

UNIVERSIDAD AUTONOMA DE NUEVO LEON
FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA Y ELECTRICA



ANALISIS Y CONTROL
DE OSCILACIONES ELECTROMECHANICAS EN
SISTEMAS ELECTRICOS DE POTENCIA

TESIS

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE
DOCTOR EN INGENIERIA ELECTRICA

PRESENTA:

FERNANDO SANCHEZ TELLO

MONTERREY, NUEVO LEON

JULIO DE 1997

ANÁLISIS Y CONTROL

DE OSCILACIONES ELECTROMECÁNICAS EN
SISTEMAS ELÉCTRICOS DE POTENCIA

TD

Z5853

.M2

FIME

1997

S3

U. A. N. L.

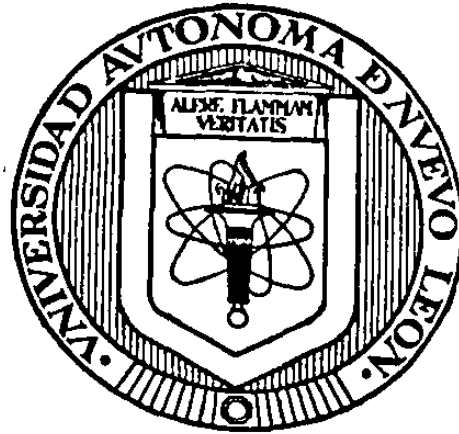
1997



1020145985

UNIVERSIDAD AUTONOMA DE NUEVO LEON

FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA Y ELECTRICA



ANALISIS Y CONTROL
DE OSCILACIONES ELECTROMECANICAS EN
SISTEMAS ELECTRICOS DE POTENCIA

TESIS
QUE PARA OBTENER EL GRADO DE
DOCTOR EN INGENIERIA ELECTRICA

PRESENTA

FERNANDO SANCHEZ TELLO

MONTERREY, N.L.

JULIO, 1997

0150-3660

TD

Z5853

•Ma

FIME

1997

S3

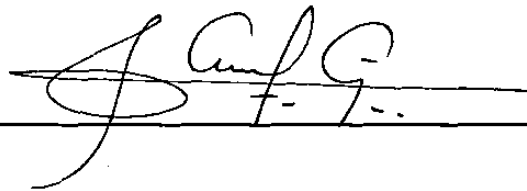


FONDO
TESIS

**ANALISIS Y CONTROL
DE OSCILACIONES ELECTROMECHANICAS EN
SISTEMAS ELECTRICOS DE POTENCIA**

Los miembros del Comité aprueban la Tesis
Doctoral de Fernando Sánchez Tello

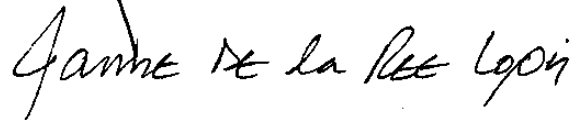
Dr. Florencio Aboytes García
Asesor



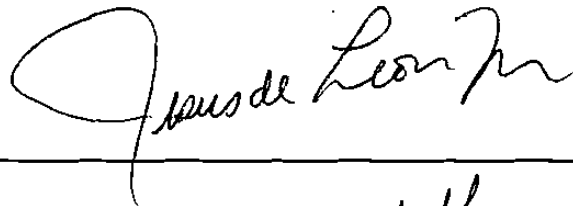
Dr. Salvador Acha Daza



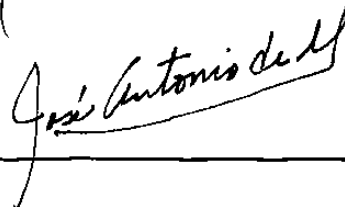
Dr. Jaime de la Ree López



Dr. Jesús de León Morales



Dr. José Antonio de la O Serna



Copyright por Fernando Sánchez Tello 1997
Reservados todos los derechos

Dedicado

A mi esposa Martha,
compañera fiel de mis andares.

A mis hijos Fernando, Ulises y Daniel,
fuente de inspiración continua.

A la memoria de mi Madre,
Vespertina Tello

Agradecimientos

Mi gratitud al Dr. Florencio Aboytes García por la asesoría de este trabajo y por brindarme su confianza en distintas actividades profesionales en las cuales he tenido el privilegio de participar.

A los profesores sinodales: Dr. Salvador Acha Daza, Dr. Jaime de la Ree López, Dr. Jesús de León Morales y Dr. Antonio de la O Serna, cuyos comentarios y sugerencias atinadas han contribuido en mejorar la calidad de este trabajo.

Al Dr. Salvador Acha, por su amistad y valioso apoyo para la culminación de este trabajo.

A mi compadre, Dr. Rogelio Ramírez Barradas, compañero de alegrías y penurias, gracias por brindarme tu apoyo siempre que lo he necesitado.

A mis compañeros del Programa Doctoral, M.C. Juan José Guerrero Garza y M.C. Luis David Aréchiga motivándolos en su esfuerzo personal.

A mis compañeros y amigos de la CFE, en particular a la Sra. Sheila Medina cuya alegría y vitalidad rompe los esquemas del trabajo cotidiano.

Al M.C. Guillermo Francis Medina por su amistad y decidida colaboración.

A los responsables del convenio CFE/CENACE-UANL/FIME.

RESUMEN

ANALISIS Y CONTROL DE OSCILACIONES ELECTROMECHANICAS EN SISTEMAS ELECTRICOS DE POTENCIA

Publicación No. _____

Fernando Sánchez Tello, Dr. en Ing. Eléctrica

Universidad Autónoma de Nuevo León, 1997

Profesor Asesor: Dr. Florencio Aboytes García

El contenido de la tesis aborda el problema de las oscilaciones electromecánicas de baja frecuencia en sistemas eléctricos de potencia (SEP's). El trabajo analiza en detalle las oscilaciones electromecánicas desde sus causas y efectos primarios, hasta el diseño y sintonización de dispositivos de control.

Se clarifican conceptos básicos que explican la física del fenómeno de inestabilidad ante pequeñas perturbaciones. Se analiza la dinámica de la máquina síncrona y aquellos factores que modifican substancialmente los pares de sincronización y amortiguamiento. Mediante la técnica de valores característicos se orienta la clasificación e identificación de modos de oscilación y su asociación con subsistemas o parámetros individuales del sistema. Se analizan e identifican las causas o situaciones que originan el problema de amortiguamiento de modos de oscilación de baja frecuencia en SEP's. Se estudia en detalle la dinámica de cada elemento en el sistema y su contribución al amortiguamiento de oscilaciones.

Se analiza a detalle las metodologías más relevantes para la ubicación, la selección de la señal de entrada y la determinación de las características de fase y ganancia para los estabilizadores de sistemas de potencia (ESP). Se proponen guías precisas para su aplicación en función del tipo de estudio a realizar, de las características del sistema analizado y de los recursos computacionales disponibles. A la fecha, no existe una metodología estándar de diseño para los ESP's.

Se presenta un análisis completo del efecto de los distintos parámetros del sistema de excitación del generador sobre el comportamiento dinámico global del sistema de potencia. Se muestra el procedimiento para determinar los ajustes del estabilizador, para mejorar la estabilidad transitoria y el comportamiento dinámico ante pequeñas perturbaciones en modos de oscilación locales, así como en modos entre áreas en grandes sistemas interconectados.

Se propone una metodología general para la aplicación de estabilizadores de potencia utilizando los controles de excitación de los generadores. La metodología se basa en un conocimiento amplio de los aspectos físicos del problema de estabilización de redes eléctricas y combina adecuadamente el análisis del comportamiento dinámico del sistema. La metodología incluye la aplicación coordinada de diversos estabilizadores.

Los sistemas eléctricos longitudinales presentan características particulares que conducen a fenómenos dinámicos típicos ante distintos tipos de perturbaciones. Esto generalmente impacta el diseño de controles. La tesis analiza en detalle esta problemática y presenta guías específicas para el diseño de controles en sistemas con estructura longitudinal. Adicionalmente, se aplica la metodología propuesta en dos SEP's reales con características longitudinales. Se presenta un análisis comparativo entre el ESP y el compensador estático de vars en la estabilización de oscilaciones y se describen las pruebas de campo que permiten verificar resultados de estudios dinámicos.

Finalmente, se presentan las conclusiones del trabajo y se hacen recomendaciones para trabajos futuros en esta área de investigación.

INDICE

Agradecimientos	iv
Resumen	v
Lista de Figuras	xii
Lista de Tablas	xviii

Capítulo I Introducción

1.1 Motivación	1
1.2 Revisión bibliográfica	5
1.3 Estructura de la Tesis	10
1.4 Aportaciones	12

Capítulo II Caracterización de Oscilaciones

2.1 Introducción	13
2.2 Representación del SEP en estudios dinámicos	15
2.3 Naturaleza de las oscilaciones electromecánicas	20
2.4 Modos de oscilación	25
2.5 Caracterización de modos de oscilación	28
2.6 Dinámica eléctrica y mecánica	39
2.7 Modos de oscilación de interés en SEP's	42
2.8 Formas características de oscilación	43

Capítulo III Amortiguamiento en SEP's

3.1 Introducción	53
3.2 Amortiguamiento en SEP's	53

INDICE (continuación)

3.3	Dinámica del generador síncrono	59
3.3.1	Representación clásica	59
3.3.2	Circuito de campo	63
3.3.3	Devanados amortiguadores	68
3.4	Cargas	77
3.4.1	Análisis del coeficiente k_p	80
3.4.2	Análisis del coeficiente k_q	85
3.4.3	Dinámica de las cargas en sistemas multimáquina	87
3.5	Condición operativa	93
3.6	Sistema de excitación	97
3.7	Estabilizador de potencia	103
3.8	Sistema gobernador de velocidad	106
3.8.1	Unidades hidráulicas	107
3.8.1.1	Pares de sincronización y amortiguamiento	113
3.8.2	Unidades térmicas	115
3.9	Compensador estático de vars	117

Capítulo IV Estabilización de Oscilaciones Electromecánicas

4.1	Introducción	129
4.2	Objetivos de la estabilización	130
4.3	Conceptos básicos de estabilización	132
4.4	Localización	139
4.4.1	vectores propio	142
4.4.2	Factores de participación	144
4.4.3	Residuos de funciones de transferencia	145
4.4.4	ESP ideal	154

INDICE (continuación)

4.5	Característica de fase	156
4.5.1	Lazo de control par-ángulo	157
4.5.2	Lazo de control del regulador de voltaje	158
4.5.3	Residuos	160
4.6	Selección de la señal de entrada	160
4.6.1	Señales locales	162
4.6.1.1	Velocidad angular	163
4.6.1.2	Frecuencia terminal	165
4.6.1.3	Señal de potencia acelerante	167
4.6.1.4	Potencia eléctrica	168
4.6.2	Señales remotas	169
4.6.2.1	Interpretación de coeficientes modales	175
4.6.2.2	Indices de diseño del controlador	176

Capítulo V Selección y Sintonización de Controles de Excitación

5.1	Introducción	181
5.2	Estructura del control	182
5.3	Selección de parámetros	184
5.3.1	Ganancia del excitador	185
5.3.2	Compensación de fase del estabilizador	186
5.3.3	Bloque restaurador	187
5.3.4	Ganancia del estabilizador	188
5.3.5	Límites de salida del ESP	188
5.4	Evaluación del comportamiento de controles	189
5.4.1	Comportamiento ante pequeñas perturbaciones	190
5.4.2	Comportamiento transitorio	197

INDICE (continuación)

5.5	Metodología general de diseño para ESP's	201
5.6	Validación de resultados	206
5.6.1	Diseño de pruebas	206
5.6.1.1	Respuesta al escalón	208
5.6.1.2	Prueba de respuesta a la frecuencia	208
5.6.1.3	Pruebas con perturbaciones	209

Capítulo VI Oscilaciones Electromecánicas en SEP Longitudinales

6.1	Introducción	210
6.2	SEP's Longitudinales	211
6.3	Resultados en SEP reales	212
6.3.1	Sistema Interconectado Colombia-Venezuela	212
6.3.1.1	Aplicación de estabilizadores	214
6.3.1.2	Caracterización de modos de oscilación	215
6.3.1.3	Ubicación de los ESP's	220
6.3.1.4	Determinación de fase y ajuste de parámetros	221
6.3.1.5	Resultados de simulación y registros reales	222
6.4	Aplicación coordinada de estabilizadores	224
6.4.1	Sistema Noroeste de CFE	224
6.4.1.1	Caracterización de modos de oscilación	224
6.4.1.2	Ubicación de ESP's	228
6.4.1.3	Característica de fase y ajuste de parámetros	230
6.4.1.4	Aplicación secuencial de ESP's	232
6.4.1.5	Evaluación de ESP's ante perturbaciones	236
6.5	Características dinámicas particulares de los SEP's longitudinales	244
6.6	Diseño de compensadores estáticos de vars	245

INDICE (continuación)

6.6.1	Señal de entrada	246
6.6.2	Ubicación del CEV	247
6.6.3	Ejemplo	247
6.6.4	ESP vs CEV	249

Capítulo VII Conclusiones y recomendaciones

7.1	Conclusiones	251
7.1.1	Caracterización de Oscilaciones	251
7.1.2	Amortiguamiento	252
7.1.3	Modos de oscilación entre áreas	252
7.1.4	Aplicación de Estabilizadores de Potencia	253
7.1.5	Selección de parámetros del estabilizador	254
7.1.6	Metodología de diseño para ESP's	255
7.1.7	Sistemas de potencia longitudinales	256
7.1.8	Aplicación de la metodología de diseño para ESP's	257
7.1.9	Aplicación de la técnica de reducción modal aproximada	258
7.1.10	Compensador estático de vars	259
7.2	Recomendaciones a trabajos futuros	259
	Referencias	262
	Apéndice I	260
	Apéndice II	273
	Artículos presentados referentes al trabajo de tesis	276

LISTA DE FIGURAS

- 2.1 Espectro de frecuencia de transitorios electromecánicos.
- 2.2 Interacción dinámica entre elementos del sistema de potencia.
- 2.3 Primomotor y generador.
- 2.4 Interacción entre variables dinámicas de un generador.
- 2.5 Sistema de potencia básico.
- 2.6 Componentes de sincronización y amortiguamiento en el par eléctrico y mecánico.
- 2.7 Formas de oscilaciones como función de K_S y K_D .
- 2.8 Comportamiento en el tiempo de variables eléctricas y mecánicas.
- 2.9 Comportamiento de variables en modo λ_7 .
- 2.10 Modelo lineal de un sistema máquina-barra infinita.
- 2.11 Efecto de la condición operativa, ganancia del excitador y reactancia externa en los modos del rotor y excitador.
- 2.12 Sistema de potencia de dos áreas y cuatro máquinas.
- 2.13 Formas características electromecánicas.
- 2.14 Variaciones de velocidad en modo de oscilación local para el Area 2 (275 MW en la interconexión).
- 2.15 Variaciones de velocidad en máquinas en el modo de oscilación entre áreas (275 MW en la interconexión).
- 2.16 Desviaciones de velocidad ante un cambio de carga de 20 MW en área exportadora (375 MW en la interconexión).
- 2.17 Aceleración de generadores ante un cambio de carga de 20 MW en Area 1 (375 MW en la interconexión).
- 2.18 Flujo de potencia en la interconexión, modo de oscilación entre áreas. Caso con 275 MW de intercambio.
- 2.19 Flujo de potencia en interconexión, modo de oscilación entre áreas. Caso con 375 MW de intercambio.

LISTA DE FIGURAS (continuación)

- 3.1 Comportamiento en el tiempo de las variables del sistema ante un incremento de potencia mecánica.
- 3.2 Plano de fase para las variaciones del par eléctrico, velocidad y ángulo.
- 3.3 Modelo incremental de una máquina, representada por su modelo clásico y una barra infinita.
- 3.4 Impacto de pares adicionales en fase con las desviaciones de velocidad del rotor.
- 3.5 Comportamiento en el tiempo para las variables del sistema ante un cambio de la potencia mecánica. Se incluye un par adicional en fase con $\Delta\omega$.
- 3.6 Representación de un sistema máquina-barra infinita.
- 3.7 Representación lineal máquina-barra infinita con E_{fld} constante.
- 3.8 Modelo lineal máquina barra infinita. Considera efectos de los devanados de campo y amortiguadores.
- 3.9 Impacto de devanados amortiguadores en K_S .
- 3.10 Impacto de devanados amortiguadores en K_D .
- 3.11 Variación de las constantes cuando la potencia del generador cambia de 25 a 250 MW.
- 3.12 Variación de constantes con carga local.
- 3.13 Efecto de carga local en coeficiente de amortiguamiento K_D .
- 3.14 Sistema de prueba máquina-barra infinita.
- 3.15 Efecto del coeficiente k_p en los pares de sincronización y amortiguamiento.
- 3.16 Componentes del par eléctrico
- 3.17 Efecto de la potencia de salida en K_S , K_2 y V_t .
- 3.18 Sensibilidad de K_S y K_D con k_p .
- 3.19 Sistema multimáquina de cuatro máquinas y dos áreas.
- 3.20 Relaciones fasoriales para $\Delta|V_i|$, $\Delta\delta$ y $\Delta\omega$ en modo de oscilación entre áreas.
- 3.21 Conmutación de carga para control de oscilaciones.
- 3.22 Efecto de la conmutación de carga en el amortiguamiento de oscilaciones.

LISTA DE FIGURAS (continuación)

- 3.23 Modelo lineal simplificado de un sistema máquina-barra infinita.
- 3.24 Variación de K_1 - K_6 con P_e y Q_e .
- 3.25 Efecto del sistema de excitación en los pares de sincronización y amortiguamiento para $K_e = 15$ y $K_e = 50$.
- 3.26 Características de la oscilación en el plano complejo.
- 3.27 Componentes del par eléctrico.
- 3.28 Representación del ESP considerando una señal de entrada diferente a $\Delta\omega$.
- 3.29 Diagrama esquemático del control de potencia mecánica.
- 3.30 Control de potencia mecánica en unidades hidráulicas.
- 3.31 Lazo de control de velocidad, sistema carga-generador.
- 3.32 Respuesta de frecuencia de lazo abierto del control de velocidad.
- 3.33 Variación de parámetros del grupo gobernador-turbina y su impacto en el amortiguamiento del rotor.
- 3.34 Diagrama de bloques del sistema de control de velocidad-par mecánico en una unidad térmica.
- 3.35 Sistema de potencia de dos máquinas y un CEV.
- 3.36 Control de voltaje integral.
- 3.37 Control de voltaje en el sistema.
- 3.38 Sistema de prueba de dos áreas.
- 3.39 Lugar de las raíces para un control de voltaje integral variando la ganancia K_{CEV} .
 $\omega_{n0} = 6.14$, $K_5 = 0.088$, $K_6 = 0.067$, $K_d = 0$.
- 3.40 Control de voltaje integral con una señal adicional de amortiguamiento.
- 3.41 Lugar de las raíces resultante al variar la ganancia K_{cev} con una señal adicional de potencia.
- 4.1 Componentes del par eléctrico.
- 4.2 Sistema máquina-barra infinita.
- 4.3 Pares de sincronización y amortiguamiento en el sistema.

LISTA DE FIGURAS (continuación)

- 4.4 Modelo lineal simplificado máquina-barra infinita.
- 4.5 Características de fase y ganancia para $GEP(s)$. Sistema máquina-barra infinita. ($X_d=0.55$, $X_q=0.54$, $X'd=0.09$, $k_e=50$, $t_e=0.05$, $T'do=6.0$, $D=1$, $H=7$)
- 4.6 Características de fase y ganancia para $\Delta E_{fld}/\Delta V_t$ en sistemas de excitación estáticos y con amplidina.
- 4.7 Características de fase y ganancia para $GEP(s)$.
- 4.8 Sistema de potencia de dos áreas y cuatro máquinas.
- 4.9 Comportamiento del enlace ante un cambio de carga de 10 MW en el Area 1.
- 4.10 Sistema de potencia multimáquina.
- 4.11 Representación del ESP *ideal*.
- 4.12 Respuesta de frecuencia para $GEP(s)$.
- 4.13 Lazo de control del regulador del voltaje.
- 4.14 Respuesta de frecuencia para $\Delta\omega(s)/\Delta V_{ref}(s)$.
- 4.15 Respuesta de frecuencia $\Delta V_{esp}(s)/\Delta V_{ref}(s)$ para distintas señales.
- 4.16 Esquema de la descomposición modal aproximada.
- 4.17 Lugar de las raíces para el modo de oscilación entre áreas. Comparación del comportamiento con distintas señales de entrada al ESP.
- 5.1 Sistema de excitación estático.
- 5.2 Diagrama de bloque del estabilizador Delta-P-Omega.
- 5.3 Sistema de prueba multimáquina.
- 5.4 Ajuste de fase del ESP sin reducción transitoria de ganancia.
- 5.5 Ajuste de fase del ESP con reducción transitoria de ganancia.
- 5.6 Efecto de K_{esp} sin reducción transitoria de ganancia.
- 5.7 Efecto de K_{esp} con reducción transitoria de ganancia.
- 5.8 Efecto de T_W .
- 5.9 Efecto de variar los límites del estabilizador.
- 5.10 Efecto de modificar el límite superior del estabilizador.

LISTA DE FIGURAS (continuación)

- 5.11 Metodología general de diseño de estabilizadores de potencia.
- 6.1 Sistema Interconectado Colombia Venezuela.
- 6.2 Elementos del vector derecho, modo 0.22 Hz.
- 6.3 Vector de participación, modo 0.22 Hz.
- 6.4 Excitación de modos de oscilación (0.22, 0.93, 1.22 Hz).
- 6.5 Ajuste de fase del ESP en Central San Carlos.
- 6.6 Registro real del flujo en línea de interconexión.
- 6.7 Simulación en el tiempo para el flujo de la interconexión con ESP's instalados.
- 6.8 Comportamiento de la línea de interconexión después del ajuste de ESP's.
- 6.9 Diagrama unifilar del sistema Noroeste de la CFE.
- 6.10 Dinámica de rotores ante la pérdida de la unidad MZD-U1.
- 6.11 Dinámica del modo de oscilación de 0.66 Hz en distintas variables del sistema.
- 6.12 Comportamiento dinámico del flujo de potencia en líneas de transmisión con la pérdida de MZD-U1.
- 6.13 Ajuste de fase para el ESP en MZD-U3.
- 6.14 Dinámica de rotores con ESP en MZD-U3.
- 6.15 Comportamiento dinámico de rotores con ESP en MZD, PLD y CMR.
- 6.16 Ajuste de fase del ESP en planta PLD.
- 6.17 Ajuste de fase del ESP en CMR-U2.
- 6.18 Desplazamiento angular de rotores con ESP's en MZD, PLD, CMR y NVL.
- 6.19 Dinámica de rotores después de instalar un ESP en TPO-U3.
- 6.20 Comportamiento dinámico de rotores ante la pérdida de la unidad PGD-U3 antes de instalar ESP's.
- 6.21 Comportamiento angular de rotores ante la pérdida de la unidad PGD-U3 después de instalar ESP's en MZD, PLD, CMR, NVL y TPO.
- 6.22 Dinámica de rotores ante la pérdida de la unidad TPO-U3 antes de instalar ESP's.

LISTA DE FIGURAS (continuación)

- 6.23 Dinámica de rotores ante la pérdida de TPO-U3 con ESP's en MZD, PLD, CMR, NVL y TPO.
- 6.24 Dinámica de rotores ante la pérdida de la unidad MZD-U1. Instalación de ESP_{ω} en MZD-U3.
- 6.25 Comportamiento de rotores ante la pérdida de la unidad MZD-U1. ESP_{ω} en plantas MZD y PLD.
- 6.26 Dinámica de rotores ante la pérdida de la unidad MZD-U1. ESP_{ω} en plantas MZD, PLD y CMR.
- 6.27 Comportamiento de rotores ante la pérdida de la unidad MZD-U1. ESP_{ω} en plantas MZD, PLD, CMR y NVL.
- 6.28 Dinámica de rotores ante la pérdida de la unidad MZD-U1. ESP_{ω} en plantas MZD, PLD, CMR, NVL y PGD.
- 6.29 Comportamiento de rotores ante la pérdida de la unidad MZD-U1. ESP_{ω} en plantas MZD, PLD, CMR, NVL, PGD y TPO.
- 6.30 Ajuste de fase para ESP's en planta Puerto Libertad.
- 6.31 Variación de fase para GEP(s) en MZD-U3.
- 6.32 Dinámica en el tiempo de la diferencia de velocidades ω_{13} en el modo de oscilación entre áreas.

LISTA DE TABLAS

- 2.1 Residuos de valores propios (magnitud, ángulo).
- 2.2 Elementos del vector derecho para λ_7 .
- 2.3 Magnitud de participación individual y por subsistema.
- 2.4 Modos de oscilación para el sistema de dos áreas.
- 3.1 Efecto de P_e , X_e , H y K_D en modo de oscilación local.
- 3.2 Efecto de la dinámica de campo.
- 3.3 Efecto de carga local en la dinámica de campo.
- 3.4 Relaciones de fase entre variables con respecto a la velocidad del rotor.
- 3.5 Parámetros del grupo gobernador-turbina.
- 3.6 Condiciones de estabilidad.
- 3.7 Impacto del control de velocidad en modo local.
- 4.1 Efecto del ESP con sistemas de excitación modernos y antiguos.
- 4.2 Ubicación de un ESP empleando el patrón modal de velocidades.
- 4.3 Residuos de funciones $\Delta\omega(s)/\Delta V_{ref}(s)$, $\Delta P_a(s)/\Delta V_{ref}(s)$, $\Delta f_t(s)/\Delta V_{ref}(s)$.
- 4.4 Elementos del vector derecho y participación asociados a $\Delta\omega_i$.
- 4.5 Análisis modal de la oscilación entre áreas.
- 4.6 Ubicación de un estabilizador por el ESP ideal.
- 4.7 Parámetros del sistema de prueba.
- 4.8 Información de $\Delta u(s)/\Delta V_{ref}(s)$ y $\Delta V_{esp_u}(s)/\Delta V_{ref}(s)$ para distintas señales.
- 4.9 Caracterización de señales para el control de oscilaciones entre áreas.
- 5.1 Vector derecho, factores de participación y residuos para el modo entre áreas.
- 5.2 Información de índices para selección de la señal de entrada al ESP.
- 5.3 Efecto de K_{esp} en los modos de oscilación sin reducción de ganancia.
- 5.4 Efecto de K_{esp} en modos de oscilación con reducción de ganancia.
- 5.5 Impacto de T_W en modos de oscilación del Area 1.
- 6.1 Longitud de líneas de transmisión.
- 6.2 Participación de plantas en modos de oscilación.

LISTA DE TABLAS (continuación)

- 6.3 Sensibilidad de amortiguamiento al *ESP ideal*
- 6.4 Modos de oscilación del sistema Noroeste.
- 6.5 Vectores derecho, de participación y de residuos en el modo de 0.66 Hz.
- 6.6 Vectores derecho, de participación y de residuos asociados al modo de oscilación de 0.66 Hz después de instalar un ESP en MZD-U3.
- 6.7 Vectores modales asociados a modos de oscilación de 1.17 1.25 Hz.
- 6.8 Modos de oscilación de baja frecuencia en el Sistema Noroeste después de instalar estabilizadores.
- 6.9 Modos de oscilación de baja frecuencia en el Sistema Noroeste de la CFE. ESP_{ω} 's en MZD, PLD, CMR, NVL, PGD y TPO.
- 6.10 Indices de la señal de entrada para el CEV y ESP.