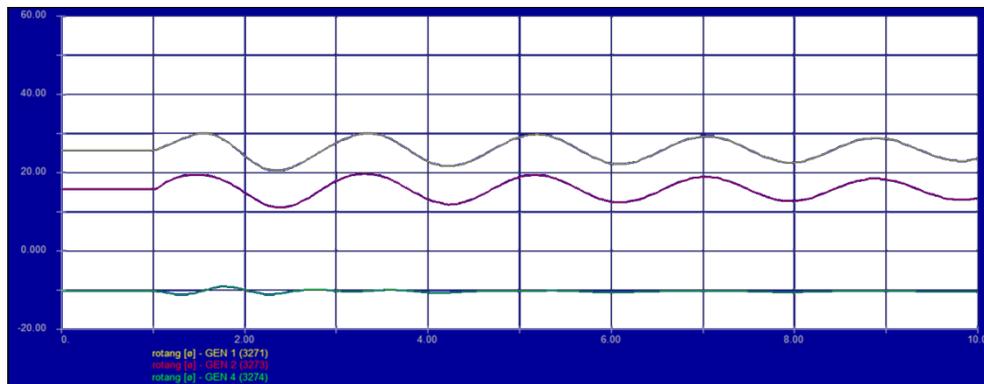


Figura 3.30. Variación del ángulo del rotor de los generadores 1, 2 y 4 ante la perturbación.

En este caso, la idea es mejorar la estabilidad de tensión y la estabilidad de ángulo; para esta última, partiendo de los valores definidos para los parámetros de los sistemas de excitación, una de las premisas para mejorar la estabilidad de ángulo del sistema es aumentar la respuesta del sistema de excitación, para lo cual ya fueron definidos que parámetros impactan este factor en dichos sistemas, sin embargo, por más que se aumenten

los valores de estos, no se logra mejorar la estabilidad de ángulo de los generadores 1 y 2, que son los que presentan un mayor impacto en este aspecto.

Por otro lado, la estabilidad de tensión también presenta oscilaciones, las cuales tampoco son mejoradas con la acción de control de los sistemas de excitación, pero, si se puede mejorar la respuesta del sistema, al realizar una pequeña sintonización en base a la tabla tal 2.13 del capítulo II, se logra un respuesta más suave y rápida, en relación a la respuesta del sistema con los valores base tomados para los parámetros de los sistemas de excitación.

Los nuevos valores para los cuales se consigue el mejoramiento antes citado son: $T_c=0.4\text{seg}$, $T_b=0.02\text{seg}$, $K_a=60$, $T_a=0.1\text{seg}$, $K_f=0.1$ y $T_f=2.5\text{seg}$. Las figuras 3.31 y 3.32 muestran el comportamiento de la tensión en terminales luego de aplicados los nuevos valores.

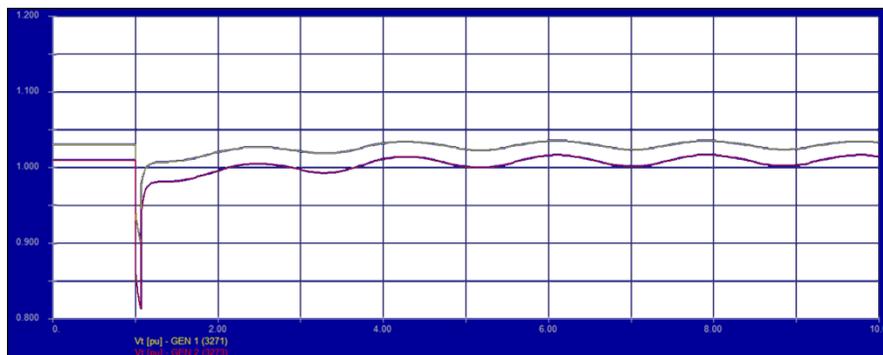


Figura 3.31. Comportamiento de la tensión en terminales de los generadores 1 y 2 después del ajuste de los parámetros

Este resultado ratifica los análisis del capítulo II. Otro resultado importante es cómo trabajan los circuitos limitadores del sistema de excitación, en este caso se trabaja con límites del tipo no-windup, cuyo funcionamiento fue explicado en el capítulo I, en la tabla 1. Simplemente la reacción de este tipo de circuito ante un valor fuera de sus límites es sacar la máquina de servicio, es por ello que hay que tomar en cuenta la capacidad máxima del regulador para calibrar efectivamente estos circuitos limitadores, tal efecto es mostrado en la figura 2.30. Otro circuito a tomar en cuenta ya en la práctica, son los circuitos de

protección, ya que estos tienen el mismo efecto sobre la operación de la máquina sincrónica. En las figuras 3.33, 3.34 y 3.35 se muestra el comportamiento de la tensión de campo V_f , tensión en terminales V_t y el ángulo del rotor para valores por encima de los límites V_{RMAX} y V_{RMIN} .

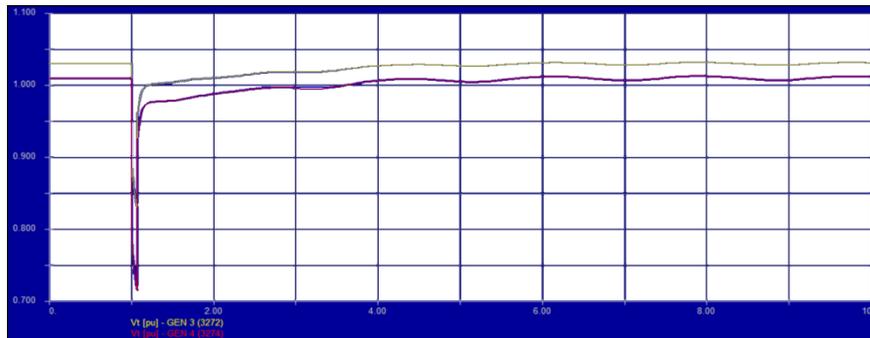


Figura 3.32. Comportamiento de la tensión en terminales de los generadores 3 y 4 después del ajuste de los parámetros.

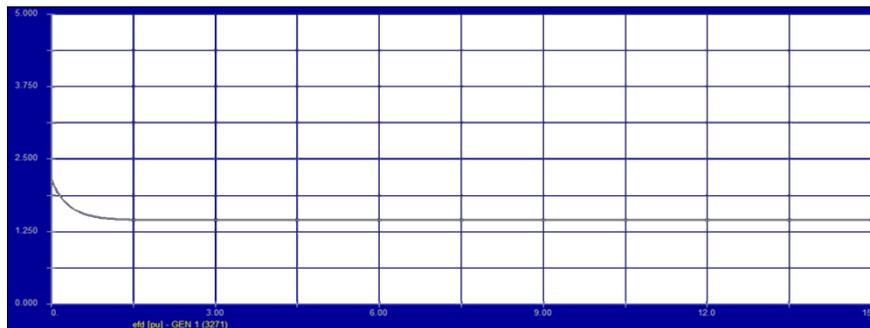


Figura 3.33. Comportamiento de la tensión de excitación V_f para valores fuera de los límites de V_{RMAX} y V_{RMIN}

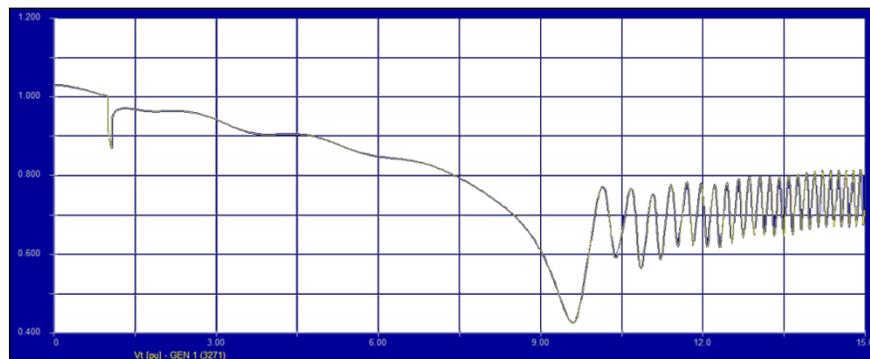


Figura 3.34. Comportamiento de la tensión en terminales del generador V_t para valores fuera de los límites de V_{RMAX} y V_{RMIN}

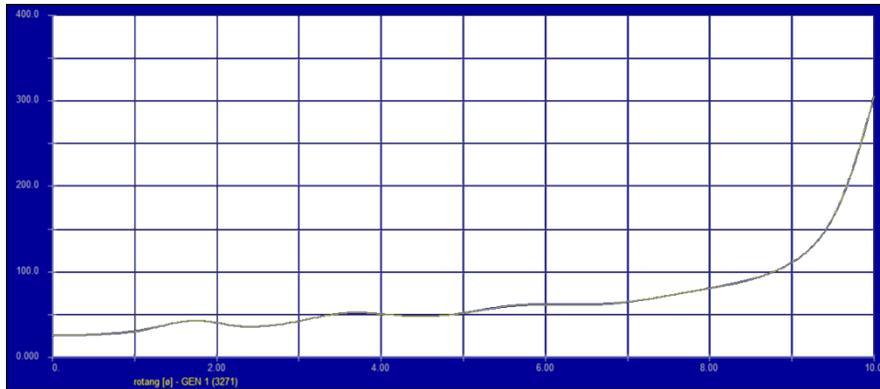


Figura 3.35. Comportamiento del ángulo del rotor del generador para valores fuera de los límites de V_{RMAX} y V_{RMIN}

Como se observa, simplemente para valores por fuera de los límites antes mencionados, producen que el regulador pierda la capacidad de controlar la salida de tensión de la máquina.

Segundo análisis: en este caso se estudia el comportamiento de los sistemas de excitación, pero trabajando con el modelo AC1A, y al igual que el primer análisis se partirá de los valores que establece el estándar IEEE 421.5 para los parámetros de los modelos antes mencionado.

Las figuras 3.36 y 3.37 muestran como trabajando con estos valores el sistema de excitación no es capaz de estabilizar la tensión de campo interno del generador.

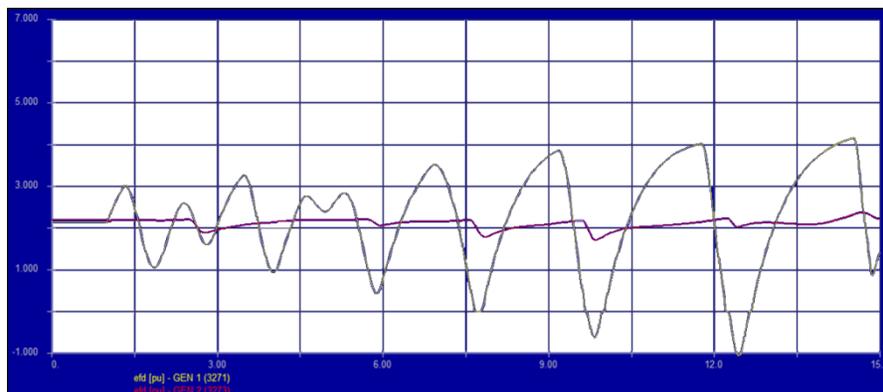


Figura 3.36. Comportamiento de la tensión de campo V_f ante la perturbación (generadores 1 y 2).

Se puede observar como la tensión de salida de las máquinas sincrónicas tampoco logran estabilizarse, al igual que el ángulo del rotor de éstas. Este comportamiento es mostrado en la figuras 3.38, 3.39 y 3.40 respectivamente

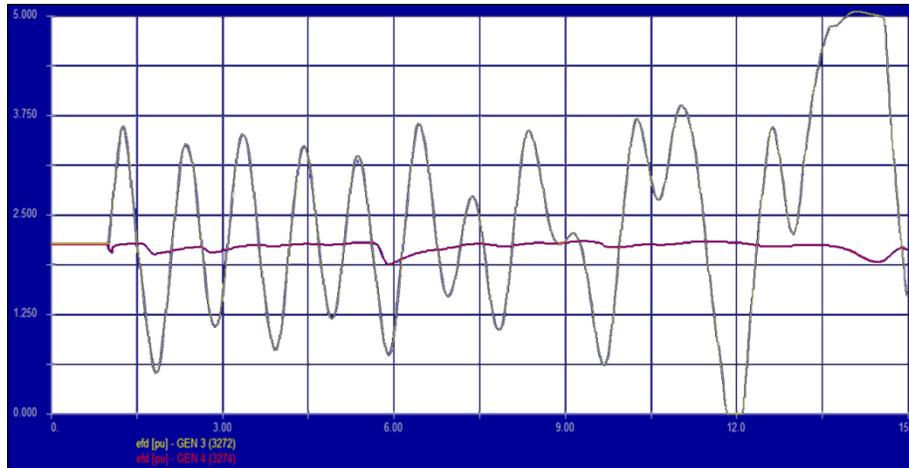


Figura 3.37. Comportamiento de la tensión de campo V_f ante la perturbación (generadores 3 y 4).

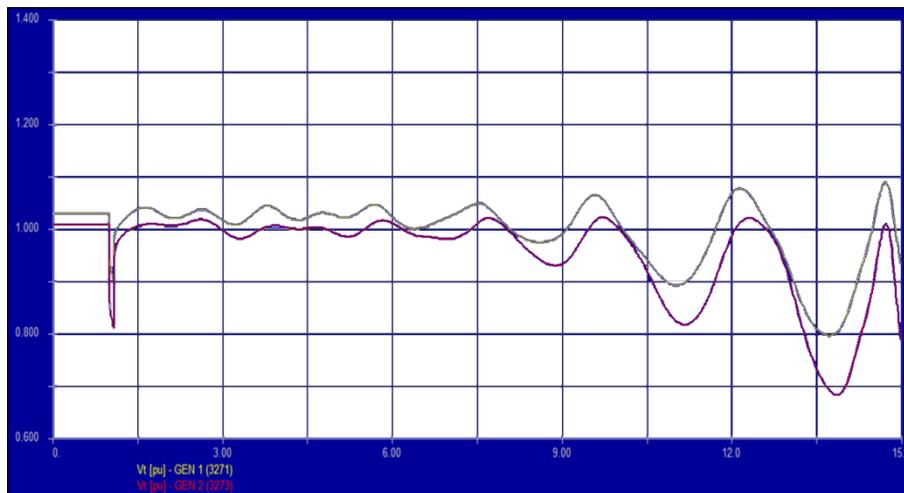


Figura 3.38. Tensión en terminales V_t de los generadores 1 y 2.

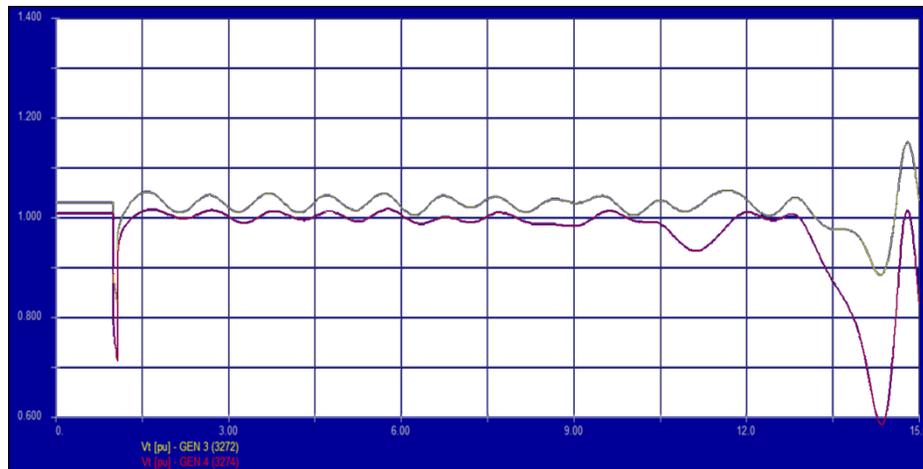


Figura 3.39. Tensión en terminales V_t de los generadores 1 y 2.

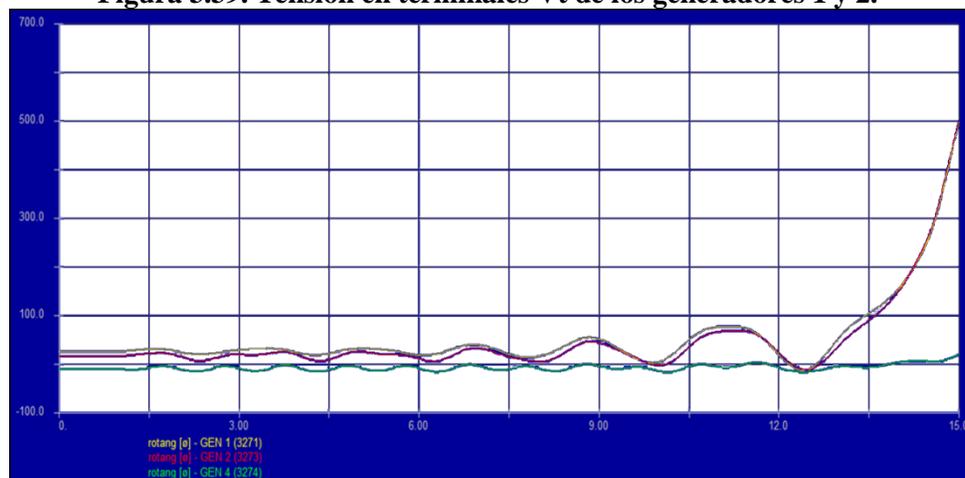


Figura 3.40. Variación del ángulo del rotor de los generadores 1, 2 y 4 ante la perturbación

Si se varían los parámetros en función de las indicaciones de la tabla 2.13, se puede mejorar sustancialmente la respuesta del sistema, tanto en estabilidad de tensión como estabilidad de ángulo. El hecho de que con estos sistemas se puede mejorar la estabilidad de ángulo es consecuencia de que los sistemas de excitación AC poseen una respuesta más rápida en relación a los DC, impactando en mayor grado este elemento de los sistemas de potencia. El siguiente grupo de figuras muestra como se mejora la tensión de campo, tensión en terminales del generador y el ángulo del rotor de la máquina síncrona (figuras 3.41, 3.42, 3.43, 3.44 y 3.45 respectivamente). Los valores nuevos para la sintonización son $T_c=0.1\text{seg}$, $T_b=1\text{seg}$, $K_f=0.5$ y $T_f=4\text{seg}$.

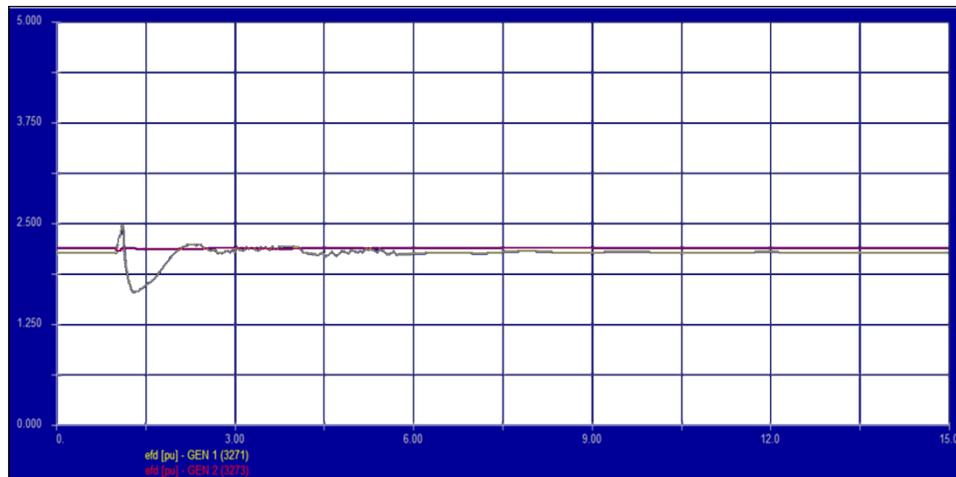


Figura 3.41. Comportamiento de la tensión de campo V_f ante la perturbación (generadores 1 y 2).

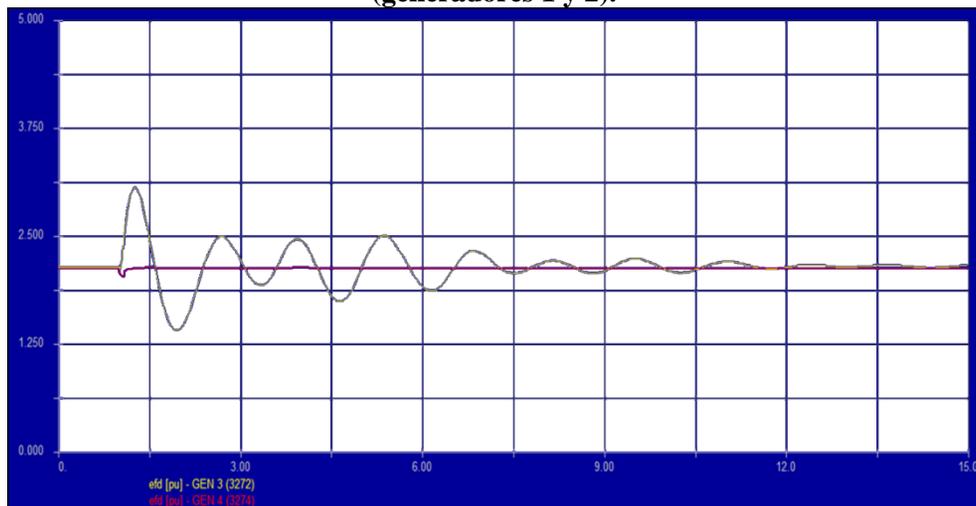


Figura 3.42. Comportamiento de la tensión de campo V_f ante la perturbación (generadores 3 y 4).

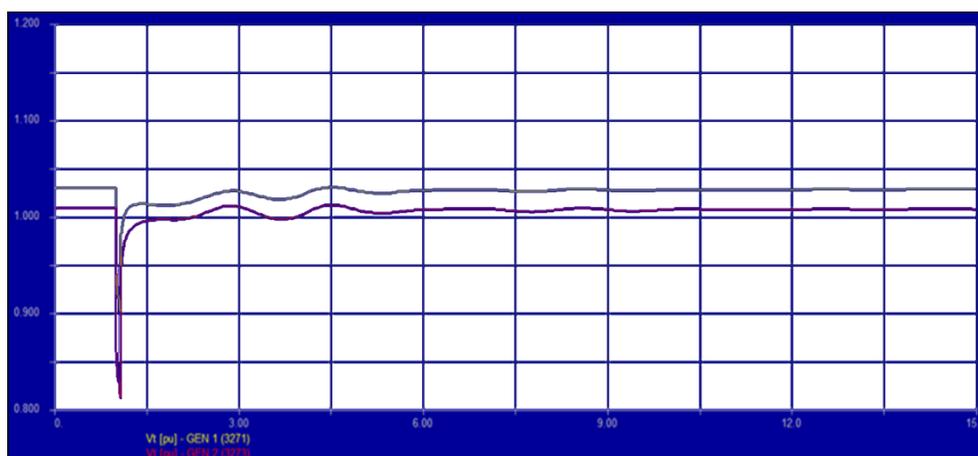


Figura 3.43. Tensión en terminales V_t de los generadores 1 y 2.

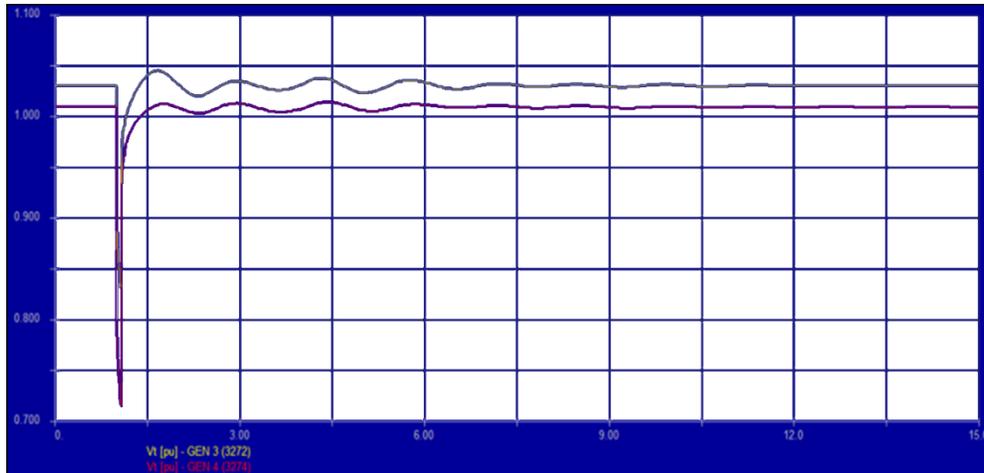


Figura 3.44. Tensión en terminales V_t de los generadores 3 y 4.

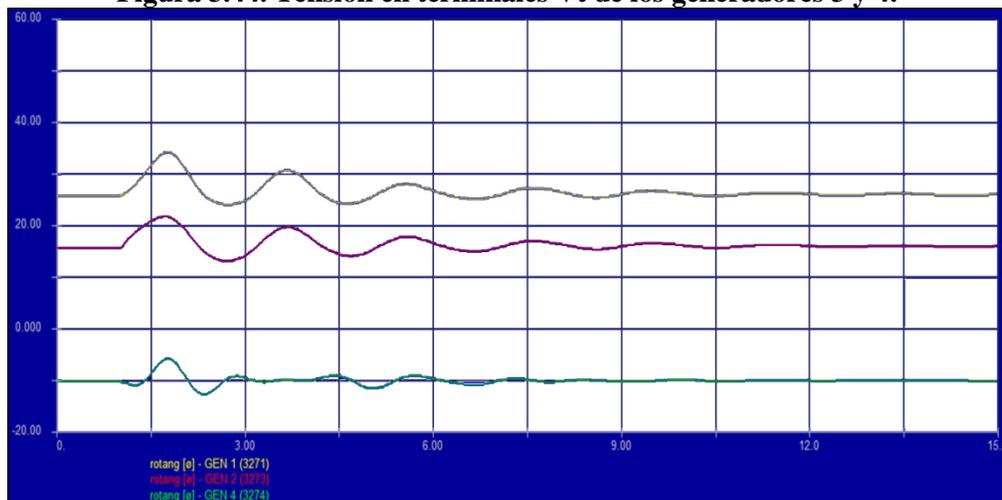


Figura 3.45. Variación del ángulo del rotor de los generadores 1, 2 y 4 ante la perturbación

Tercer análisis: se estudia el comportamiento de los sistemas de excitación con el modelo ST1A del estándar IEEE 421.5; al igual que en los análisis anteriores, los valores serán los que esta norma define para este modelos de sistema de excitación.

La respuesta de estos sistemas es altamente eficiente, desde el punto de vista de estabilidad de tensión, esto debido a su alta capacidad de respuesta. En este caso, el sistema tiene un comportamiento aceptable aún con los valores que define la norma IEEE 421.5, a diferencia de los dos modelos anteriores. En las siguientes figuras se muestra la respuesta de cada uno de los elementos de interés para el análisis de la respuesta de excitación.

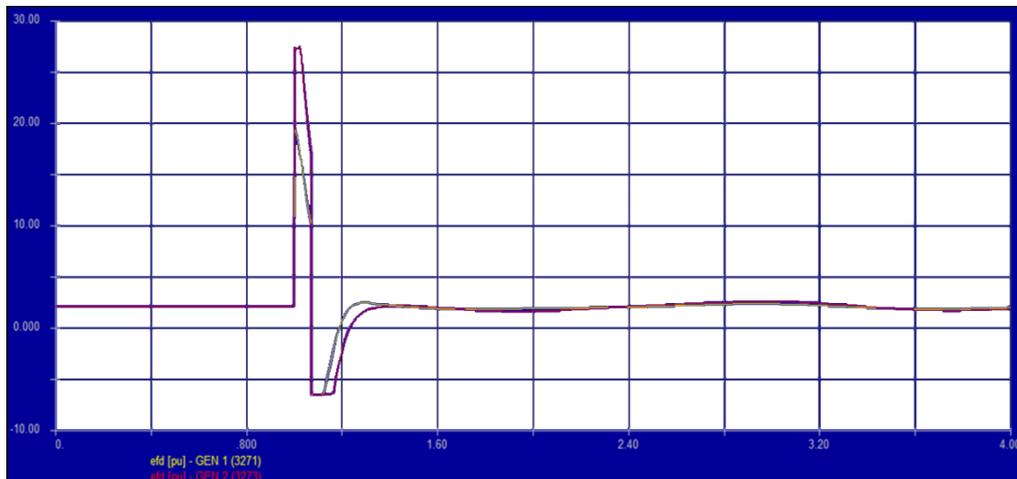


Figura 3.46. Comportamiento de la tensión de campo V_f ante la perturbación (generadores 1 y 2).

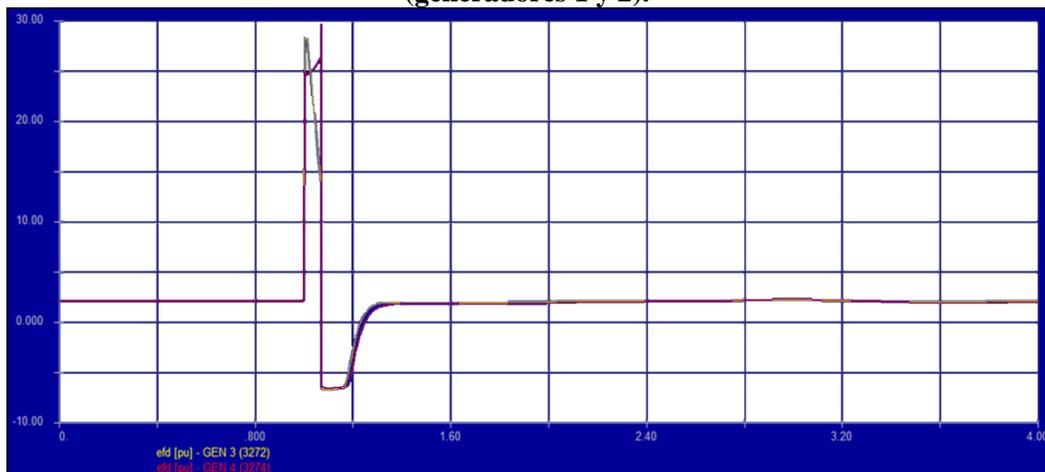


Figura 3.47. Comportamiento de la tensión de campo V_f ante la perturbación (generadores 3 y 4).

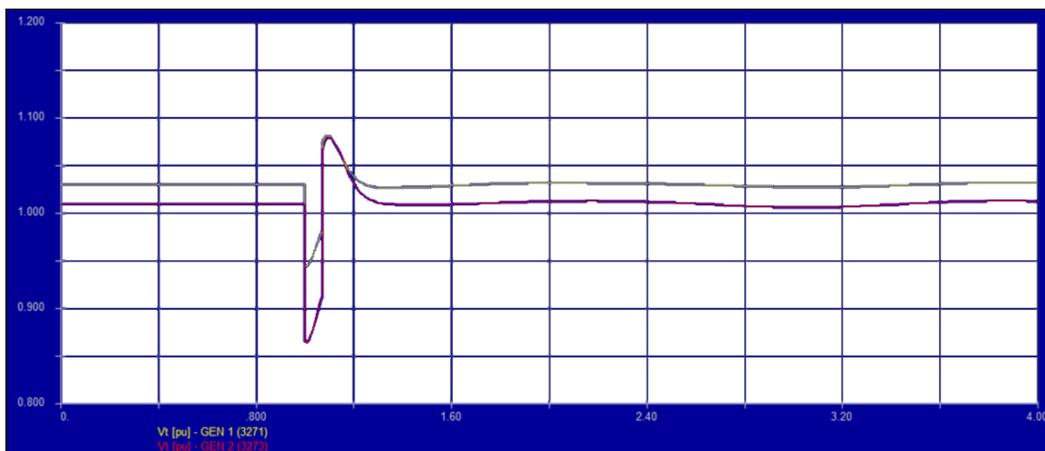


Figura 3.48. Tensión en terminales V_t de los generadores 1 y 2

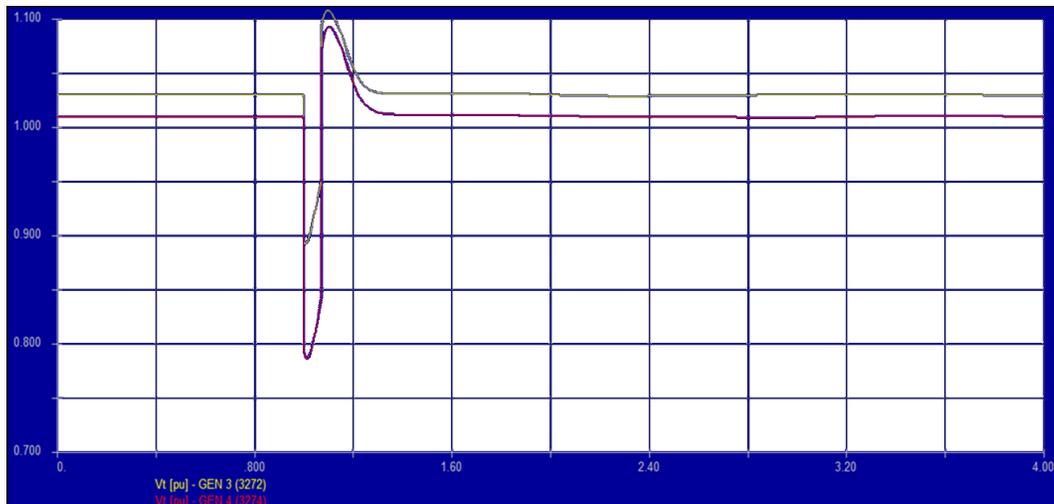


Figura 3.49. Tensión en terminales V_t de los generadores 3 y 4

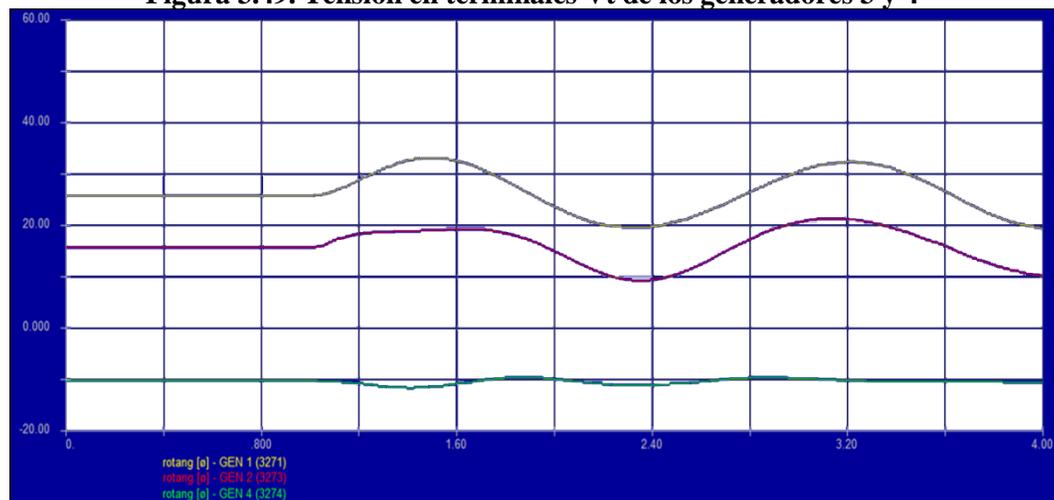


Figura 3.50. Variación del ángulo del rotor de los generadores 1, 2 y 4 ante la perturbación

Cuarto análisis: aquí se estudia el comportamiento de los distintos modelos de sistemas de excitación interconectados en un mismo sistema de potencia. Se usará para los generadores 1 y 3, el sistema de excitación ST1A, en el generador 2 el modelo DC1A y en el generador 4 el AC1A, se analizará con los valores ya corregidos (en el caso del DC1A y AC1A) para los cuales se obtuvieron comportamiento aceptable de los mismos.

En las gráficas 3.51 y 3.52 se muestra como la reacción de los sistemas DC y AC en comparación con los ST es pequeña.

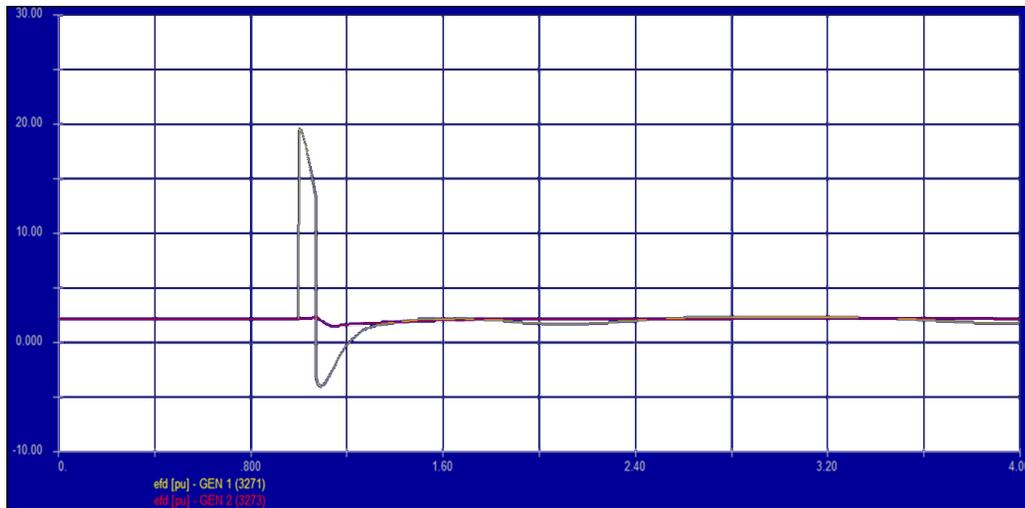


Figura 3.51. Comportamiento de la tensión de campo V_f ante la perturbación (generadores 1 y 2).

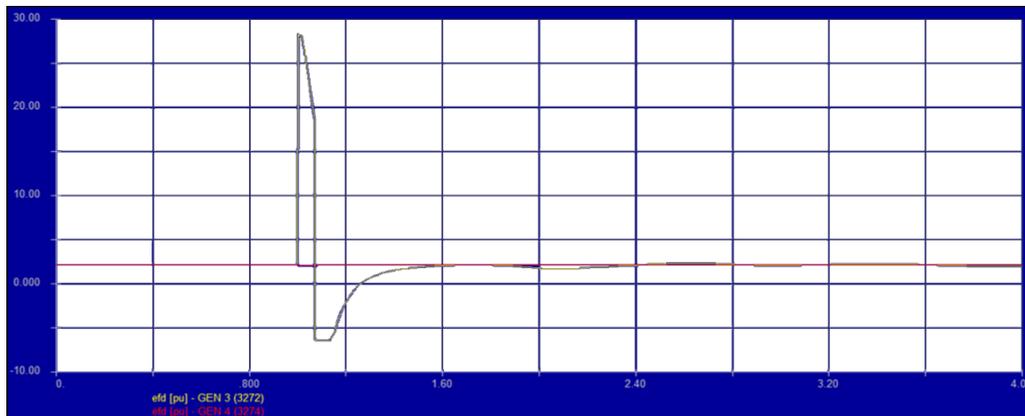


Figura 3.52. Comportamiento de la tensión de campo V_f ante la perturbación (generadores 3 y 4).

El anterior efecto tiene el mismo impacto sobre la tensión en bornes de la máquina sincrónica, como se muestra en las figuras 3.53 y 3.54.

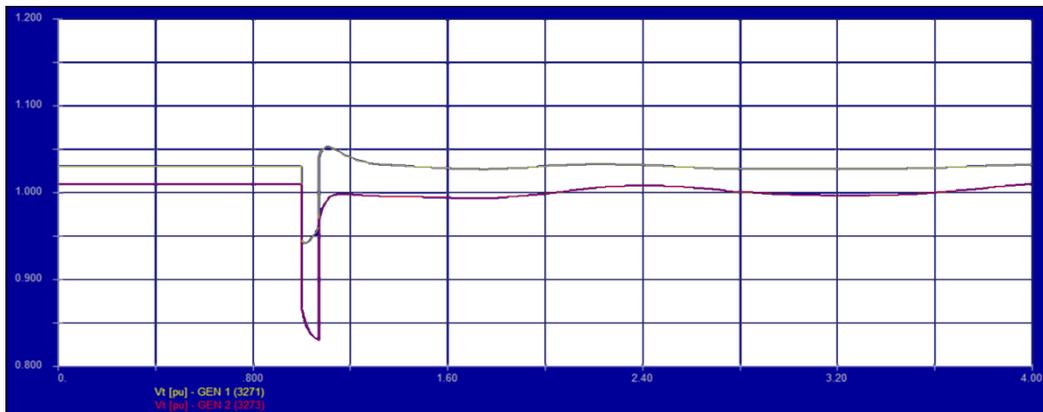


Figura 3.53. Tensión en terminales V_t de los generadores 1 y 2

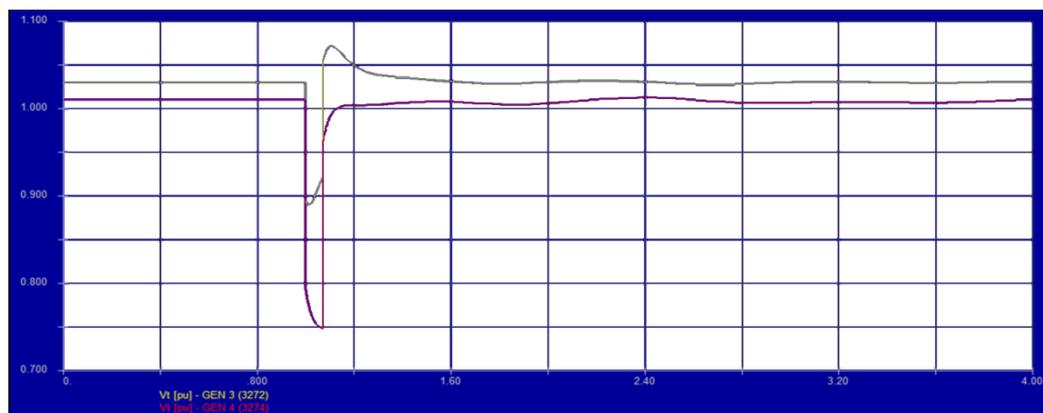


Figura 3.54. Tensión en terminales V_t de los generadores 3 y 4

En relación a la estabilidad de ángulo, se observa como la misma si se ve desmejorada al utilizar combinaciones de sistemas de excitación en el sistema de potencia de estudio (en comparación con la utilización de solo sistemas AC1A, previo ajuste de los parámetros que lo conforman), ya que presenta un comportamiento similar a los sistemas DC y ST mostrado en los análisis anteriores de esta misma simulación. En la figura 3.55 es expuesto el comportamiento del ángulo del rotor de los generadores 1, 2 y 4; el generador 3, por ser el generador de referencia mantiene constante estos parámetros.

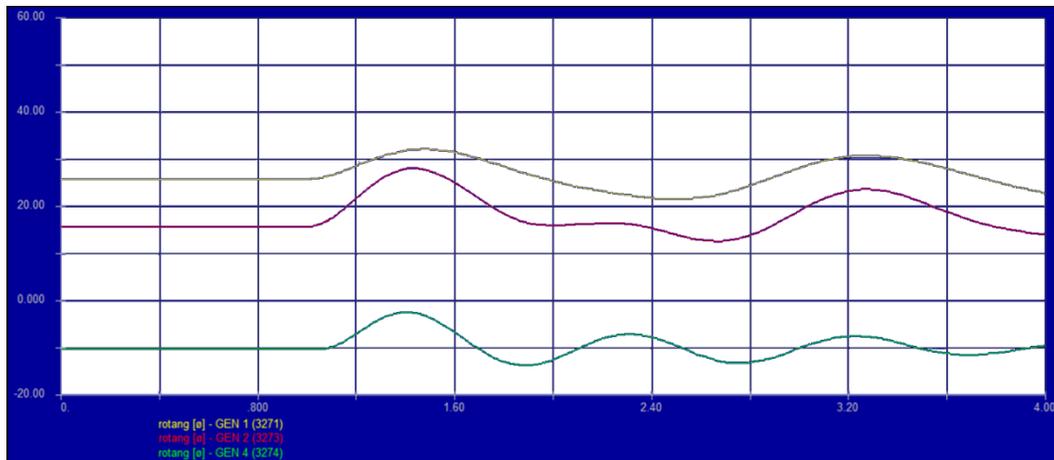


Figura 3.55. Variación del ángulo del rotor de los generadores 1, 2 y 4 ante la perturbación

Quinto análisis: en este caso se hace variar la carga 7 del sistema de la figura 3.25 en un 10% y se observa el comportamiento de los distintos modelos de los sistemas de excitación; este análisis se hará con el sistema trabajado en el cuarto análisis, es decir, con los distintos modelos trabajando en un mismo sistema al mismo tiempo y bajo los valores de los parámetros ya sintonizados.

La figura 3.56 muestra el efecto sobre la tensión de campo V_f de los generadores 1 y 2, provistos de sistemas de excitación ST1A y DC1A, en donde la respuesta de la tensión de campo del generador 1 presenta un alto sobre disparo, así como también oscilación con mayor magnitud, en comparación con la tensión de campo del generador 2. En la figura 4.57 se muestra el comportamiento de la tensión de campo de los generadores 3 y 4, en este caso el generador 3 presenta un alto sobre disparo y mayores oscilaciones que la tensión de campo del generador 4. El generador 3 posee un sistema de excitación ST1A y el generador 4 uno AC1A. Se observa como el sistema ST1A presenta mayor sobre disparo y oscilaciones que los sistemas AC1A y DC1A.

En relación al ángulo del rotor, ninguno de los modelos es capaz de conseguir que este se estabilice, siendo los generadores 1 y 2 los que presentan peor comportamiento en relación al ángulo; mientras que el generador 4 presenta un comportamiento oscilante, pero con tendencia a la estabilización. La figura 3.60 muestra el comportamiento antes mencionado.

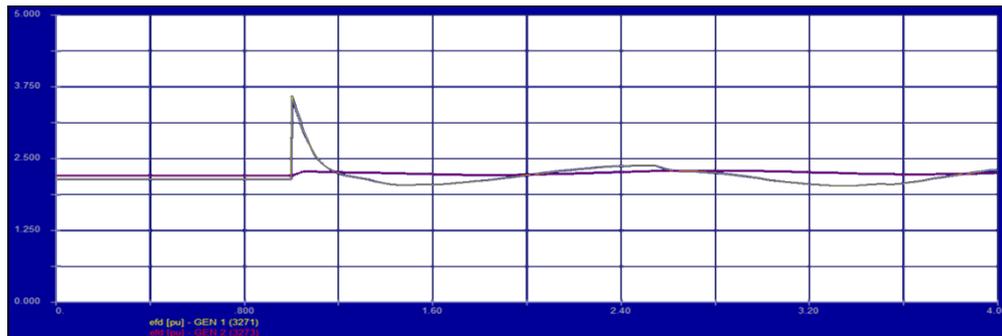


Figura 3.56. Comportamiento de la tensión de campo V_f ante la perturbación (generadores 1 y 2).

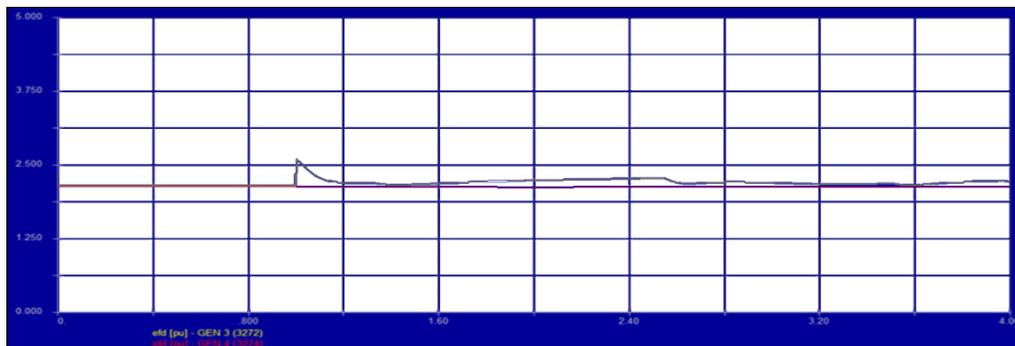


Figura 3.57. Comportamiento de la tensión de campo V_f ante la perturbación (generadores 3 y 4).

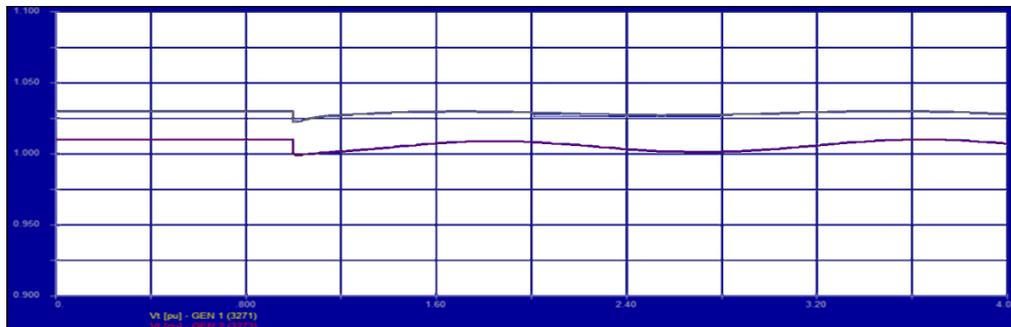


Figura 3.58. Tensión en terminales V_t de los generadores 1 y 3

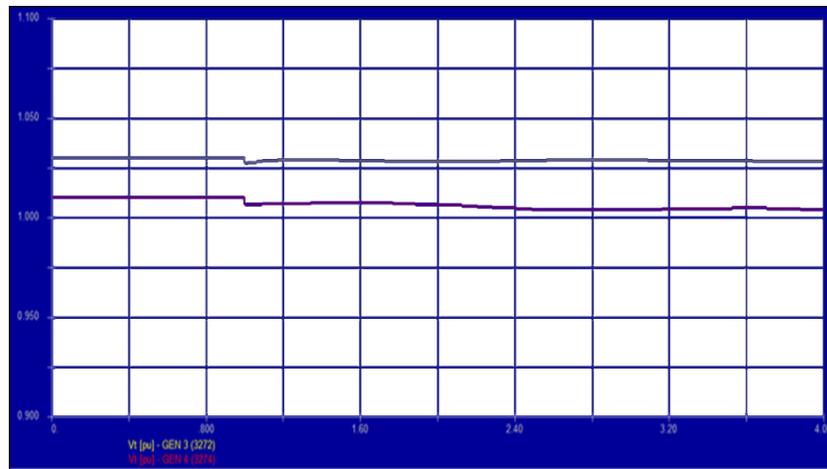


Figura 3.59. Tensión en terminales V_t de los generadores 2 y 3

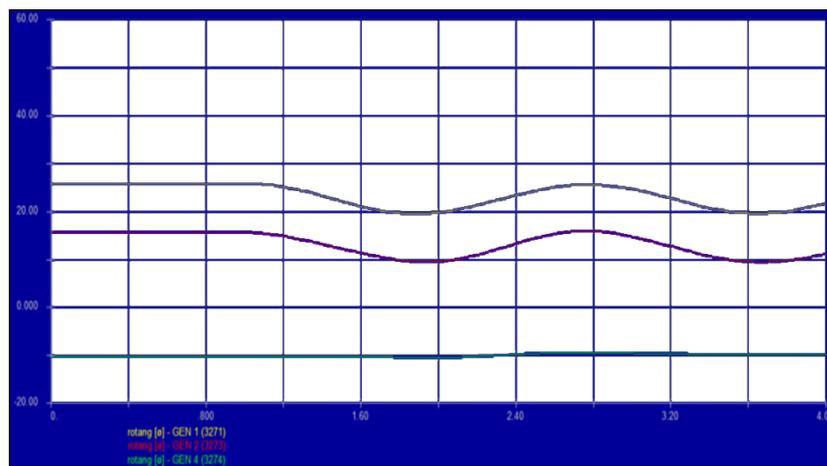


Figura 3.60. Variación del ángulo del rotor de los generadores 1, 2 y 4 ante la perturbación

3.4.3 Tercera simulación. Efecto que introduce el estabilizador de sistemas de potencia (PSS).

Esta simulación fue tomada del ejemplo 13.2 del capítulo 13 de la referencia tal, consiste en un generador conectado a través de un transformador y una línea a una barra infinita, se inyecta un fallo trifásico en la barra que conecta el transformador con la línea y esta es despejada en los siguientes 0.07seg después de ocurrido el fallo. A través de este ejemplo se va a introducir el efecto de los PSS como elemento de control en los sistemas de

potencia. En la figura 4.61 se muestra el diagrama unifilar de este ejemplo, bajo la simbología del PSAT

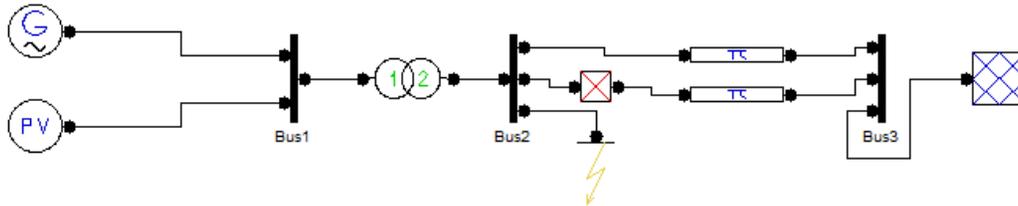


Figura 3.61. Diagrama unifilar del ejemplo planteado para la tercera simulación.

En la figura 3.62 se muestra como con la incorporación del PSS el tiempo de asentamiento del sistema de excitación se disminuye en forma considerable, trayendo como consecuencia que la tensión en terminales del generador, no solo logre estabilizarse, sino que también lo haga en un tiempo muy corto (figura 3.63).

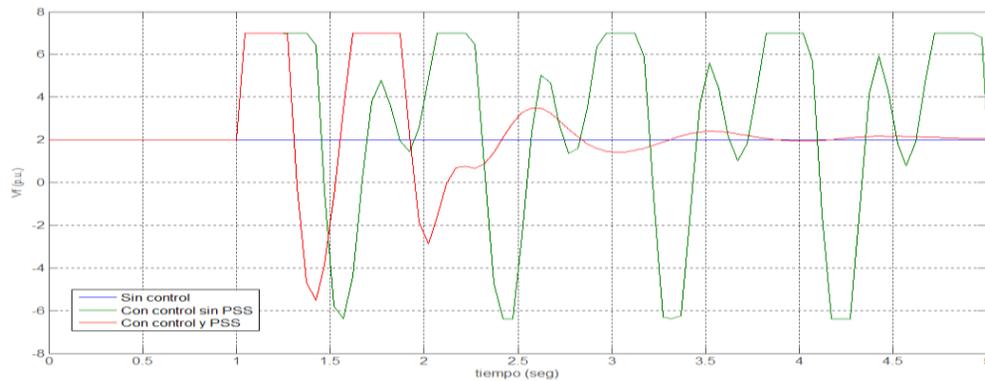


Figura 3.62. Comportamiento de la tensión de campo V_f ante la perturbación.

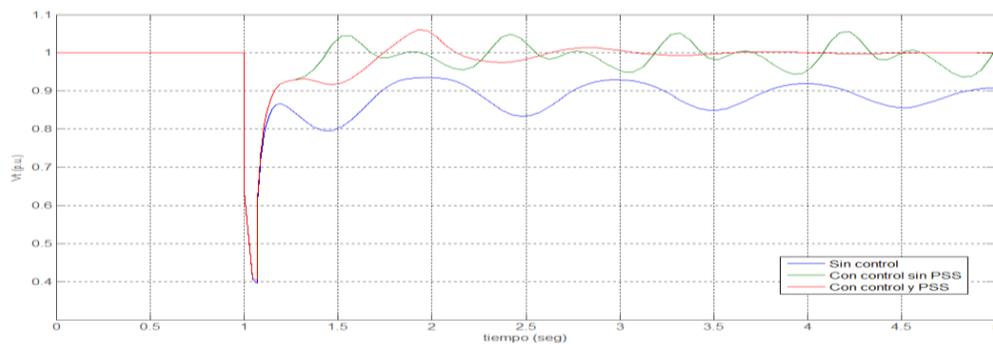


Figura 3.63. Comportamiento de la tensión en terminales V_t ante la perturbación.

En relación al ángulo del rotor de la maquina sincrónica, en la segunda simulación quedo expuesto como en ocasiones con solo el efecto de los sistemas de excitación no se logra corregir dicho ángulo, sin embargo, con la conexión del PSS se mejora de manera considerable este factor. La figura 3.64 muestra como el ángulo del rotor se estabiliza rápidamente a un nuevo valor, una vez levantado el fallo.

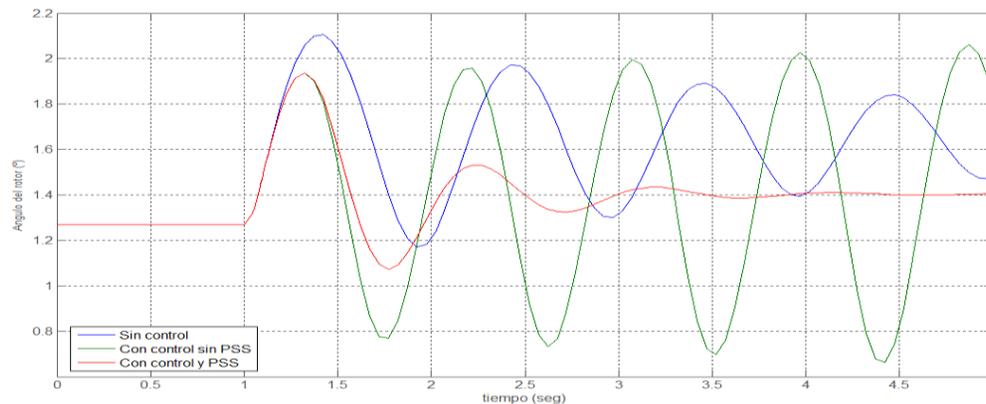


Figura 3.64. Comportamiento del ángulo del rotor de la maquina sincrónica ante la perturbación

3.4.4 Cuarta simulación. Impacto de la utilización de los PSS sobre el sistema de potencia simple de áreas interconectadas

En esta simulación se retoma el sistema estudiado en la segunda simulación, con la incorporación del PSS en cada uno de los sistemas de excitación. Se utiliza la última configuración planteada, para así poder ver el efecto sobre cada uno de los modelos en un mismo sistema. En relación a los valores de los parámetros, para los sistemas de excitación se usan los valores establecidos en el estándar IEEE 421.5, este a su establece valores para los PSS que se utilicen para cada uno de los modelos de excitación. La tabla 3.6 se muestra los valores de los parámetros para los PSS de acuerdo con el modelo de sistema de excitación al que estén conectados. El análisis de la obtención de estos parámetros escapa del objetivo de este trabajo, sin embargo, existe una metodología de sintonización que se

basa en un procedimiento muy similar al estudiado en este trabajo. El modelo de PSS utilizado es el definido en el capítulo I.

Tabla 3.6. Valores de los parámetros del PSS de acuerdo al modelo de excitación

<i>Valores de los parámetros del PSS</i>			
<i>Parámetros</i>	<i>DCIA</i>	<i>ACIA</i>	<i>STIA</i>
<i>T1</i>	<i>0.5</i>	<i>0.5</i>	<i>0.3</i>
<i>T2</i>	<i>0.06</i>	<i>0.06</i>	<i>0.03</i>
<i>T3</i>	<i>0.5</i>	<i>0.5</i>	<i>0.3</i>
<i>T4</i>	<i>0.06</i>	<i>0.06</i>	<i>0.03</i>
<i>T5</i>	<i>30</i>	<i>30</i>	<i>10</i>
<i>T6</i>	<i>0.016</i>	<i>0.016</i>	<i>0</i>
<i>A1</i>	<i>0</i>	<i>0</i>	<i>0.061</i>
<i>A2</i>	<i>0</i>	<i>0</i>	<i>0.0017</i>
<i>Ks</i>	<i>3.15</i>	<i>3.15</i>	<i>5</i>
<i>Vstmax</i>	<i>0.05</i>	<i>0.05</i>	<i>0.05</i>
<i>Vstmin</i>	<i>0.05</i>	<i>0.05</i>	<i>0.05</i>

Primer análisis: en este análisis se estudia el comportamiento del sistema ante la inyección de una barra trifásica en la barra 8 de este sistema. En las figuras 3.65 y 3.66 se observa la tensión en los terminales de los generadores 1 y 2, y los generadores 3 y 4 respectivamente. Si se comparan estos resultados con el sistema actuando bajo el mismo fallo, pero sin PSS (figura 3.53 y 3.54), se observa un comportamiento más suave cuando se tiene conectado el PSS.

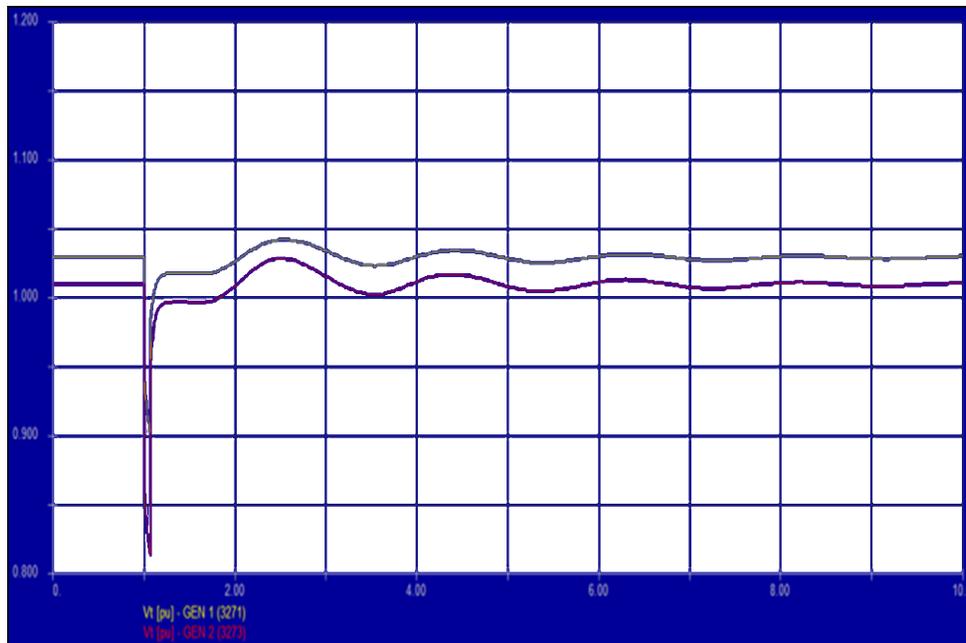


Figura 3.65. Tensión en terminales V_t de los generadores 1 y 2

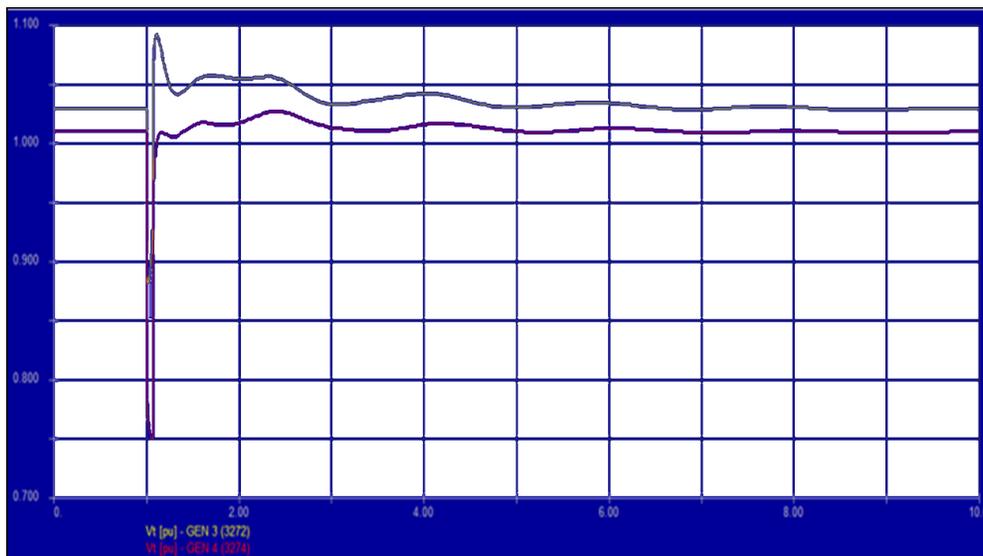


Figura 3.66. Tensión en terminales V_t de los generadores 3 y 4

La contribución más importante del PSS es que origina una rápida respuesta del sistema, haciendo que el ángulo del rotor alcance un nuevo estado de estabilidad en un tiempo relativamente corto, como se aprecia en la figura 3.67.

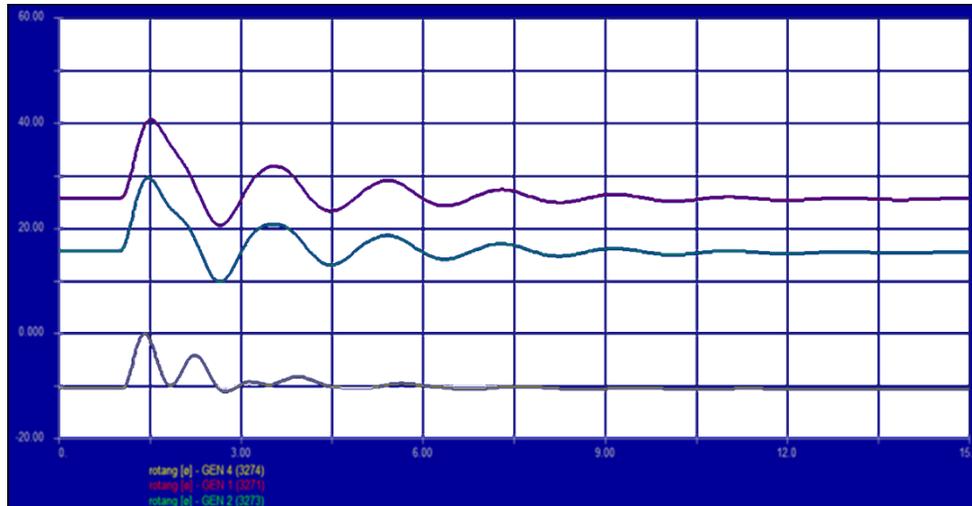


Figura 3.67. Variación del ángulo del rotor de los generadores 1, 2 y 4 ante la perturbación

Segundo análisis: En el caso de la variación de carga, el PSS tiene el mismo impacto que en el análisis anterior, haciendo que los sistemas tengan una respuesta más rápida ante dicha variación (figuras 3.68 y 3.69), así como también se puede lograr que el ángulo del rotor tienda a estabilizarse más rápidamente (figura 3.70)

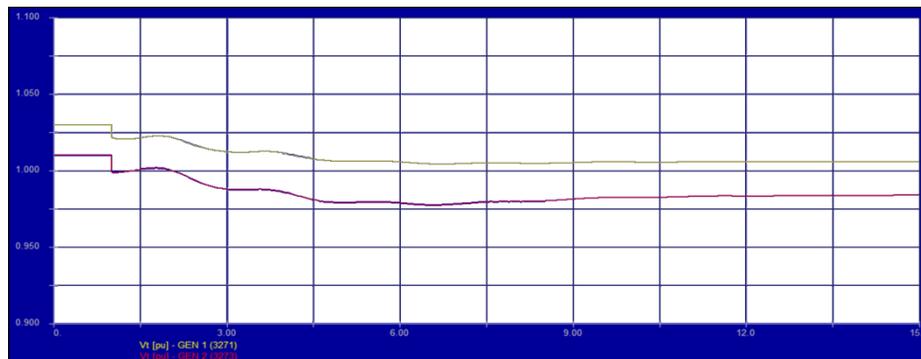


Figura 3.68. Tensión en terminales V_t de los generadores 1 y 2

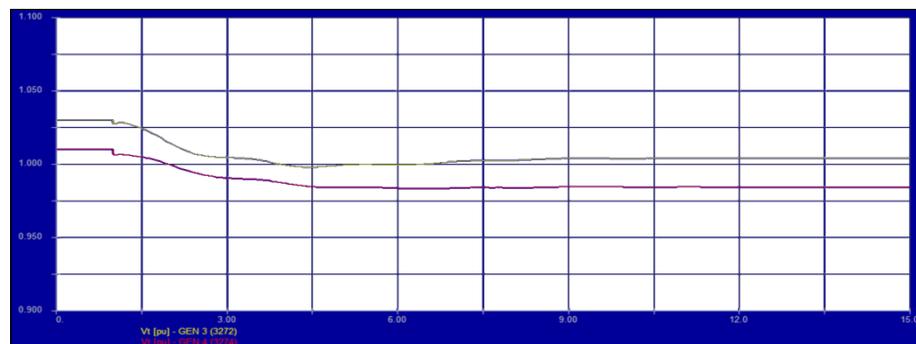


Figura 3.69. Tensión en terminales V_t de los generadores 3 y 4

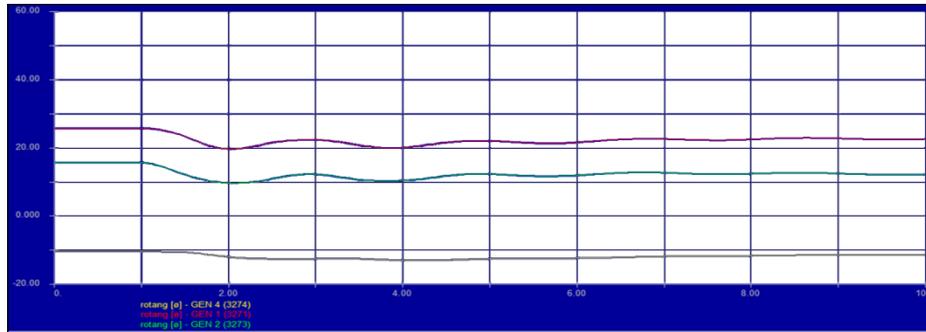


Figura 3.70. Variación del ángulo del rotor de los generadores 1, 2 y 4 ante la perturbación

3.4.5 Quinta simulación. Red de 9 barras y 3 generadores sincrónicos.

Este ejemplo fue tomado de Rangel, 2003. Este sistema presenta sistemas de excitación en cada uno de los generadores, y en el generador 2 se incorpora un PSS, el cual toma la velocidad angular de la máquina como dato de referencia a su entrada, para así lograr estabilizar el funcionamiento de la máquina. A este sistema se le introduce un fallo asimétrico en la barra 7 a los 0.01seg. Este sistema fue montado para su análisis en PSAT.

Tabla 3.7. Datos de los generadores de la quinta simulación

<i>Datos del generador</i>			
<i>Generador</i>	<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>
<i>MVA</i>	247,5	192,0	128,0
<i>kV</i>	16,5	18,0	13,8
<i>Factor de potencia</i>	1,0	0,85	0,85
<i>Tipo</i>	<i>Hidr.</i>	<i>Vapor</i>	<i>Vapor</i>
<i>Velocidad (rev/min)</i>	180	3600	3600
<i>X_d</i>	0,146	0,8958	13,125
<i>X_d'</i>	0,0608	0,1198	0,1813
<i>X_p</i>	0,0969	0,8645	12,578
<i>X_q'</i>	0,0969	0,1969	0,25
<i>X_l</i>	0,0336	0,0521	0,0742
<i>τ_{do}'(seg)</i>	8,96	6	5,89
<i>τ_{qo}'(seg)</i>	0	0,535	0,6
<i>H(MW*s)</i>	2364	640	301

Tabla 3.8. Valores de líneas de la quinta simulación.

<i>Datos de líneas</i>		
<i>Línea</i>	<i>Impedancia serie</i>	<i>Admitancia transversal</i>
<i>L 4-5</i>	$0.01 + j0.085$	$j0.088$
<i>L 5-7</i>	$0.032 + j0.161$	$j0.153$
<i>L 7-8</i>	$0.0085 + j0.072$	$j0.0745$
<i>L 8-9</i>	$0.0119 + j0.1008$	$j0.1045$
<i>L 9-6</i>	$0.039 + j0.17$	$j0.179$
<i>L 6-4</i>	$0.017 + j 0.092$	$j0.079$

Tabla 3.9. Datos de los transformadores de la quinta simulación.

<i>Transformadores</i>	<i>Impedancia serie</i>	<i>Tipo de conexión</i>
<i>T 1-4</i>	$j0.0576$	16.5kV d / 230 YN
<i>T 2-7</i>	$j0.0625$	18kV d / 230 YN
<i>T 3-9</i>	$j0.0586$	13.8kV d / 230 YN

Se utilizó un sistema de excitación tipo II (figura 3.4) y un PSS tipo II (figura 3.6), cuyos valores de los parámetros se muestran en la tabla 3.10.

Tabla 3.10. Datos de los AVR y del PSS de la quinta simulación.

Parametros del AVR				Parametros del PSS			
Ka	20	Tr	0.001	Kw	50	T2	0.05
Ta	0.2	A	0.0039	Tw	0.5	T3	0.01
Kf	0.063	B	1.555	Ka	25	T4	0.005
Tf	0.35	Vrmax	5	Ta	0.5	Vsmax	0.05
Td	0.314	Vrmin	-5	T1	0.1	Vsmin	-0.05

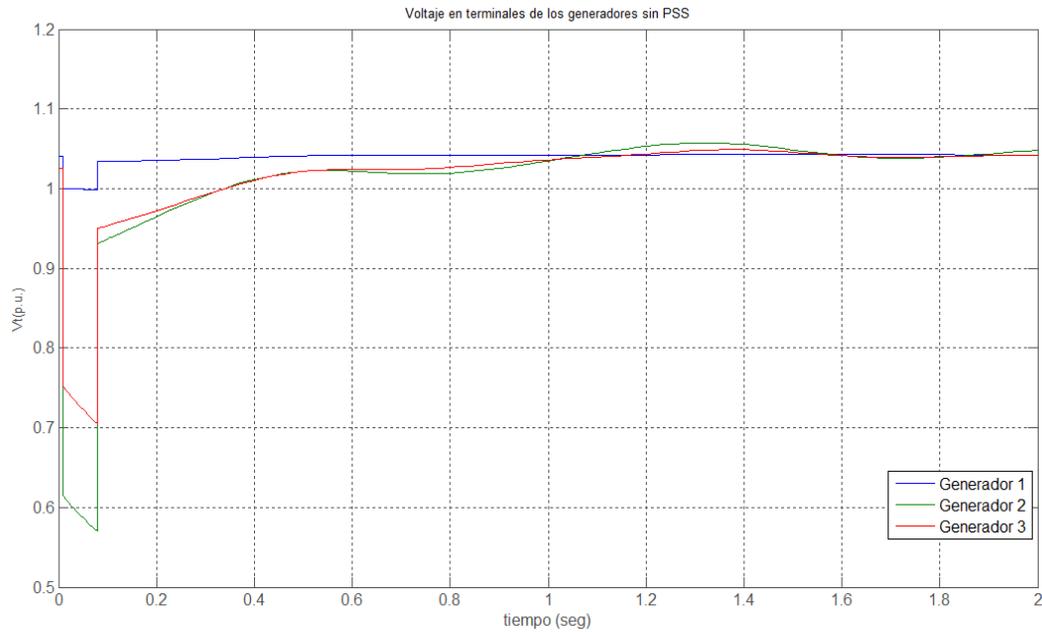


Figura 3.72. Tensión en terminales V_t de los generadores 1, 2 y 3, sin PSS

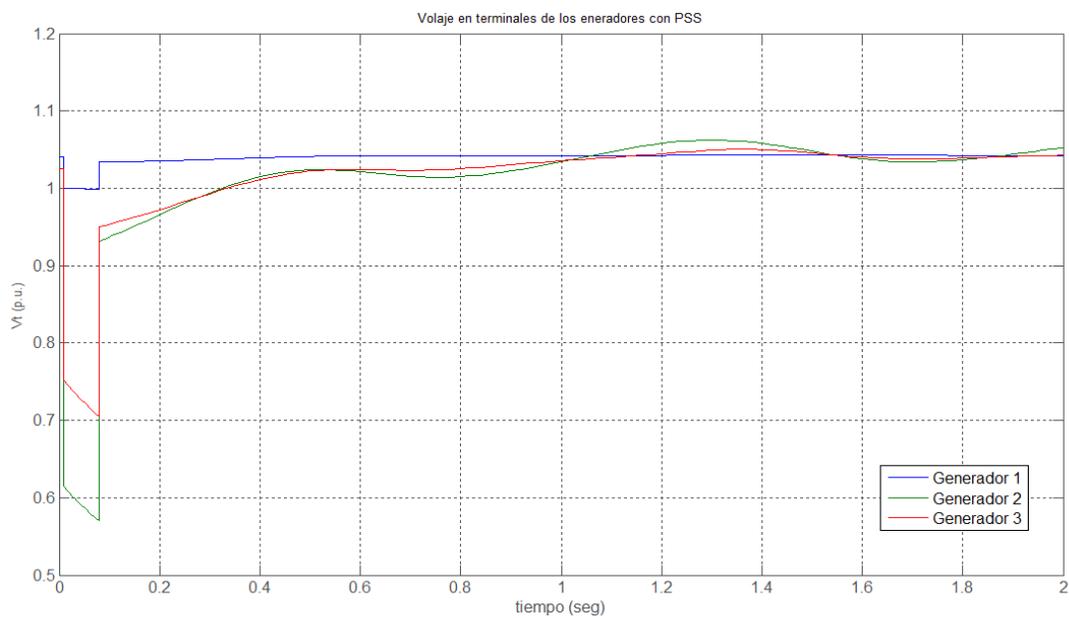


Figura 3.73 Tensión en terminales V_t de los generadores 1, 2 y 3 con PSS

En la figura 3.73 se muestra como, aún con la incorporación del PSS no se logra hacer que el ángulo de rotor de los generadores 2 y 3 se establezca, a diferencia del efecto alcanzado en los ejemplos antes estudiados.

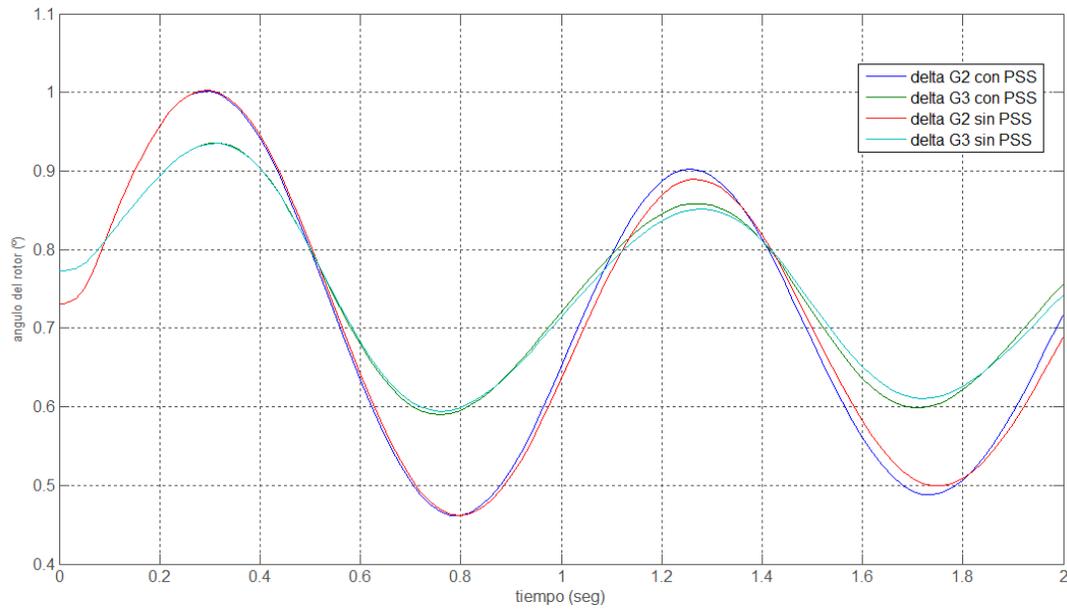


Figura 3.74. Variación del ángulo del rotor de los generadores 1 y 2 ante la perturbación, con y sin PSS.

CONCLUSIONES

- Desde el punto de vista del análisis dinámico, no importa qué modelo de sistema de excitación se estudie, si el parámetro es común entre estos modelos, el impacto de la variación de este parámetro sobre los índices de control es el mismo en los distintos modelos de estudio. Esto se debe a que para este estudio dinámico se desprecia los efectos de los circuitos limitadores, de protecciones y rectificadores; responsables de la mayoría de las diferencias entre los distintos modelos.
- Si los valores de los parámetros comunes poseen una diferencia muy marcada, sólo cambiará el intervalo donde se cumplen las condiciones para estabilidad de los sistemas de control, así como la magnitud del impacto sobre el sistema, pero la tendencia de comportamiento seguirá siendo igual
- A raíz de los resultados obtenidos en las simulaciones, se puede concluir que un método de sintonización y ajuste de parámetros, el cual se podría basar en los resultados que se obtengan de un análisis dinámico previo de cualquier modelo de sistema de excitación, y el modelo lineal simplificado de la máquina a la cual se conectará, es factible, mejorando así el desempeño del sistema de excitación en conjunto con la máquina a la cual se le realice dicho análisis.
- Los valores de los parámetros de los sistemas de excitación encontrados en las distintas referencias, no son valores que puedan tomarse como fijos, sólo son valores de referencia. Para cualquier modelo que se estudie habría que realizar un sintonización para obtener valores que satisfagan los criterios de funcionamiento que se planteen, desde el punto de vista de la máquina sincrónica y del sistema de potencia.
- El impacto de la variación de los parámetros es mayor a la salida del sistema de excitación, en comparación el impacto a la salida de la máquina sincrónica, esto debido a las distintas constantes de tiempo de la máquina que son despreciadas para el análisis

dinámico del capítulo II. Sin embargo, la tendencia del impacto es la indicada en la tabla 2.13 del capítulo antes mencionado.

- Si los valores de funcionamiento llegan a estar fuera de los límites de los circuitos limitadores de los sistemas de excitación, éste pierde la capacidad de controlar la salida de la máquina, efecto que se traducirá en salida de servicio de la unidad generadora a la cual esté relacionada.
- De los tres tipos de sistemas, el que muestra mejor comportamiento son los sistemas de excitación estáticos, teniendo una rápida respuesta ante perturbaciones del sistema. Esto sin la incorporación del PSS.
- Los sistemas de excitación presentan mejor comportamiento ante perturbaciones severas que ante perturbaciones transitorias de pequeña señal, logrando mantener la estabilidad; mientras que para variaciones de carga, estos presentan un desenvolvimiento pobre desde el punto de vista de estabilidad del sistema.
- La incorporación de los circuitos controladores del sistema de potencia (PSS) tienen un impacto positivo sobre la respuesta de los sistemas de excitación, reduciendo el tiempo de respuesta, lo que permite una mayor estabilidad en el sistema de potencia. El modelo que mejor se comporta con PSS son los AC, alcanzando una estabilidad de tensión y ángulo en un tiempo considerablemente pequeño.

RECOMENDACIONES

Para la continuación efectiva del presente trabajo, se recomienda en un futuro:

- Realizar un trabajo en donde se validen los modelos aquí planteados, así como la sintonización de los parámetros, mediante ensayos en físico (o en planta, según sea el caso).
- De acuerdo a la naturaleza de la carga (resistivo, inductivo o capacitivo), el comportamiento que tendrán los sistemas de excitación será de una forma específica. Se recomienda realizar un estudio en donde se analicen los efectos de las cargas sobre los sistemas de excitación.
- Como el presente trabajo realiza un estudio de los modelos de sistemas de excitación desde el punto de vista de control, se propone la implementación de estos modelos, bajo la forma de controladores PI, PD y PID. Este trabajo se podría realizar con herramientas electrónicas, y con base en las máquinas con las que cuenta la universidad.
- En base a la electrónica de potencia, diseñar un sistema de excitación estático. Este estudio podría estar dividido en dos etapas, una primera etapa de estudio y simulación, el cual se podría desarrollar con el software de cálculo de ingeniería MATLAB®; una segunda etapa de implementación. En este caso se debe estudiar el efecto de la corriente de carga del excitador, ya que esta representa una entrada a los rectificadores en dichos sistemas de excitación.
- Desarrollar un estudio formal de la obtención de los distintos parámetros de los sistemas de excitación, bajo la aplicación de algoritmos genéticos.

- Desde el punto de vista del control del sistema de potencia, se recomienda desarrollar un estudio de los estabilizadores de sistemas de potencia (PSS), la identificación de los parámetros y sus efectos sobre la estabilidad de los sistemas de potencia.

REFERENCIAS

- Agee J., & Shawn P. (1998). Excitation System Testing and Model Validation. Bureau of Reclamation, 177-182. Consultado el 26 de Marzo de 2009. Disponible en <http://ieeexplore.ieee.org/Xplore/>
- Anderson, P. & Fouad A. (2003). Power System Control and Stability. California: Wiley-Interscience.
- Benjamin C. Kuo. (1996). Sistemas de Control Automático. México: Prentice Hall
- Boldea I. (2005). Synchronous Generators. Florida: Taylor & Francis Group.
- Dorf R. (2005). Sistemas de Control Moderno. España: Prentice Hall.
- García de Jalón y Rodríguez, J (2005). Aprenda Matlab 7.0. Universidad Politécnica de Madrid.
- IEEE Std. 421.1. (2007). IEEE Standard Definitions for Excitation Systems for Synchronous Machines-IEEE Std 421.1-2007. New York.
- IEEE Std. 421.2. (1990). IEEE Guide for Identification, Testing, and Evaluation of the Dynamic Performance of Excitation Control Systems- IEEE Std 421.2-1990. New York.
- IEEE Std. 421.5. (2005). IEEE Recommended Practice for Excitation System Models for Power System Stability Studies-IEEE Std 421.5-2005. New York.
- Katsuhiko Ogata (1998). Ingeniería de Control Moderna. México: Prentice Hall.
- Kundur, P. (1994). Power System Stability and Control. California: McGraw-Hill.
- Milano, F. (2008) "PSAT", Power System Analysis Toolbox Documentation for PSAT version 2.1.2. Disponible en: <http://www.power.uwaterloo.ca/~fmilano/archive/psat-20080214.pdf>
- Moreno L., Garrido S., & Balaguer C. (2003). Ingeniería de Control, Modelado y Control de Sistemas Dinámicos. España: Ariel ciencia.
- Poveda M. & Rivera P. (1987). Estudio de los Sistemas de Excitación y Reguladores de Voltaje de la Máquinas Síncronas. JIEE, Vol. 8. 178-198.

- Rangel José. (2003). Simulación y Modelado de la Máquina Síncrona Mediante el uso de EMTP/ATP. Tesis. Universidad de los Andes. Venezuela.
- Saavedra Andrés, Ramírez José, Vázquez Hernando. “Sin fecha”. “Validación de los Modelos de Control de Generación para el Estudio de Estabilidad de la Central Hidroeléctrica de Salvajina. Parte II, Control de Excitación”. Consultado el 6 de Marzo de 2009, disponible http://objetos.univalle.edu.co/files/Validacion_modelos_sistemas_control_generacion_salvajina_ParteII.pdf
- Vanfretti L. (2005). Modelado de la Máquina Síncrona y su Operación en Sistemas de Potencia. Universidad de San Carlos de Guatemala. Guatemala. Consultado el 6 de Marzo de 2009. Disponible en http://128.113.2.9/~vanfrl/pdfs/sp_resumen_tesis_lvanfretti.pdf
- Vanfretti L. (2007). Sistemas de Control de Excitación y Estabilizadores de Sistemas de Potencia. Universidad de San Carlos de Guatemala. Guatemala. Consultado el 6 de Marzo de 2009. Disponible en http://128.113.2.9/~vanfrl/pdfs/AVRPSS_LV_2007.pdf

ANEXOS

Rutina implementada en MATLAB® para el análisis dinámico de los sistemas de excitación (capítulo II).

```

% close all;
% clear all;
% clc
% DEFINICIÓN DE VARIABLES
% MgananciaLD=0;
% MfaseLD=0;
% MPTLC=0;
% WGTLD=0;
% WPTLD=0;
% WBTL C=0;
% LDTiempoderizado=0;
% LDTiempodeasentamiento=0;
% LDBandadeasentamientoMin=0;
% LDBandadeasentamientoMax=0;
% LDSobredisparo=0;
% LDSubdisparo=0;
% LDPico=0;
% LDTiempodepico=0;
% LCTiempoderizado=0;
% LCTiempodeasentamiento=0;
% LCBandadeasentamientoMin=0;
% LCBandadeasentamientoMax=0;
% LCSobredisparo=0;
% LCSubdisparo=0;
% LCPico=0;
% LCTiempodepico=0;
% TFLD=0;
% TFLC=0;
% DEFINICIÓN DE LOS PARAMETROS DE LOS MODELOS DE SISTEMAS DE EXCITACIÓN
% % Parametros de G1
% Ka=187;
% Ta=0.89;
% %Parametros de G2
% Ke=1;
% Te=1.15;
% %Parametros de G3
% Tc=0.173;
% Tb=0.06;
% %Parametros de H
% Kf=0.058;
% Tf=0.62;
% %Parametros de GP
% Kg=0.119;
% Tg=5.2;
%
%

```

```

% %Definición de Funciones de Transferencia (VARIA DE ACUERDO AL MODELO)
% G1=tf([Ka],[Ta 1]);
% G2=tf([1],[Te Ke]);
% G3=tf([Tc 1],[Tb 1]);
% H=tf([Kf 0],[Tf 1]);
% GP=tf([Kg],[Tg 1]);
% Lazodirectoexcitacion=G1*G2*G3;
% Lazocerradoexcitacion=feedback(Lazodirectoexcitacion,H);
% Lazodirecto=Lazocerradoexcitacion*GP;
% Lazocerrado=feedback(Lazodirecto,1);
%
% ResultadosLD = stepinfo(Lazodirecto,'RiseTimeLimits',[0.05,0.5]);
% LDTiempoderisado=[LDTiempoderisado ResultadosLD.RiseTime];
% LDTiempodeasentamiento=[LDTiempodeasentamiento
ResultadosLD.SettlingTime];
% LDBandadeasentamientoMin=[LDBandadeasentamientoMin
ResultadosLD.SettlingMin];
% LDBandadeasentamientoMax=[LDBandadeasentamientoMax
ResultadosLD.SettlingMax];
% LDSobredisparo=[LDSobredisparo ResultadosLD.Overshoot];
% LDSubdisparo=[LDSubdisparo ResultadosLD.Undershoot];
% LDPico=[LDPico ResultadosLD.Peak];
% LDTiempodepico=[LDTiempodepico ResultadosLD.PeakTime];
%
% ResultadosLC = stepinfo(Lazocerrado,'RiseTimeLimits',[0.05,0.5]);
% LCTiempoderisado=[LCTiempoderisado ResultadosLC.RiseTime];
% LCTiempodeasentamiento=[LCTiempodeasentamiento
ResultadosLC.SettlingTime];
% LCBandadeasentamientoMin=[LCBandadeasentamientoMin
ResultadosLC.SettlingMin];
% LCBandadeasentamientoMax=[LCBandadeasentamientoMax
ResultadosLC.SettlingMax];
% LCSobredisparo=[LCSobredisparo ResultadosLC.Overshoot];
% LCSubdisparo=[LCSubdisparo ResultadosLC.Undershoot];
% LCPico=[LCPico ResultadosLC.Peak];
% LCTiempodepico=[LCTiempodepico ResultadosLC.PeakTime];
% DEFINICIÓN DE CÁLCULOS A REALIZAR EN LAZO ABIERTO
% [Gm,Pm,Wg,Wp] = margin(Lazodirecto);
% MgananciaLD=[MgananciaLD Gm];
% MfaseLD=[MfaseLD Pm];
% WGTLD=[WGTLD Wg];
% WPTLD=[WPTLD Wp];
% TFLD=[TFLD Tf];
% DEFINICIÓN DE CÁLCULOS A REALIZAR EN LAZO CERRADO
% [mag,pha]=bode(Lazocerrado);
% [Gm,Pm,Wg,Wp]=margin(Lazocerrado);
% magdb = 20*log10(mag);
% Mp=max(magdb);
% MPTLC=[MPTLC Mp];
% WBTLC=[WBTLC Wg];
% TFLC=[TFLC Tf];
% DEFINICIÓN DE GRAFICAS A MOSTRAR (POR COMANDOS DE MATLAB)
% figure(1);
% rlocus(Lazodirecto);hold on;
% title "LRLazodirecto";
%
% figure(2);

```

```

% bode(Lazodirecto); hold on;
% title "BLazodirecto";
% % %
% % figure(3);
% % step(Lazodirecto); hold on;
% % title "RELazodirecto";
% %
% figure(4);
% bode(Lazocerrado); hold on;
% title "BLazocerrado";
% %
% figure(5);
% step(Lazocerrado); hold on;
% title "RELazocerrado";
% %
% % figure(6);
% % nyquist(Lazodirecto); hold on;
% % title "NLazodirecto";
% %
% % figure(7);
% % nyquist(Lazocerrado); hold on;
% % title "NLazocerrado";
% %
% DEFINICION DE VARIABLES PARA GRAFICAS Vs. (VARIAN DE ACUERDO AL MODELO)
% MgananciaLD
% MfaseLD
% MPTLC
% WBTLC
% WGTLD
% WPTLD
% % LDTiempoderizado
% % LDTiempodeasentamiento
% % LDBandadeasentamientoMin
% % LDBandadeasentamientoMax
% % LDSobredisparo
% % LDSubdisparo
% % LDPico
% % LDTiempodepico
% LCTiempoderizado
% LCTiempodeasentamiento
% % LCBandadeasentamientoMin
% % LCBandadeasentamientoMax
% LCSobredisparo
% % LCSubdisparo
% % LCPico
% % LCTiempodepico
% DEFINICIÓN DE GRAFICAS Vs. A MOSTRAR (VARIAN DE ACUERDO AL MODELO)
% % figure(9);plot(TFLD,MgananciaLD)
% % figure(10);plot(TFLD,MfaseLD)
% % figure(11);plot(TFLD,WGTLD)
% % figure(12);plot(TCLD,WPTLD)
% % figure(13);plot(TALD,LDTiempoderizado)
% % figure(14);plot(KELD,LDTiempodeasentamiento)
% % figure(15);plot(TCLD,LDBandadeasentamientoMin)
% % figure(16);plot(TCLD,LDBandadeasentamientoMax)
% % figure(17);plot(KELD,LDSobredisparo)
% % figure(18);plot(TCLD,LDSubdisparo)

```

```
% % figure(19);plot(TCLD,LDPico)
% % figure(20);plot(TCLD,LDTiempodepico)
% % figure(25);plot(TFLC,LCTiempoderisado)
% % figure(26);plot(TFLC,LCTiempodeasentamiento)
% % figure(27);plot(TCLC,LCBandadeasentamientoMin)
% % figure(28);plot(TCLC,LCBandadeasentamientoMax)
% % figure(29);plot(TFLC,LCSubdisparo)
% % figure(30);plot(TBLC,LCSubdisparo)
% % figure(31);plot(TCLC,LCPico)
% % figure(32);plot(TCLC,LCTiempodepico)
% % figure(34);plot(TFLC,MPTLC)
% % figure(35);plot(TFLC,WBTLC)
%
```